

01;05;09;11

О солитонах поверхностной магнитостатической спиновой волны в структуре феррит–диэлектрик–металл

© А.С. Киндяк

Минский научно-исследовательский институт радиоматериалов, Минск

Поступило в Редакцию 30 апреля 1998 г.

На основе анализа нелинейного уравнения Шредингера проведено теоретическое исследование нелинейных поверхностных магнитостатических спиновых волн в планарной структуре феррит–диэлектрик–металл. Показано, что при определенных значениях расстояния от металлического экрана до ферромагнитной пленки импульсы поверхностных магнитостатических спиновых волн могут распространяться в виде солитонов огибающей.

Пленки железиттриевого граната (ЖИГ) во внешнем магнитном поле являются наиболее подходящей средой для исследования нелинейных свойств поверхностных магнитостатических спиновых волн (ПМСВ). В последние годы проведен ряд экспериментов, непосредственно направленных на наблюдение солитонов магнитостатических спиновых волн (МСВ) [1–5]. В этих работах подтверждены результаты первых теоретических исследований о неустойчивости МСВ в тонких ферромагнитных пленках и, как следствие, о возможном распространении импульсов МСВ в виде солитонов огибающей. Основы теории прохождения МСВ в виде солитонов были заложены в работе [6]. Метод анализа нелинейных МСВ, примененный в [6] и известный в литературе как метод "огибающих" [7], был в дальнейшем развит и детально исследован для ПМСВ в работах [8–12]. Один из результатов, полученный в [7] и подтвержденный затем в более поздних работах экспериментально и теоретически, был вывод об устойчивости поверхностной магнитостатической спиновой волны относительно продольных возмущений, т. е. о невозможности существования солитонов огибающей ПМСВ.

Теоретические исследования неустойчивости ПМСВ основываются на анализе решений нелинейного уравнения Шредингера, коэффициенты

в котором определяются на основе уравнений дисперсии МСВ [5–12]:

$$i \left[\frac{dA}{dt} + v_g \frac{dA}{dy} \right] + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{d^2 A}{dy^2} - \gamma |A|^2 A = 0. \quad (1)$$

В (1) групповая скорость МСВ $v_g = d\omega/dk$, дисперсия групповой скорости $\beta_2 = d^2\omega/dk^2$, а нелинейный коэффициент $\gamma = (d\omega/d|A|^2)|_{|A|=0}$, где A — безразмерная амплитуда импульса МСВ, а ω и k — его частота и волновой вектор соответственно. Следует отметить, что v_g и β_2 определяются на основе линейного, а нелинейный коэффициент находится на основе нелинейного дисперсионного уравнения МСВ. Условие появления неустойчивости МСВ, известное как условие Лайтхила [7], имеет вид

$$\beta_2 \gamma < 0. \quad (2)$$

Из (1) и (2) видно, что появление неустойчивости МСВ определяется ее законом дисперсии. Следовательно, меняя закон дисперсии МСВ, можно изменить условия возникновения неустойчивости МСВ относительно продольных возмущений и в результате получить возможность управления областью существования солитонов МСВ.

Известно [13,14], что наличие металлических экранов на некотором расстоянии от ферромагнитной пленки существенным образом меняет закон дисперсии ПМСВ. Поэтому представляется актуальным как с научной, так и с практической точки зрения исследовать влияние металлического экрана на условия возникновения продольной неустойчивости и образования солитонов ПМСВ, распространяющейся в планарной структуре феррит–диэлектрик–металл (ФДМ).

Рассмотрим ПМСВ, распространяющуюся в планарной структуре, состоящей из пленки ЖИГ толщиной d , диэлектрика толщиной t и металлического экрана. Поверхностная магнитостатическая волна распространяется вдоль оси Y , внешнее магнитное поле лежит в плоскости структуры и направлено вдоль оси Z . Тогда дисперсионное уравнение ПМСВ имеет вид [15]:

$$e^{-2kd} = \frac{(\mu - \mu_a + 1)[\mu + \mu_a + \text{th}(kt)]}{(\mu + \mu_a - 1)[\mu - \mu_a - \text{th}(kt)]}. \quad (3)$$

Здесь μ и μ_a — диагональный и недиагональный элементы тензора магнитной проницаемости ферромагнетика, k и ω — волновой вектор и несущая частота ПМСВ.

