



Изв. вузов «ПНД», т. 14, № 3, 2006

УДК 621.372.852; 621.318.134.029.64

## **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ПЛЕНКАМИ**

*Ю.П. Шараевский, С.В. Гришин, М.А. Малюгина*

Исходя из теоретических и экспериментальных исследований описаны основные нелинейные характеристики линий передачи на основе связанных структур с ферромагнитными пленками при возбуждении различных типов магнитостатических волн. Анализируются следующие типы связанных систем: система типа «электродинамическая структура – ферромагнитная пленка»; слоистая структура в виде двух связанных ферромагнитных пленок, каждая из которых рассматривается как волноведущая структура для магнитостатических волн; система типа «электродинамическая структура – две связанные ферромагнитные пленки».

### **Введение**

В последние годы начали интенсивно развиваться исследования, посвященные изучению распространения связанных волн в различных нелинейных средах, например, волн в плазме, электронных потоках, электромагнитных волн в периодических структурах, в оптических линиях передачи и т.д. [1–4]. Что касается связанных систем на основе ферромагнитных пленок, в которых возможно возбуждение различных типов магнитостатических волн (МСВ), то их анализ ограничивался, в основном, рассмотрением линейных задач (см., например, [5, 6]). Однако необходимо отметить, что ферромагнитные пленки и возбуждаемые в них МСВ представляют очень важный объект для исследования нелинейных явлений.

Магнитостатические волны обладают определенными преимуществами перед другими типами волн в кристаллических структурах [6–8]: легко возбуждаются практически во всем диапазоне сверхвысоких частот (1–40 ГГц); обладают большим замедлением; существует возможность управления дисперсионными характеристиками этих волн с помощью внешних нагрузок и магнитного поля; нелинейные явления наблюдаются при сравнительно небольших уровнях мощности. С помощью линий

передачи на МСВ можно реализовать практически все основные операции, используемые для функциональной обработки сигналов [6, 7, 9–11]: управляемую задержку, фильтрацию, преобразование спектра, ограничение мощности, подавление побочных сигналов и шумов и т.д.

Уже на первых стадиях экспериментального исследования магнитостатических волн было выяснено, что нелинейные явления играют существенную роль в волновых процессах в ферромагнитных пленках [8, 12, 13]. Можно выделить два основных нелинейных механизма в ферромагнитных пленках: механизм, обусловленный нелинейностью самой среды и приводящий, в частности, к модуляционной неустойчивости волн [14–16]; параметрический механизм, связанный с возбуждением волной накачки коротковолновых спиновых волн [8, 12, 17].

Важность последнего обусловлена тем, что он проявляется при сравнительно небольших уровнях мощности, приводит к дополнительным нелинейным потерям МСВ [8, 18] и используется при создании различных нелинейных устройств на МСВ [6–9, 19].

В настоящей работе исходя из теоретических и экспериментальных исследований проводится анализ связанных структур на основе ферромагнитных пленок, в которых при возбуждении различных типов магнитостатических волн проявляются указанные выше нелинейные механизмы. Рассматриваются следующие типы связанных систем: система типа «электродинамическая структура – ферромагнитная пленка»; слоистая структура в виде двух связанных ферромагнитных пленок, каждая из которых рассматривается как волноведущая структура для МСВ; и система типа «электродинамическая структура – две связанные ферромагнитные пленки».

Анализ нелинейных характеристик линий передачи на основе указанных выше структур проводится как с использованием известных из литературы результатов [19–24], так и на основе оригинальных работ авторов [25–36]. Особое внимание уделяется влиянию связи в таких системах, которая зависит от уровня мощности сигнала и может приводить к интересным нелинейным эффектам.

## **1. Система «микророскопическая линия – ферромагнитная пленка» при возбуждении магнитостатических волн**

Первые экспериментальные работы по исследованию прохождения сигналов разных уровней мощности через систему «микророскопическая линия передачи – ферромагнитная пленка» при возбуждении МСВ были проведены американскими учеными [19–22]. Указанная система представляла собой планарную электродинамическую структуру, состоящую из диэлектрической подложки, с одной стороны которой имеется заземленный проводящий экран, а с другой – полосковый проводник, над которым размещалась ферромагнитная пленка. Общий вид такой структуры показан на рис. 1.

Было установлено, что на частотах возбуждения МСВ с увеличением уровня мощности сигнала на входе системы наблюдается нелинейное ослабление СВЧ-сигнала на выходе. Причем СВЧ-сигнал, уровень мощности которого ниже некоторого порогового значения (малый сигнал) ослабляется сильнее, чем сигнал, уровень мощности которого выше порога (большой сигнал). Данный нелинейный эффект связан с наличием механизма параметрического возбуждения магнитостатической

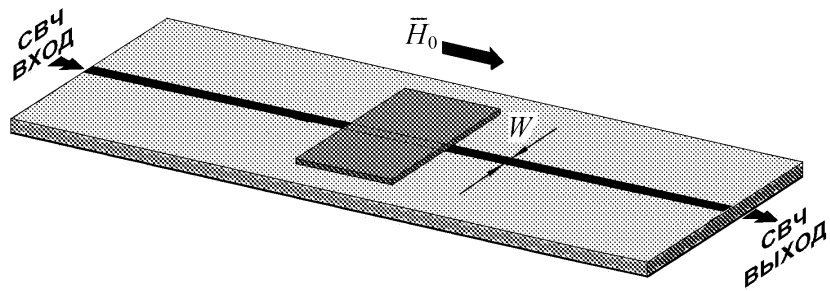


Рис. 1. Микрополосковая линия передачи на ПМСВ

волной спиновых волн<sup>1</sup> (СВ) в ферромагнитной пленке. При этом должны выполняться условия фазового синхронизма, которые для трехволновых процессов (параметрический механизм 1-го порядка) имеют следующий вид [6]:

$$\omega_0(k_0) = \omega_1(k_1) + \omega_2(k_2), \quad \bar{k}_0 = \bar{k}_1 + \bar{k}_2, \quad (1)$$

где  $\omega_0$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\bar{k}_0$ ,  $\bar{k}_1$  и  $\bar{k}_2$  – волновые векторы волны накачки и образовавшихся в результате ее «распада» пары СВ, соответственно.

В случае, когда волной накачки является МСВ, существуют частотные ограничения, связанные с тем, что спектр спиновых волн должен находиться в области

половиной частоты сигнала [6, 18].

Для широко используемых на практике пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) с намагниченностью насыщения  $4\pi M_0 \cong 1760$  Гс частотный диапазон существования параметрических процессов для объемных МСВ ограничивается частотами порядка 3.2 ГГц, а для поверхностной МСВ – 4.9 ГГц.

Нелинейное затухание МСВ в пленке ЖИГ, обусловленное параметрическим возбуждением СВ, приводит к увеличению отношения уровня большого сигнала к уровню малого сигнала или шума на выходе линии по сравнению с их отношением на входе. Данный эффект лежит в основе работы устройств, получивших в литературе название «усилитель отношения сигнала/шум» или «шумоподаватель» [6, 19–22, 25, 26].

