

05

Модуляционная неустойчивость поверхностных магнитостатических волн в структурах типа ферромагнетик— диэлектрик—ферромагнетик

© Ю.П. Шараевский, М.А. Малюгина, Е.В. Яровая

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: maluginama@sgu.ru

Поступило в Редакцию 2 августа 2005 г.

Теоретически показана возможность модуляционной неустойчивости поверхностных магнитостатических волн относительно возмущений вдоль направления распространения в связанной касательно намагниченной ферромагнитной структуре как при возбуждении одной моды в структуре за счет изменения характера дисперсии, так и при возбуждении двух мод за счет возникновения нелинейной связи.

PACS: 41.20.Jb

Известно (см., например, [1–4]), что поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ), распространяющиеся в одиночной касательно намагниченной ферромагнитной пленке¹, при повышении уровня сигнала являются устойчивыми относительно продольных возмущений, т.е. для такого типа волн отсутствует модуляционная неустойчивость в направлении распространения возмущения. В то же время в слоистых структурах, например типа феррит–полупроводник [5] или феррит–диэлектрик–металл [6], введение дополнительного слоя (полупроводника или металла) может приводить при определенных условиях к модуляционной неустойчивости ПМСВ, причем этот эффект обусловлен в основном изменением характера дисперсии волн. Модуляционная неустойчивость ПМСВ в одиночной ферромагнитной пленке может наблюдаться также при возбуждении двух сигналов на разных

¹ Здесь и далее под одиночной пленкой мы будем понимать структуру в виде тонкого ферромагнитного слоя, нагруженного с двух сторон полубесконечными диэлектрическими слоями [4].

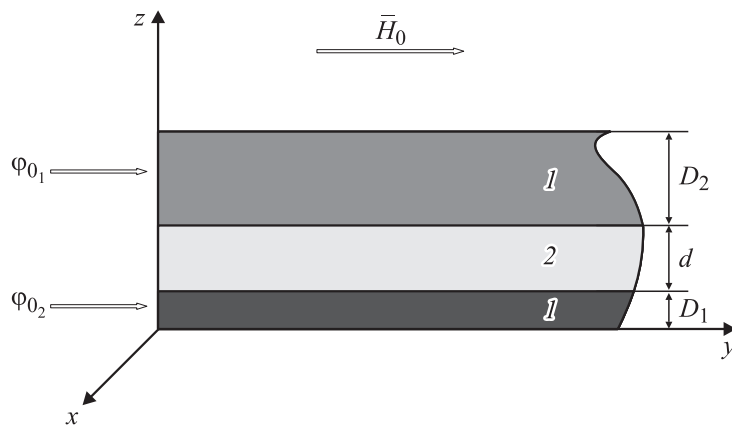


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой модели (1 — ферромагнетик, 2 — диэлектрик).

частотах, причем в данной ситуации неустойчивость обусловлена взаимным влиянием двух модуляционно-устойчивых волн [7,8].

В настоящей работе анализируется возможность модуляционной неустойчивости связанных ПМСВ в структуре, представляющей собой две ферромагнитные пленки, разделенные слоем диэлектрика. Особенности модуляционной неустойчивости применительно к случаю распространения связанных объемных магнитостатических волн (ОМСВ) в нормально намагниченной структуре подробно рассмотрены в работах авторов [9,10]. Причем показано, что в таких системах связь может не только приводить к изменению дисперсионных характеристик волн, но и к появлению нелинейной связи между волнами (см. также [11,12]).

Анализируемая в работе структура представляет собой два тонких ферромагнитных слоя 1 и 2 толщиной $D_{1,2}$ и с намагниченностью насыщения $M_{0,2}$ соответственно, разделенных диэлектрическим промежутком толщины d (рис. 1). Структура бесконечна в направлении осей x и y , постоянное магнитное поле \vec{H}_0 приложено по касательной к поверхности слоев.

Предполагается [9,10], 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 1 и 2, эффективные магнитные поля $\bar{H}_{1,2}$ в каждом слое представить следующим образом:

$$\bar{H}_{1,2} = \bar{H}_{1,2}^0 + \bar{h}_{1,2} + K\bar{h}_{1,2}, \quad (1)$$

где $\bar{h}_{1,2}$ — переменные ВЧ магнитные поля, $\bar{H}_{1,2}^0$ — постоянные компоненты, K — коэффициент связи между слоями. Значение K можно рассчитать на основе линейной теории (см., например, [9,10]) и тогда $K = \exp(-2kd)$, где k — постоянная распространения волны в системе.