Перепишывая уравнение (3) в виде

$$\omega^2 - \omega_h^2 - \omega_h \omega_m - \frac{\omega_m^2}{4}(1 - \beta) = \alpha(1 - \beta) \left[(\omega + \omega_h) \frac{\omega_m}{2} + \frac{\omega_m^2}{4} \right], \quad (4)$$

получим

$$\omega = \frac{\omega_m}{4} \alpha(1 - \beta) + \frac{1}{4} \{ [2(\omega_m + 2\omega_h) + \omega_m \alpha(1 - \beta)]^2 - 4\omega_m^2 \beta \}^{1/2}. \quad (5)$$

В (5) $\omega_m = 4\pi\gamma M_0$, $\omega_h = \gamma H$, $\alpha = \exp(-2kd)$, $\beta = \exp(-2kt)$, $4\pi M_0$ — намагниченность насыщения ферромагнетика, γ — гиромагнитное отношение. Из (5) нетрудно получить выражение для групповой скорости ПМСВ:

$$v_g = - \frac{\omega_m}{2} [t - (t+d)\beta] \alpha - \frac{\omega_m}{2} \{ [t - (t+d)\beta] \alpha S - 2\omega_m d \beta \} / \{ S^2 - 4\omega_m^2 \beta \}^{1/2}, \quad (6)$$

где

$$S = 2(\omega_m + 2\omega_h) + \omega_m \alpha(1 - \beta). \quad (7)$$

Тогда дисперсия групповой скорости имеет вид

$$\begin{aligned} \beta_2 = & \omega_m [t^2 - (t+d)^2 \beta] \alpha + \omega_m (S^2 - 4\omega_m^2 \beta)^{-3/2} \\ & \times \left\{ (S^2 - 4\omega_m^2 \beta) [S [t^2 - (t+d)^2 \beta] \alpha + \omega_m [t - (t+d)\beta]^2 \alpha^2 - 4\omega_m d^2 \beta] - \omega_m Q^2 \right\}, \quad (8) \end{aligned}$$

где

$$Q = S [t - (t+d)\beta] \alpha - 2\omega_m d \beta.$$

Поскольку нелинейность предполагается слабой, то отклонения намагниченности от равновесного состояния будут малы и z -компоненту намагниченности можно представить в виде

$$m_z = M_0 \left[1 - (|m_x|^2 + |m_y|^2) / 2M_0^2 \right]. \quad (9)$$

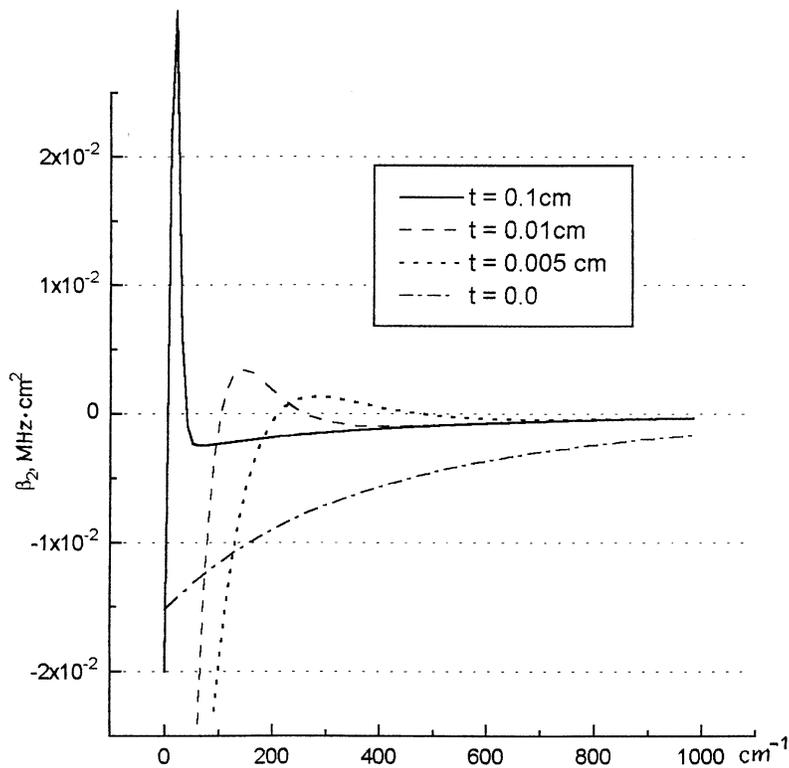


Рис. 1. Дисперсия групповой скорости ПМСВ в зависимости от волнового вектора при различном расстоянии от металлического экрана до ферромагнитной пленки.

Тогда в пределе $kd \ll 1$, $m_z \approx M_0 - M_0|A|^2$ и $\omega_m \approx \omega_m(1 - |A|^2)$ [6–12]. Подставляя значение ω_m в (5) и вычисляя производную по $|A|^2$, получим:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{d|A|^2} \Big|_{A=0} &= -\frac{\omega_m}{4}\alpha(1-\beta) - \left\{ \omega_m\omega_h[2 + \alpha(1-\beta)] \right. \\ &+ \frac{\omega_m^2}{4}[(2+\alpha)^2 - \beta\alpha^2](1-\beta) \Big\} / 2 \left\{ \frac{\omega_m^2}{4}[(2+\alpha)^2 - \beta\alpha^2](1-\beta) \right. \\ &+ \left. 2\omega_m\omega_h[2 + \alpha(1-\beta)] \right\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (10)$$