На рис. 2 приведены типичные динамические характеристики шумопода-

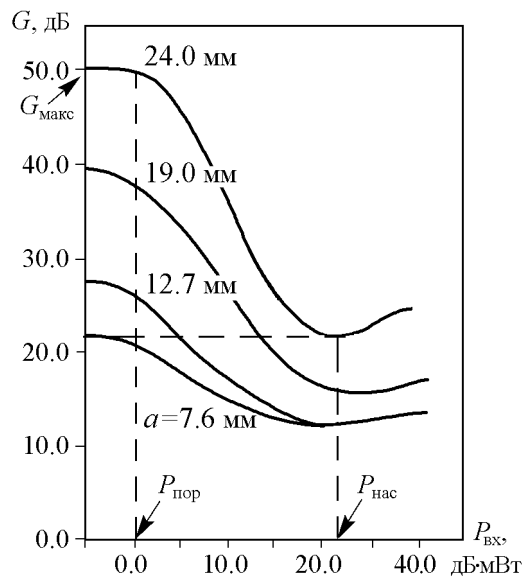


Рис. 2. Зависимость коэффициента подавления сигнала  $G$  мощности  $P_{\text{вх}}$  при различных длинах перекрытия  $a$  пленкой микрополоскового проводника [6, 19];  $d = 45.7$  мкм – толщина ферромагнитной пленки;  $W = 25$  мкм;  $H_0 = 580$  Э;  $f = 4$  ГГц

теля, представляющие собой зависимость коэффициента подавления  $G = -10 \lg(P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}})$  от уровня входной мощности  $P_{\text{вх}}$  [6, 20] ( $a$  – длина линии с пленкой ЖИГ;  $P_{\text{пор}}$  – пороговый уровень входной мощности, при превышении которого максимальная величина подавления сигнала в линии начинает уменьшаться;

<sup>1</sup>Спиновые волны, о которых здесь и далее по тексту идет речь, являются обменными спиновыми волнами с длиной волны, намного меньшей длины волны магнитостатических волн, называемых иногда в литературе безобменными спиновыми волнами [6, 8].

$P_{\text{нас}}$  – уровень входной мощности, при котором подавление сигнала в линии достигает своего минимального значения). Заметим, что эффективная работа шумоподавителя определяется наибольшей разницей между максимальным и минимальным значениями  $G$  в заданном интервале входных мощностей [2, 3].

Необходимо отметить, что до настоящего времени отсутствуют приемлемые модели для описания нелинейного механизма при прохождении сигналов разных уровней мощности через систему «микрополосковая линия – ферромагнитная пленка» при возбуждении МСВ, которую можно рассматривать как шумоподавитель. Одна из попыток построения модели заключалась в том (см. [6, 27]), что исследуемая линия рассматривалась как длинная линия, в которой величина погонного активного сопротивления уменьшается с ростом уровня мощности сигнала. В качестве эквивалентного активного сопротивления рассматривается сопротивление излучения микрополосковой линии при возбуждении МСВ, величина которого зависит от уровня потерь в ферромагнитной пленке. Однако эта модель носит, скорее, феноменологический характер и не описывает всех особенностей такой нелинейной линии, в частности, связанных с прохождением многочастотных сигналов разных уровней мощности [27]. Недостаток такого подхода заключается, прежде всего, в том, что основную роль при нелинейном ослаблении сигналов играет связь между микрополосковой линией и ферромагнитной пленкой при возбуждении МСВ, величина которой уменьшается с ростом уровня мощности входного сигнала. Данная зависимость подтверждается на примере рассматриваемой ниже резонансной линии передачи на МСВ, для которой удалось построить нелинейную модель в виде двух связанных контуров.

В системе «микрополосковая линия – ферромагнитная пленка» в качестве волны накачки при параметрическом возбуждении МСВ может выступать также непосредственно электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль полоскового проводника. При этом сигнал в линии с ростом уровня входной мощности будет ослабляться сильнее, чем в отсутствие ферромагнитной пленки, то есть такая линия передачи может использоваться в качестве ограничителя мощности [23, 24]. Подчеркнем, что в этом случае отсутствуют частотные ограничения для параметрических процессов первого порядка, о которых мы говорили выше.

## **2. Система «микрополосковый резонатор – ферромагнитная пленка» при возбуждении магнитостатических волн**

Рассмотрим нелинейную линию передачи, в которой в качестве возбудителя МСВ вместо согласованного с генератором и нагрузкой отрезка микрополосковой линии используется микрополосковый резонатор [28–31]. Использование резонаторных структур должно приводить к узкополосности системы в целом, однако предложенная схема имеет и определенные преимущества по сравнению с системой, рассмотренной выше: можно достичь более высоких амплитуд токов в микрополосковой линии, что приводит к возникновению нелинейных эффектов в ферромагнитной пленке при меньших уровнях падающей на нее мощности сигнала; значительно повышается отношение большой сигнал/малый сигнал [29, 32]; возможно построение более простых моделей, в том числе и нелинейных, описывающих основные особенности поведения таких систем. Ниже мы остановимся на основных резуль-

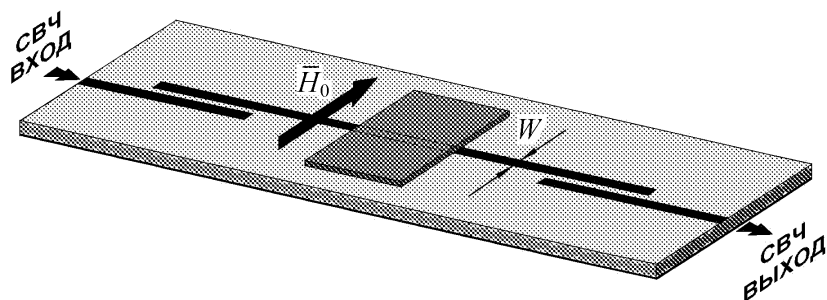


Рис. 3. Резонансная линия передачи на ООМСВ

татах, полученных при исследовании системы «микрополосковый резонатор – ферромагнитная пленка» при возбуждении обратных объемных МСВ (ООМСВ), схема которой приведена на рис. 3.

Микрополосковый резонатор в экспериментальном макете был выполнен методом тонкопленочной фотолитографии на диэлектрической подложке с  $\epsilon = 9.6$ . Основной вид колебания ( $n = 1$ ) резонатора характеризуется резонансной частотой  $f_0 = 2117$  МГц, нагруженной добротностью  $Q_H = 141$  и ослаблением на резонансной частоте  $A_0 = 12.3$  дБ. Пленка ЖИГ с намагниченностью насыщения  $4\pi M_0 = 1680$  Гс, с шириной линии ферромагнитного резонанса  $2\Delta H = 0.69$  Э и размерами  $4 \times 10 \times 0.04$  мм<sup>3</sup> располагалась вдоль поперечной оси симметрии микрополоскового резонатора в пучности ВЧ переменного тока. Внешнее постоянное магнитное поле  $\vec{H}_0$  приложено касательно к поверхности исследуемой системы и перпендикулярно микрополосковому проводнику.