Допустим также, что нелинейность каждой пленки определяется только величиной переменной намагниченности этой пленки, т. е. нелинейность, обусловленная изменением продольной компоненты магнитного момента $M_{z_{1,2}}$, для каждого слоя задается в виде [4]

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

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

Важной особенностью связанных структур является расщепление дисперсионной кривой, соответствующей волне в одиночной пленке, на две, т. е. возбуждение на одной частоте ω двух нормальных волн — быстрой (I) и медленной (II) волн с различными волновыми числами $k_{I,II}$. Если пленки в структуре различные, то поведение дисперсионных кривых в этом случае имеет ряд особенностей. Например, если пленки в структуре имеют разную намагниченность, то полосы пропускания быстрой и медленной волн могут не совпадать [4].

С учетом соотношений (1) и (2) нелинейные дисперсионные соотношения для быстрой и медленной волн в линиях можно представить в виде

$$\omega^2 = \frac{1}{2} \left(c_{11}|_{k=k_{I,II}} + c_{22}|_{k=k_{I,II}} + 2\omega(B_1|_{k=k_{I,II}}|\varphi_1|^2 + B_2|_{k=k_{I,II}}|\varphi_2|^2) \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(c_{11}|_{k=k_{I,II}} - c_{22}|_{k=k_{I,II}} + 2\omega(B_1|_{k=k_{I,II}}|\varphi_1|^2 - B_2|_{k=k_{I,II}}|\varphi_2|^2) \right)^2 + K_{I,II}^2 c_{12}|_{k=k_{I,II}} c_{21}|_{k=k_{I,II}} (1 - 2(a_1|\varphi_1|^2 + a_2|\varphi_2|^2))}, \quad (3)$$

где верхний знак „+“ относится к быстрой волне с $k = k_I$, а нижний знак „-“ — к медленной волне с $k = k_{II}$; коэффициенты $B_{1,2}|_{k=k_{I,II}}$,

$c_{11,22,12,21}|_{k=k_{1,II}}$, $a_{1,2}$ определяются из линейных соотношений и зависят от параметров структуры [4], а $K_{I,II} = \exp[-k_{I,II}d]$. Комплексные амплитуды волн в каждой из пленок $\varphi_{1,2} = m_{1,2} \exp[j(\omega t - k_{1,2}y)]$, где $k_{1,2}$ — постоянные распространения в пленках, связаны соотношениями $\varphi_{I,II}(y, t) = N(\varphi_{2,1}(y, t) \pm R_{1,2}\varphi_{1,2}(y, t))$, где N и $R_{1,2}$ — коэффициенты, значения которых определяются относительными параметрами пленок (если пленки одинаковые, то $N = R_{1,2} = 1$).

На основе дисперсионного соотношения (3) можно построить с использованием методики огибающих [2] систему нелинейных уравнений, описывающих эволюцию огибающей сигнала, которая может быть представлена в следующем виде²:

$$\begin{cases} \left(j \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_I \frac{\partial}{\partial y} \right) \varphi_I + \frac{A_I}{2} \frac{\partial^2 \varphi_I}{\partial y^2} - \frac{1}{4} (B_{I,II} |\varphi_I|^2 + B_{I,II} |\varphi_{II}|^2) \varphi_I = 0, \right. \\ \left. \left(j \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_{II} \frac{\partial}{\partial y} \right) \varphi_{II} + \frac{A_{II}}{2} \frac{\partial^2 \varphi_{II}}{\partial y^2} - \frac{1}{4} (B_{II,I} |\varphi_I|^2 + B_{II,II} |\varphi_{II}|^2) \varphi_{II} = 0, \right. \end{cases} \quad (4)$$

где

$$V_{I,II} = \frac{\partial \omega}{\partial k_{I,II}}, \quad A_{I,II} = \frac{\partial^2 \omega}{\partial k_{I,II}^2}, \quad B_{I,I} = \frac{\partial \omega}{\partial |\varphi_I|} \Big|_{k_I},$$

$$B_{II,I} = \frac{\partial \omega}{\partial |\varphi_I|} \Big|_{k_{II}}, \quad B_{I,II} = \frac{\partial \omega}{\partial |\varphi_{II}|} \Big|_{k_I}, \quad B_{II,II} = \frac{\partial \omega}{\partial |\varphi_{II}|} \Big|_{k_{II}}$$

— коэффициенты, характеризующие групповые скорости, дисперсию и нелинейность соответственно и зависящие от параметров пленок и величины связи.