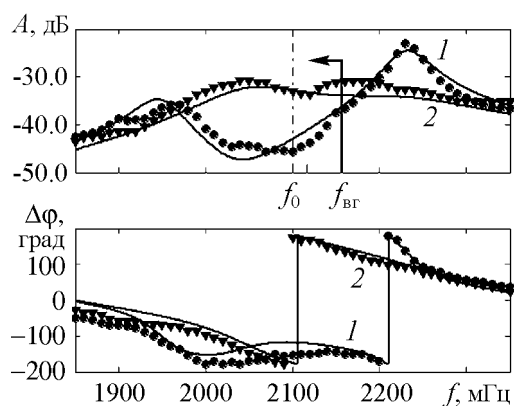


Рис. 4. АЧХ и ФЧХ резонансной линии передачи на ООМСВ в линейном режиме (1) и в режиме насыщения (2)

На рис. 4 приведены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) системы «микрополосковый резонатор – ферромагнитная пленка», полученные в режиме малого входного сигнала (линейный режим) и в режиме большого входного сигнала (режим насыщения, то есть когда дальнейшее увеличение уровня мощности входного сигнала не приводит к заметному изменению характеристик линии). На рисунке Г-образной стрелкой обозначена верхняя частотная граница теоретически рассчитанной полосы возбуждения ООМСВ, а штрихпунктирной линией – частота основного вида колебаний микрополоскового резонатора.

Приведенные АЧХ и ФЧХ линии передачи получены в случае, когда полоса возбуждения ООМСВ находится ниже резонансной частоты микрополоскового резонатора ( $H_0 = 300$  Э). Из рисунка следует, что АЧХ данной системы характеризуется наличием двух максимумов, частоты которых с увеличением уровня входного сигнала сближаются, а уровни их ослабления уменьшаются. Поведение характеристик исследуемой системы может быть представлено эквивалентной схемой в виде двух связанных контуров, один из которых описывает мик-

рополосковый резонатор, а другой (нелинейный контур) – ферромагнитную пленку при возбуждении МСВ [28]. Такое представление позволяет оценить связь ферромагнитной пленки с резонатором при возбуждении МСВ и построить нелинейную модель системы, определив функциональную зависимость параметров нелинейного контура и параметра связи от уровня сигнала [30].

Значения параметров эквивалентной схемы определялись из экспериментальных данных с применением методов оптимизации. Процедура определения эквивалентных параметров линии проходила в два этапа.

На первом этапе с использованием экспериментальных значений комплексного коэффициента передачи микрополоскового резонатора, определяемых в отсутствие ферромагнитной пленки, рассчитывались значения параметров первого контура  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_1$ , а также по измеренным значениям комплексного коэффициента передачи микрополоскового резонатора с ферромагнитной пленкой при возбуждении в последней ООМСВ в режиме малого входного сигнала определялись значения параметров второго колебательного контура  $R_2$ ,  $L_2$ ,  $C_2$  и коэффициента индуктивной связи  $k$  между контурами в линейном режиме.

На втором этапе проводились расчеты параметров схемы в нелинейном режиме. Предполагалось, что только три параметра схемы – активное сопротивление  $R_2$ , индуктивность второго контура  $L_2$  и коэффициент связи между контурами  $k$  – зависят от уровня мощности входного сигнала. Определенные с использованием экспериментальных данных и процедуры оптимизации значения указанных параметров модели для разных уровней входной мощности приведены на рис. 5 [31].

Полученные в результате моделирования зависимости  $R_2$ ,  $L_2$  и  $k$  от уровня входного сигнала можно описать конкретной функциональной зависимостью следующего вида:

$$B = B_{\min} \times \left\{ \alpha / [1 + (P_{\text{ср}} / \tilde{P}_{\text{вх}})^n] + 1 \right\}, \quad (2)$$

где  $B$  – величина, обозначающая  $R_2$ ,  $L_2$  или  $k$ ;  $\alpha = B_{\max} / B_{\min} - 1$ ;  $P_{\text{ср}}$  – величина входной мощности  $\tilde{P}_{\text{вх}}$ , соответствующая среднему арифметическому значению  $B$ .

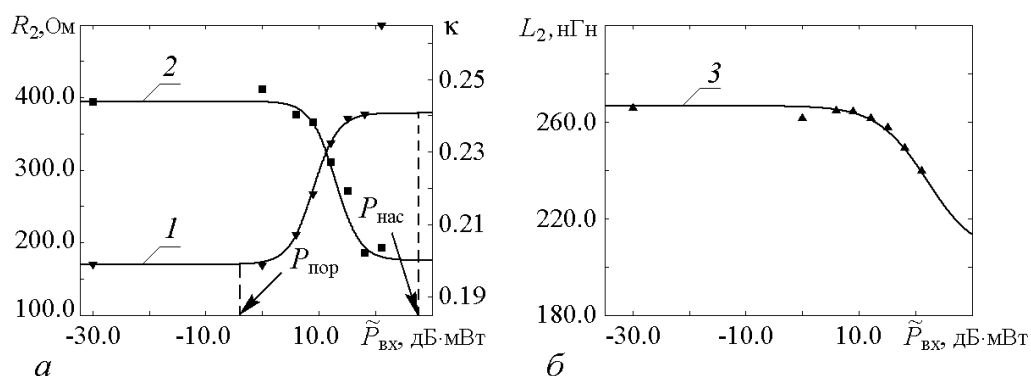


Рис. 5. Зависимости параметров эквивалентной схемы от уровня мощности входного сигнала  $\tilde{P}_{\text{вх}}$ : а – активного сопротивления второго контура  $R_2$  (кривая 1) и коэффициента связи  $k$  между контурами (кривая 2); б – индуктивности второго контура  $L_2$  (кривая 3). Значки соответствуют значениям параметров, полученным в результате их оптимизации по экспериментальным данным; сплошные линии – результат расчета по эмпирической формуле (2)

Значения  $B_{\min}$ ,  $\alpha$ ,  $P_{\text{ср}}$  и  $n$ , определенные для каждой из трех зависимостей, приведены в таблице.

Таблица

$B$	$B_{\min}$	$\alpha$	$P_{\text{ср}}$ , мВт	$n$
$R_2$ , Ом	169.69	1.23	8	2
$\kappa$	0.2	0.2195	20	-2
$L_2$ , нГн	205	0.3	160	-1

Представленные зависимости параметров эквивалентной схемы (см. рис. 5) характеризуются двумя определенными значениями входной мощности. Одно из них соответствует пороговому уровню мощности  $P_{\text{пор}}$ , при превышении которого в пленке ЖИГ начинается параметрическое возбуждение спиновых волн, а другое,  $P_{\text{нас}}$  – уровню насыщения, при превышении которого параметры модели уже не меняются.

Активное сопротивление  $R_2$  определяет потери во втором контуре, поэтому данный параметр можно считать аналогом параметра нелинейных потерь МСВ. Из рассмотрения результатов, представленных на рис. 5,  $a$ , следует, что в линейной области ( $\tilde{P}_{\text{вх}} < P_{\text{пор}}$ ), где потери ООМСВ минимальны, связь между контурами является максимальной и постоянной по величине. Начиная с  $P_{\text{пор}}$ , происходит возрастание потерь ООМСВ, что приводит к уменьшению величины связи между контурами. При значении  $\tilde{P}_{\text{вх}} < P_{\text{пор}}$  величина  $R_2$  практически не зависит от  $\tilde{P}_{\text{вх}}$  и становится максимальной, а коэффициент связи между контурами достигает при этом своего минимального значения. Уменьшение величины связи между контурами с ростом потерь во втором контуре объясняется тем, что вследствие распада ООМСВ на спиновые волны ухудшается ее связь с электромагнитным полем основного вида колебаний резонатора. Последнее обстоятельство и приводит к нелинейному поведению сигнала в линии передачи.

Для сравнения с экспериментальными данными на рис. 4 приведены результаты расчета АЧХ и ФЧХ исследуемой системы (сплошные линии) на основе предложенной эквивалентной схемы. Видно, что результаты расчета достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

На рис. 6 приведены теоретические и экспериментальные зависимости величин  $K = 20 \lg(A_{\text{бс}}/A_{\text{мс}})$  и  $F = \Delta\varphi_{\text{бс}} - \Delta\varphi_{\text{мс}}$  от частоты, где  $A_{\text{бс}}$ ,  $\Delta\varphi_{\text{бс}}$  – значения модуля и набега фазы коэффициента передачи линии в режиме большого сигнала (при  $\tilde{P}_{\text{вх}} \cong P_{\text{нас}}$  – режим насыщения);  $A_{\text{мс}}$ ,  $\Delta\varphi_{\text{мс}}$  – значение модуля и набега фа-

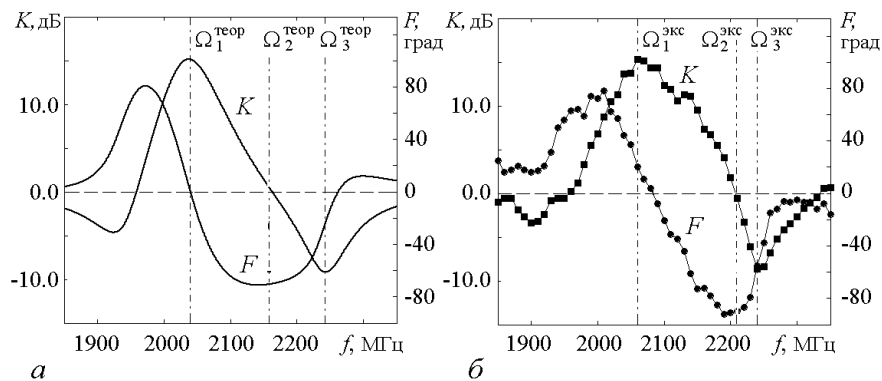


Рис. 6. Теоретическая (а) и экспериментальная (б) зависимости величин  $K$  и  $F$  от частоты. Максимальное значение  $K \cong 15$  дБ соответствует частоте  $\Omega_1^{\text{теор}} = 2044$  МГц,  $\Omega_1^{\text{экс}} = 2060$  МГц;  $K \sim 0$ ,  $F \approx 90^\circ - \Omega_2^{\text{теор}} = 2171$  МГц,  $\Omega_2^{\text{экс}} = 2210$  МГц; минимальное значение  $K \cong -9$  дБ –  $\Omega_3^{\text{теор}} = 2233$  МГц,  $\Omega_3^{\text{экс}} = 2240$  МГц

зы коэффициента передачи в режиме малого сигнала (при  $\tilde{P}_{\text{вх}} < P_{\text{пор}}$  – линейный режим). Как экспериментальные, так и теоретические зависимости  $K(f)$  характеризуются наличием частотных областей, в одной из которых ( $K > 0$ ) малый сигнал ослабляется сильнее, чем большой сигнал, а в другой ( $K < 0$ ), наоборот, большой сигнал ослабляется сильнее, чем малый сигнал.

Область  $K > 0$  находится, в основном, в пределах теоретически рассчитанной полосы возбуждения ООМСВ и в этой области частот волной накачки для СВ является магнитостатическая волна. Рассматриваемая резонансная линия передачи в данной области частот может использоваться как шумоподавитель.

Области частот, в которых  $K < 0$  (этим областям соответствует ограничение большого сигнала), находятся как в пределах теоретически рассчитанной полосы возбуждения ООМСВ (слева от области, где  $K > 0$ ), так и за пределами теоретически рассчитанной полосы возбуждения ООМСВ (справа от области, где  $K > 0$ ). Однако наибольший уровень ограничения большого сигнала  $K \cong -9$  дБ наблюдается в более высокочастотной области, и в этом случае можно предположить, что в роли волны накачки выступает электромагнитная волна. Рассматриваемая резонансная линия передачи в данной частотной области может использоваться как ограничитель мощности.

Из рассмотрения кривых  $F(f)$  на рис. 6 следует, что с увеличением уровня мощности входного сигнала в исследуемой линии передачи происходит также изменение величины набега фазы сигнала. Можно выделить частотную область вблизи значения частоты  $\Omega_2^{\text{теор}}$  (рис. 6, а) и  $\Omega_2^{\text{эк}}$  (рис. 6, б), где это изменение будет максимальным и может достигать величины  $F \approx 90^\circ$ . При этом нелинейное подавление СВЧ-сигнала на указанных частотах отсутствует ( $K \sim 0$ ), то есть сигналы большой и малой амплитуды проходят через линию передачи с одинаковым ослаблением. Следовательно, резонансная линия передачи на ООМСВ в этом случае может использоваться как нелинейный фазовращатель. Отметим, что на частоте  $\Omega_1$ , где значение  $K > 0$  и максимально, сдвиг фазы между сигналами большой и малой амплитуды практически равен нулю.

### **3. Связанные ферромагнитные пленки при возбуждении магнитостатических волн**

В качестве другого класса нелинейных линий передачи на основе связанных систем с ферромагнитными пленками могут рассматриваться слоистые структуры, в которых ферромагнитные пленки разделены диэлектрическими промежутками [33–35, 37, 38]. В частности, если мы имеем две ферромагнитные пленки, то подобная структура может рассматриваться как две связанные линии передачи, в каждой из которых распространяется магнитостатическая волна. Как известно [6, 14, 15, 39], при распространении МСВ при уровнях сигнала выше некоторого порогового значения (порядка 1–10 мВт) определенную роль также играют нелинейные механизмы, обусловленные модуляционной неустойчивостью МСВ. Модуляционная неустойчивость связана с взаимодействием несущей волны и симметрично отстоящих сателлитов с близкими частотами [14].

Анализируемая структура представляет собой два тонких ферромагнитных слоя (пленки) с намагниченностями насыщения  $4\pi M_{0,2}$ , разделенных диэлектрическим промежутком толщиной  $d$ . Структура бесконечна в направлении осей  $x$  и  $y$ , причем вдоль оси  $y$  при направлении постоянного магнитного поля  $\vec{H}_0$  по касательной к



поверхности слоев (вдоль оси  $x$ ) возможно распространение поверхностных МСВ (ПМСВ), а при направлении  $\vec{H}_0$  по нормали к поверхности (вдоль оси  $z$ ) – прямых объемных МСВ (ПОМСВ).