Если пленки одинаковые, то в (4) $B_{I,I} = B_{I,II} = B_I$, а $B_{II,II} = B_{II,I} = B_{II}$. При $d \rightarrow \infty$ система (4) распадается на два несвязанных нелинейных уравнения Шредингера (НУШ) с коэффициентами, соответствующими несвязанным пленкам 1 и 2, а при $d = 0$ получим уравнение с коэффициентами, соответствующими одиночной пленке удвоенной толщины.

² Полученная система уравнений может описывать связанные волны различной физической природы, в частности, она используется для описания нелинейной динамики оптических сигналов [15].

Как показано в [13], решение системы уравнений типа (4) будет неустойчиво даже в том случае, если решение каждого из уравнений в отдельности устойчиво, т.е. ПМСВ являются модуляционно-неустойчивыми в связанной структуре при возбуждении двух нормальных волн. Данный вид модуляционной неустойчивости, возникающей при одновременном распространении двух модуляционно-устойчивых волн, связанных через нелинейность, называется кросс-модуляцией [13].

В случае возбуждения одной из нормальных волн в структуре ($B_{I,II} = B_{II,I} = 0$) система уравнений (4) распадается на два несвязанных нелинейных уравнения для каждой из нормальных волн и условие модуляционной неустойчивости в этом случае имеет вид [2,4]:

$$A_{I,II} B_{I,III} < 0. \quad (5)$$

Анализ коэффициентов в уравнениях (4) показал, что действие связи не приводит к смене знаков коэффициентов нелинейности, а именно $B_{I,III} < 0$ при любой величине связи. Однако возможно изменение знаков коэффициентов дисперсии $A_{I,II}$ для одной из нормальных мод в узкой области частот. На рис. 2 приведены результаты расчета областей модуляционной неустойчивости, которые имеют место при возбуждении одной из нормальных волн, причем эти области для каждой из нормальных волн разнесены по частоте и параметру связи (параметр d). Как видно из рис. 2, *a*, на котором представлены области модуляционной неустойчивости для случая одинаковых пленок, сильная связь (малые значения d) приводит к модуляционной неустойчивости в области высоких частот, а слабая связь — в области низких. При уменьшении толщины пленок область изменения параметра d , при котором возможна неустойчивость, сужается (см. вставку к рис. 2, *a*). Для структуры, состоящей из пленок с различными параметрами при фиксированной частоте, существует некоторый диапазон значений D_2/D_1 (или значений M_{0_2}/M_{0_1}), соответствующих модуляционной неустойчивости либо быстрой, либо медленной волны (рис. 2, *b*). Для медленной волны этот диапазон больше, чем для быстрой и увеличивается по мере приближения отношения D_2/D_1 (либо M_{0_2}/M_{0_1}) к 1. В этом случае, если полосы пропускания быстрой и медленной волн в структуре, состоящей из пленок различной намагниченности, могут не совпадать (см. рис. 2), то возможна следующая ситуация: если значение d соответствует области модуляционной неустойчивости при возбуждении медленной волны, то распространение быстрой волны

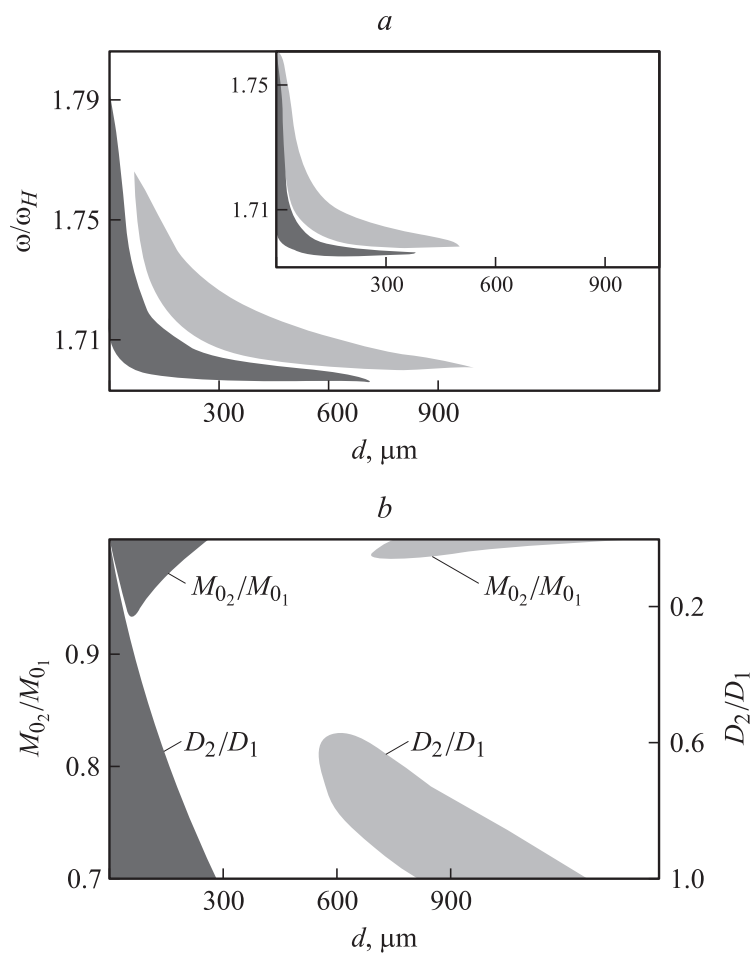


Рис. 2. Плоскости параметров, демонстрирующие области модуляционной неустойчивости при возбуждении быстрой (светлые области) и медленной (темные области) волн в системе при $H_0 = 2630$ Ое: *a* — $D_1 = D_2 = 20 \mu\text{m}$ (вставка $D_1 = D_2 = 5 \mu\text{m}$), $M_{01} = M_{02} = 140$ Гс; *b* — $D_1 \neq D_2$ ($D_1 = 20 \mu\text{m}$, $M_{01} = M_{02} = 140$ Гс); $M_{01} \neq M_{02}$ ($M_{01} = 140$ Гс, $D_1 = D_2 = 20 \mu\text{m}$), $\omega/\omega_H = 1.77$ ($\omega_H = \gamma H_0$, γ — гиромагнитная постоянная).

возможно только в случае, если частота возбуждения лежит выше нижней границы полосы пропускания ПМСВ для пленки с большей намагниченностью и быстрая волна при этом является устойчивой.

Таким образом, в работе показано, что при распространении ПМСВ в связанной структуре существует область параметров, при которых возможна модуляционная неустойчивость этого типа волн.

Работа выполнена в рамках программы Федерального агентства по образованию РФ „Развитие научного потенциала высшей школы“ (грант № 372–05 и № 133), Федерального агентства по образованию РФ и CRDF (BRHE, REC–006), а также при поддержке РФФИ (гранты № 04–02–16296, № 05–02–16273).

Список литературы

- [1] *Лукомский В.П.* // Укр. физ. журн. 1978. Т. 23. № 1. С. 134.
- [2] *Звездин А.К., Попов А.Ф.* // ЖЭТФ. 1983. Т. 84. В. 2. С. 606–615.
- [3] *Boardman A.D., Wang Q., Nikitov S.A.* // IEEE Trans. in Mag. 1994. V. 30. N 1. P. 14.
- [4] *Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: СГУ, 1993. 320 с.
- [5] *Киндяк А.С.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 6. С. 119.
- [6] *Киндяк А.С.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 4. С. 48–54.
- [7] *Короткевич А.О., Никитов С.А.* // ЖЭТФ. 1999. Т. 116. В. 6 (12). С. 205.
- [8] *Кокин А.В., Никитов С.А.* // ФТТ. 2001. Т. 43. В. 5. С. 851.
- [9] *Малюгина М.А., Шараевский Ю.П.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2000. Т. 8. № 3. С. 59–69.
- [10] *Дудко Г.М., Малюгина М.А., Шараевский Ю.П.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2003. Т. 8. № 6.
- [11] *Bordman A.D., Xie K.* // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. N 25. P. 4591.
- [12] *Marcelli R., Nikitov S.A.* // Europhys. Lett. 2001. V. 54. N 1. P. 91–97.
- [13] *Agrawal G.P.* // Phys. Rev. A. 1989. V. 39. N 7. P. 3406–3413.