Для описания распространения МСВ используются уравнения движения вектора намагниченности и уравнения Максвелла, записанные в магнитостатическом приближении [6]. Предполагается, что взаимное влияние магнитостатических волн в каждой из пленок осуществляется через высокочастотные магнитные поля (связь носит чисто электродинамический характер), что позволяет в уравнениях движения для вектора намагниченности и уравнениях магнитостатики, записанных для каждого слоя, представить эффективные магнитные поля  $\vec{H}_{1,2}$  следующим образом [33]:

$$\vec{H}_{1,2} = \vec{H}_{1,2}^0 + \vec{h}_{1,2} + D\vec{h}_{2,1}, \quad (3)$$

где  $\vec{h}_{2,1}$  – переменные ВЧ магнитные поля,  $\vec{H}_{1,2}^0$  – постоянные компоненты,  $D$  – коэффициент связи между слоями. Значение  $D$  можно рассчитать на основе линейной теории (см., например, [6]) и тогда  $D = \exp(-2kd)$ , где  $k$  – постоянная распространения волны в системе.

Допустим также, что нелинейность каждой пленки определяется только величиной переменной намагниченности этой пленки, то есть нелинейность, обусловленная изменением продольной компоненты магнитного момента  $M_{z_{1,2}}$ , для каждого слоя задается в виде [33]:

$$M_{z_{1,2}} \approx M_{0,1,2} (1 - |m_{1,2}|^2), \quad (4)$$

где  $m_{1,2}$  – переменные намагниченности, значения которых определяются ВЧ магнитными полями как одной, так и другой пленки.

Важной особенностью предложенных связанных структур является расщепление дисперсионной кривой, соответствующей волне в одиночной пленке, на две, то есть возбуждение на одной частоте  $f$  двух нормальных волн – быстрой и медленной – с различными волновыми числами  $k_b$  и  $k_m$ , соответственно [6].

С учетом дисперсионных соотношений для связанных МСВ [6] и уравнений (3), (4) можно получить нелинейные дисперсионные соотношения, что дает возможность с использованием метода огибающих [14] построить систему нелинейных уравнений, описывающих эволюцию огибающей амплитуд нормальных волн в структуре  $\varphi_{b,m}$ , которая может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} j \left( \frac{\partial}{\partial t} + V_b \frac{\partial}{\partial y} \right) \varphi_b + \frac{A_b}{2} \frac{\partial^2 \varphi_b}{\partial y^2} - \frac{1}{4} (B_{bb} |\varphi_b|^2 + B_{bm} |\varphi_m|^2) \varphi_b + j\alpha \varphi_b = 0 \\ j \left( \frac{\partial}{\partial t} + V_m \frac{\partial}{\partial y} \right) \varphi_m + \frac{A_m}{2} \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial y^2} - \frac{1}{4} (B_{mb} |\varphi_b|^2 + B_{mm} |\varphi_m|^2) \varphi_m + j\alpha \varphi_m = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $V_{b,m} = \frac{\partial \omega}{\partial k_{b,m}}$ ,  $A_{b,m} = \frac{\partial^2 \omega}{\partial k_{b,m}^2}$ ,  $B_{bb} = \frac{\partial \omega}{\partial |\varphi_b|} \Big|_{k_b}$ ,  $B_{mb} = \frac{\partial \omega}{\partial |\varphi_b|} \Big|_{k_m}$ ,  $B_{bm} = \frac{\partial \omega}{\partial |\varphi_m|} \Big|_{k_b}$ ,  $B_{mm} = \frac{\partial \omega}{\partial |\varphi_m|} \Big|_{k_m}$  – коэффициенты, характеризующие групповые скорости, дисперсию и нелинейность, соответственно, и зависящие от параметров пленок и величины связи  $D$ ;  $\alpha$  – параметр диссипации. Здесь индекс «б» относится к быстрой волне с  $k = k_b$ , а индекс «м» – к медленной волне с  $k = k_m$ . Комплексные амплитуды

нормальных волн  $\varphi_{6,m}$  связаны с амплитудами волн в каждой из пленок  $\varphi_{1,2}(y, t) = m_{1,2} \exp [j(\omega t - k_{1,2}y)]$  ( $k_{1,2}$  – постоянные распространения в пленках 1 и 2, соответственно), следующим соотношением  $\varphi_{6,m}(y, t) = N(\varphi_{2,1}(y, t) \pm S_{1,2}\varphi_{1,2}(y, t))$ , где  $N$  и  $S_{1,2}$  коэффициенты, значения которых определяются относительными параметрами пленок.

При  $d = 0$  (коэффициент связи  $D = 1$ ) из (5) получим уравнение с коэффициентами, соответствующими одиночной пленке удвоенной толщины, а при  $d \rightarrow \infty$  система (5) распадается на два несвязанных нелинейных уравнения Шредингера (НУШ) с коэффициентами, соответствующими несвязанным пленкам, каждое из которых будет иметь вид [14]:

$$j \left( \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial y} \right) \varphi + \frac{A}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - B|\varphi|^2 \varphi + j\alpha \varphi = 0. \quad (6)$$

Здесь  $V$  – групповая скорость волны;  $A$  – коэффициент, характеризующий дисперсионное расплывание волны в направлении распространения;  $B$  – коэффициент нелинейности.

Анализ коэффициентов НУШ в уравнении (6) для различных типов МСВ показывает, что объемные волны (ПОМСВ) являются неустойчивыми в направлении распространения относительно продольных возмущений, а поверхностные (ПМСВ) – устойчивы [6, 14].

Основными нелинейными эффектами, к которым может приводить развитие модуляционной неустойчивости в этом случае, являются либо образование уединенных волн (солитонов огибающей), либо самомодуляция огибающей при амплитуде сигнала выше некоторого порогового значения (с дальнейшим переходом к хаотической динамике при увеличении амплитуды сигнала). Все эти эффекты достаточно хорошо изучены и наблюдались экспериментально (см., например, [14, 15, 39]).

Полученная для описания связанных волн в ферромагнитных пленках система (5) может быть аналогична нелинейным уравнениям для связанных волн в других нелинейных средах, в частности, подобная система уравнений используется для анализа нелинейной динамики поведения оптических сигналов [4]. Однако применительно к ферромагнитным пленкам анализ нелинейных связанных МСВ имеет ряд существенных особенностей, которые необходимо учитывать. Прежде всего, отметим, что коэффициенты в уравнениях (5) сильно зависят от связи и могут меняться в широких пределах. Из системы (5) также видно, что, в отличие от уравнения (4), связь приводит, во-первых, к изменению коэффициентов дисперсии (возможно изменение знака при изменении связи), коэффициентов нелинейности, групповой скорости, а во-вторых, к появлению в уравнениях перекрестных нелинейных членов.

Данные особенности в первую очередь сказываются на условиях возникновения модуляционной неустойчивости при прохождении МСВ в рассматриваемой системе. В случае возбуждения одной из нормальных волн в структуре ( $\varphi_{0,6,m} \neq 0$ ,  $\varphi_{0,6,b} = 0$ ) система (5) распадается на два несвязанных НУШ для каждой из нормальных волн, с коэффициентами, зависящими от величины связи. Условие модуляционной неустойчивости в этом случае будет иметь вид [14]:

$$A_{6,m} B_{6b,mm} < 0.$$

Анализ коэффициентов в уравнениях (5) показывает, что действие связи не приводит к смене знаков коэффициентов нелинейности, а именно  $B_{6b,mm} < 0$  для

ПОМСВ и  $B_{\text{бб,мм}} > 0$  для ПМСВ при любой величине связи. Однако возможно изменение знаков коэффициентов дисперсии  $A_{\text{б,м}}$  для одной из нормальных мод в узкой области частот. Это говорит о том, что в этих областях выполняется (либо нарушается) критерий модуляционной неустойчивости для одной из нормальных мод и она становится неустойчивой (устойчивой), в отличие от данного типа МСВ в одиночной пленке.

При возбуждении двух нормальных мод ( $\varphi_{0\text{б,м}} \neq 0$ ,  $\varphi_{0\text{м,б}} \neq 0$ ), как показано в [36, 37], решение системы уравнений типа (5) будет неустойчиво даже в том случае, если решение каждого из уравнений в отдельности устойчиво, то есть МСВ являются модуляционно неустойчивыми в связанной структуре при возбуждении двух нормальных волн независимо от направления магнитного поля (возбуждение ПОМСВ или ПМСВ). Данный вид модуляционной неустойчивости, возникающей при одновременном распространении двух модуляционно устойчивых волн, связанных через нелинейность, называется кросс-модуляцией [4].

Остановимся на основных характерных особенностях распространения нелинейной МСВ в линии передачи на основе связанных ферромагнитных структур, по сравнению с волнами в одиночной пленке, которые могут представлять определенный интерес с точки зрения создания нелинейных линий передачи на МСВ для функциональной обработки сигнала. В частности, в результате численного исследования на основе уравнений (5) показано, что при импульсном возбуждении ПОМСВ в связанной структуре (при величине сигнала больше некоторого порогового значения  $\varphi_0^{\text{пор}}$ ) имеют место следующие основные особенности. Во-первых, при возбуждении одной волны в связанной структуре характер эволюции полностью определяется зависимостью коэффициентов дисперсии и групповых скоростей в нелинейных уравнениях от величины связи. Во-вторых, в зависимости от характера возбуждения (возбуждение быстрой или медленной моды) и величины связи, ПОМСВ в связанной структуре может быть как устойчива, так и неустойчива (возможно либо формирование уединенной волны, либо расплывание начального профиля). В-третьих, при одновременном возбуждении двух волн в связанной структуре ПОМСВ является неустойчивой независимо от области изменения параметра  $d$  и имеет место формирование уединенной волны огибающей на выходе со скоростью и амплитудой больше, чем в одиночной пленке.

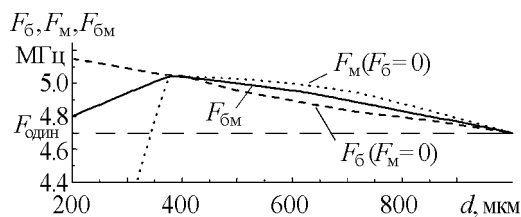


Рис. 7. Зависимости частоты модуляции от  $d$  при возбуждении быстрой моды (штриховая), медленной моды (пунктирная), при возбуждении обеих мод (сплошная кривая)

как учет обменного взаимодействия приводит к тому, что коэффициенты дисперсии быстрой и медленной волн в связанной структуре не меняют знак. Частота модуляции зависит от величины связи как показано на рис. 7, причем растет с увеличением связи при возбуждении только быстрой волны ( $F_{\text{б}}$ ), а также растет, а затем убывает при возбуждении только медленной волны ( $F_{\text{м}}$ ), либо двух волн ( $F_{\text{бм}}$ ).

Особенности распространения МСВ при возбуждении непрерывным сигналом можно рассмотреть на примере дипольно-обменных ПОМСВ, для которых в одиночных пленках при  $\varphi_0 > \varphi_0^{\text{пор}}$  имеет место самомодуляция на частоте  $F_{\text{один}}$  [39]. При этом получено, что самомодуляция дипольно-обменной ПОМСВ в связанной структуре наблюдается независимо от способа возбуждения и величины связи, так

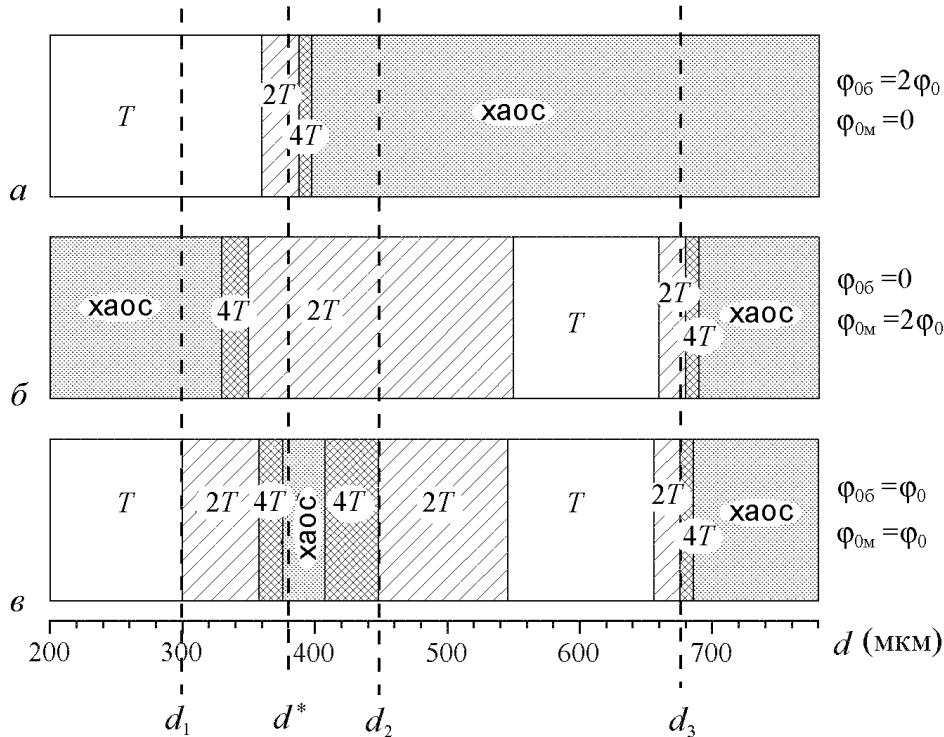


Рис. 8. Различные режимы поведения огибающей сигнала (модуляция с периодом  $T$ ,  $2T$ ,  $4T$ , хаотическая динамика) при возбуждении быстрой моды (а); медленной моды (б); при возбуждении обеих мод (в)

Влияние связи и способа возбуждения на характер хаотической модуляции при увеличении амплитуды входного сигнала показано на рис. 8. При возбуждении только быстрой волны имеет место переход к регулярному поведению огибающей с увеличением связи (рис. 8, а); последовательное изменение характера волновой эволюции в направлении «хаос-порядок-хаос» с увеличением связи при возбуждении только медленной волны приведено на рис. 8, б, а при возбуждении двух волн – на рис. 8, в.

Таким образом, можно отметить, что в рассматриваемой связанной структуре имеют место: формирование уединенных волн в некотором диапазоне значений связи при возбуждении одной моды, а также при одновременном возбуждении двух мод; зависимость частоты самомодуляции от параметров связи (характер которой определяется способом возбуждения системы); различные сценарии развития модуляционной неустойчивости (одночастотная, многочастотная модуляция, хаос) при различной связи и способе возбуждения.

#### 4. Система типа «микрополосковая линия – две связанные ферромагнитные пленки»

Один из способов расширения рабочей полосы системы «микрополосковая линия – ферромагнитная пленка», нелинейные характеристики которой были описаны выше (см. раздел 1), связан с использованием двух ферромагнитных пленок, в которых распространяются связанные магнитоэлектрические волны. В этом случае две ферромагнитные пленки можно расположить по разные стороны от микрополосковой линии.

Амплитудно-частотная характеристика линии передачи с микрополосковой линией, выполненной в виде меандра, и двумя ферритовыми пленками, снятая на панорамном измерителе в режиме слабого сигнала, показана на рис. 9 (кривая 1). Кривая 2 на рис. 9 соответствует амплитудно-частотной характеристике той же микрополосковой линии с одной ферритовой пленкой, а кривая 3 показывает уровень подавления сигнала при  $H_0 = 0$ . Видно, что в исследуемой системе с одной ферритовой пленкой полоса частот по уровню подавления 30 дБ составляет величину порядка 400 МГц, а в случае использования двух связанных пленок – 1000 МГц, причем в последнем случае увеличивается общий уровень подавления слабых сигналов.

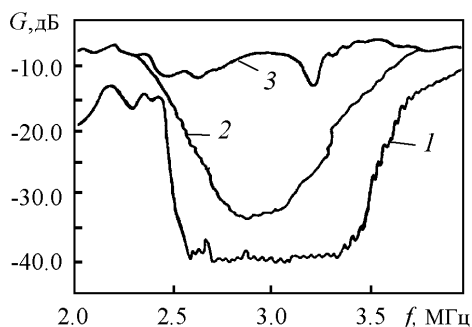


Рис. 9. АЧХ линии передачи (1 – с двумя ферромагнитными пленками; 2 – с одной ферромагнитной пленкой); 3 – уровень подавления сигнала в линии при  $H_0 = 0$

определяется, в основном, шириной микрополосковой линии) рабочая полоса возбуждения будет шире, чем в случае одиночной пленки.

Дальнейшее расширение рабочей полосы частот можно получить, если использовать ферритовые пленки с разной величиной намагниченности [36].

### Заключение

На основе теоретических и экспериментальных исследований описаны основные нелинейные характеристики линий передачи на основе связанных структур с ферромагнитными пленками при возбуждении различных типов магнитостатических волн.

Показано, что в случае системы типа «электродинамическая структура – ферромагнитная пленка», в которой основной нелинейный механизм обусловлен параметрическими процессами первого порядка и связан с возбуждением коротковолновых спиновых волн, существенным для объяснения нелинейного поведения сигналов является наличие нелинейной связи между электродинамической структурой и ферромагнитной пленкой при возбуждении МСВ сигналами разных уровней мощности. При анализе системы «микрополосковый резонатор – ферромагнитная пленка» можно количественно описать эту связь и определить ее зависимость от уровня сигнала. Учет этой связи представляет интерес для построения строгих моделей, позволяющих учитывать все нелинейные особенности таких линий, особенно при прохождении сложных сигналов разных уровней мощности.

Показано также, что использование связанных структур в виде двух ферромагнитных пленок позволяет эффективно управлять нелинейными процессами, связанными с модуляционной неустойчивостью магнитостатических волн, в частности, величиной связи можно регулировать порог возникновения модуляционной неустойчивости и характер развития этой неустойчивости вплоть до режимов перехода к хаосу. Важным представляется также использование подобных связанных структур и в нелинейных линиях передачи типа «микророскопическая линия – ферромагнитная пленка».

*Работа выполнена в рамках программ Федерального агентства по науке и инновациям (гранты № НШ-4167.2006.2, № 2006-РИ-19.0/001/053), программы Федерального агентства по образованию и CRDF «Развитие научного потенциала высшей школы на 2006-2007 гг.» (Appendix-06-04) и при поддержке РФФИ (гранты № 04-02-16296 и № 05-02-16273).*

### **Библиографический список**

1. Манаков С.В. К теории двумерной стационарной самофокусировки электромагнитных волн // ЖЭТФ. 1973. Т. 65, № 8. С. 505.
2. Ueda T., Kath W. Dynamics of coupled solitons in nonlinear optical fibres // Phys. Rev. A. 1990. Vol. 42, № 1. P. 563.
3. Boardman A. D. Solutions to coupled Schrodinger equations in optical media // Phys. Rev. A. 1995. Vol. 50, № 3. P. 1800.
4. Agrawal G.P. Modulation instability by cross-phase modulation in optical fibres // Phys. Rev. A. 1989. Vol. 39, № 7. P. 3406.
5. Рыскин Н.М. Связанные нелинейные уравнения Шредингера для описания распространения многочастотных волновых пакетов в нелинейной среде с дисперсией // ЖЭТФ. 1994. Т. 106, вып. 5(11). С. 1542.
6. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот: Учеб. пособие. Саратов: Изд-во СГУ, 1993. 311 с.
7. Adam J.D., Daniel M.R., Emtage P.R., Tilisa S.N. Magnetostatic wave // Thin films for advanced electronics devices. Boston, 1991. P. 1–141.
8. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука. Физматлит, 1994. 461 с.
9. Исхак В.С. Применение магнитостатических волн: Обзор // ТИИЭР. 1988. Т. 76, № 2. С. 86.
10. Адам Дж. Д. Аналоговая обработка сигналов с помощью СВЧ-ферритов // ТИИЭР. 1988. Т. 76, № 2. С. 73.
11. 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.
12. Shilz W. Spin-wave propagation in epitaxial YIG films // Philips Res. Rep. 1973. Vol. 28, № 1. P. 50.

13. Вендик О.Г., Калиникос Б.А., Чарторижский Д.Н. Нестабильность спиновых волн в касательно намагниченных ферромагнитных пленках // ФТТ. 1977. Т. 19, № 2. С. 387.
14. Звездин А.К., Попков А.Ф. К нелинейной теории магнитостатических спиновых волн // ЖЭТФ. 1983. Т. 84, № 2. С. 606.
15. Калиникос Б.А., Ковшиков Г.Н., Славин А.Н. Наблюдение спин-волновых солитонов в ферромагнитных пленках // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38, № 7. С. 343.
16. Зильберман П.Е., Никитов С.А., Тимирязев А.Г. Четырехмагنونный распад и кинетическая неустойчивость бегущей магнитостатической волны в пленках железо-иттриевого граната // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 42, № 3. С. 82.
17. Калиникос Б.А. и др. Параметрическое возбуждение и релаксация спиновых волн в тонких ферромагнитных пленках // ФТТ. 1975. Т. 17, № 11. С. 3434.
18. Медников А.М. Нелинейные эффекты при распространении поверхностных спиновых волн в пленках ЖИГ // ФТТ. 1981. Т. 23, № 1. С. 242.
19. Adam J.D., Stitzer S.N. A magnetostatic wave signal-to-noise enhancer // J. Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 36, № 6. P. 485.
20. Stitzer S.N., Goldie H., Adam J.D., Emtage P.R. Magnetostatic wave signal-to-noise enhancer // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, USA. 1980. P. 238.
21. Adam J.D. A broadband microwave signal-to-noise enhancer // IEEE Trans. on Magn. 1980. Vol. MAG-16, № 5. P. 1168.
22. Adam J.D. A slot-line signal-to-noise enhancer // IEEE Trans. on Magn. 1985. Vol. MAG-21, № 5. P. 1794.
23. Stitzer S.N., Goldie H. A multi-octave frequency selective limiter // IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest, USA. 1983. P. 326.
24. Stitzer S.N. Frequency selective microwave power limiting in thin YIG films // IEEE Trans. on Magn. 1983. Vol. MAG-19, № 5. P. 1874.
25. Гурзо В.В., Прокушкин В.Н., Рейхель В.В., Шараевский Ю.П. Характеристики аттенюатора с динамической нелинейностью на поверхностных магнитостатических волнах // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1986. Т. 29, № 9. С. 95.
26. Шараевский Ю.П., Гришин В.С., Гурзо В.В., Дерунов А.В., Шахат А.А. Взаимодействие регулярных и шумовых сигналов в нелинейной линии передачи на магнитостатических волнах // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40, № 7. С. 1064.
27. Соловей Д.В., Шараевский Ю.П. Прохождение сложных сигналов через нелинейную линию передачи на магнитостатических волнах // Изв. вузов. ПНД. 1995. Т. 3, № 1. С. 11.
28. Гришин С.В., Гришин В.С., Гурзо В.В., Шараевский Ю.П. Взаимная связь микрополоскового резонатора с ферромагнитной пленкой при возбуждении магнитостатических волн // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 6. С. 724.
29. Гришин С.В., Шараевский Ю.П. Нелинейное подавление сверхвысокочастотных сигналов в резонансной линии передачи на магнитостатических волнах // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, № 2. С. 77.

30. Гришин С.В., Гришин В.С., Шараевский Ю.П. Определение нелинейных эквивалентных параметров резонансной системы с ферромагнитной пленкой при возбуждении магнитостатических волн // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50, № 8. С. 902.
31. Гришин С.В., Давоян А.Р., Шараевский Ю.П. Нелинейная модель взаимодействия сигналов разных уровней мощности в резонансной линии передачи на магнитостатических волнах // Изв. вузов. ПНД. 2005. Т. 13, № 5–6. С. 123.
32. Шараевский Ю.П., Гришин С.В., Гурзо В.В. Шумоподавитель: Патент на полезную модель № 41550 // Изобретения. Полезные модели: Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС, 2004. № 30. С. 542.
33. Малюгина М.А., Шараевский Ю.П. Моделирование нелинейных процессов на магнитостатических волнах в связанных ферромагнитных структурах // Изв. вузов. ПНД. 2000. Т. 8, № 3. С. 59.
34. Дудко Г.М., Малюгина М.А., Шараевский Ю.П. Распространение импульсов магнитостатических волн в двухслойной ферромагнитной структуре // Изв. вузов. ПНД. 2003. Т. 8, № 6. С. 116.
35. Дудко Г.М., Малюгина М.А., Шараевский Ю.П. Самомодуляция дипольно-обменных магнитостатических волн в нормально намагниченной связанной ферромагнитной структуре // Изв. вузов. ПНД. 2004. Т. 12, № 1–2. С. 40.
36. Шараевский Ю.П., Малюгина М.А., Яровая Е.В. Модуляционная неустойчивость поверхностных магнитостатических волн в структурах типа ферромагнетик – диэлектрик – ферромагнетик // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 3. С. 33.
37. Короткевич А.О., Никитов С.А. Фазовая кросс-модуляция поверхностных магнитостатических спиновых волн // ЖЭТФ. 1999. Т. 116, вып. 6(12). С. 205.
38. Marcelli R., Nikitov S.A. Magnetostatic wave solitons induced by cross-phase modulation // Europhys. Lett. 2001. Vol. 54, № 1. P. 91.
39. Дудко Г.М., Казаков Г.Т., Кожевников А.Н., Филимонов Ю.А. Удвоение периода и хаос при 4-х магнотном распаде МСВ в пленках ЖИГ // ПЖТФ. 1987. Т. 13. С. 736.

*Саратовский государственный  
университет*

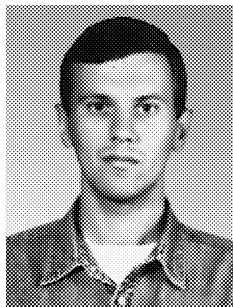
*Поступила в редакцию 12.04.2006*

## **NONLINEAR TRANSMISSION LINES ON THE BASIS OF COUPLED SYSTEMS WITH FERROMAGNETIC FILMS**

*Yu.P. Sharaevsky, S.V. Grishin, M.A. Malugina*

Principal nonlinear characteristics of transmission lines on the basis of coupled structures with ferromagnetic films at excitation of different types of magnetostatic waves are described proceeding from theoretical and experimental researches. Following types of coupled systems are analyzed: «electrodynamics structure – ferromagnetic film»; the layered structure in the form of two coupled ferromagnetic films, each taken separately is considered as wave controlling structure for magnetostatic waves; and «electrodynamics structure – two coupled ferromagnetic films».

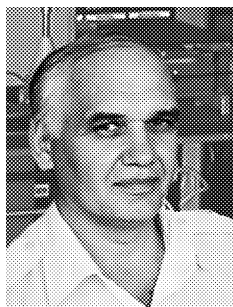




*Гришин Сергей Валерьевич* – родился в 1974 году. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (1997). В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В настоящее время занимает должность старшего преподавателя на кафедре электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов - физика магнитостатических волн в тонких ферромагнитных пленках, математическое моделирование нелинейных процессов в радиофизических системах на основе ферромагнитных пленок. Имеет около 30 публикаций в отечественных научно-технических журналах и сборниках.



*Малюгина Мария Александровна* – родилась в Саратове (1977). Окончила Высший колледж прикладных наук Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (1999). В 2004 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по теме «Нелинейные магнитостатические волны в связанных ферромагнитных структурах». В настоящее время занимает должность доцента на кафедре нелинейной физики факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов – волновые явления в тонких ферромагнитных пленках, физика магнитных явлений. Имеет ряд публикаций по данной тематике.



*Шараевский Юрий Павлович* – родился в Николаевске-на-Амуре Хабаровского края (1942). Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой нелинейной физики СГУ. Работал в области электроники сверхвысоких частот, в настоящее время занимается исследованиями в области физики нелинейных волновых процессов в тонких магнитных пленках. Читает лекции по общему курсу физики, по курсу «Концепции современного естествознания» для студентов гуманитарных специальностей, спецкурс «Колебания и волны в нелинейных активных средах». Опубликовал более 120 научных и научно-методических работ, несколько учебных пособий и монографию в соавторстве со В.С. Стальмаховым и А.В. Вашковским «Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот» (Изд-во Саратов. ун-та, 1980). E-mail:sharaevskyy@info.sgu.ru