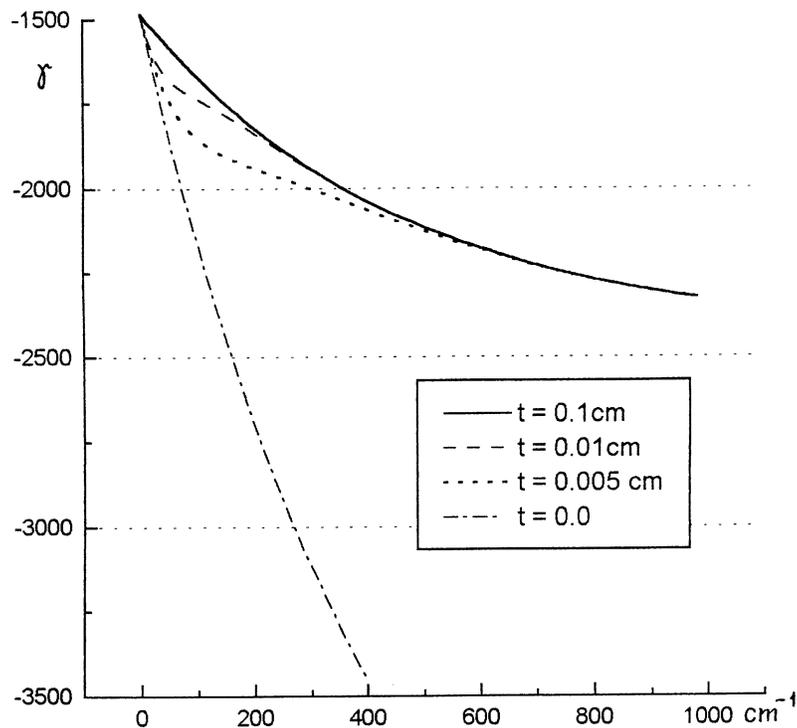


Рис. 2. Коэффициент нелинейности ПМСВ в зависимости от волнового вектора для различных расстояний от металлического экрана до ферромагнитной пленки.

Необходимым условием образования солитонов из импульса ПМСВ является выполнение неравенства (2). Анализ этого условия проводился для значений ω и k , являющихся решением уравнения (5) при различных значениях расстояния t от металлического экрана до ферромагнетика. Табуляция формул (6), (8) и (10) выполнена при $4\pi M_0 = 1750$ Н, $H = 1000$ Ое, $d = 0.001$ см, $k \in [1, 1000]$ см $^{-1}$.

На рис. 1 представлены расчетные зависимости дисперсии групповой скорости от волнового вектора. Видно, что на кривых имеется область положительных значений, которая появляется при $t < 0.1$ см. С уменьшением расстояния t от металлического экрана до ферромагнит-

ной пленки эта область смещается в коротковолновую часть спектра и для металлизированной ферромагнитной пленки исчезает. Положение области положительных значений β_2 соответствует положению области аномального поведения дисперсионной зависимости $\omega(k)$.

Как видно из рис. 2, нелинейный коэффициент для любых значений t меньше нуля. Поэтому критерий Лайтхила (2) выполняется только для тех частот, для которых дисперсия групповой скорости положительна.

Таким образом, в данной работе впервые теоретически показана принципиальная возможность существования продольной неустойчивости и образования солитонов огибающей ПМСВ в планарной структуре ферромагнетик–диэлектрик–металл. Установлено, что изменением положения металлического экрана относительно ферромагнитной пленки можно эффективно управлять частотной областью образования солитона ПМСВ и его параметрами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, грант № Ф96–142.

Список литературы

- [1] Kalinikos B.A., Kovshikov N.G., Slavin A.N. // JETP Lett. 1983. V. 38. P. 413.
- [2] Gasperis P.De, Marcelli R., Miccoli G. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. P. 481.
- [3] Kalinikos B.A., Kovshikov N.G., Slavin A.N. // Sov. Phys. JETP. 1988. V. 67. P. 303.
- [4] Chen M., Tsankov M.A., Nash J.M., Patton C.E. // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. P. 12 773.
- [5] Boyle J.N., Nikitov S.A., Boardman A.D. et al. // Phys. Rev. B. 1996. V. 53. N 18. P. 12 173.
- [6] Звездин А.К., Попков А.Ф. // ЖЭТФ. 1983. Т. 84. С. 606.
- [7] Карпман В.И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. М.: Наука, 1973. 175 с.
- [8] Boardman A.D., Nikitov S.A. // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. P. 11 444.
- [9] Боардман А.Д., Гуляев Ю.Г., Никитов С.А. // ЖЭТФ. 1989. С. 2140.
- [10] Boardman A.D., Nikitov S.A., Waby N.A. // Phys. Rev. B. 1993. V. 48. P. 13 602.
- [11] Boardman A.D., Wang Q., Nikitov S.A. et al. // IEEE Trans. Magn. 1994. V. 30. N 1. P. 14.
- [12] Boardman A.D., Nikitov S.A., Xie K., Mehta H. // J. Magn. And Magn Mater. 1995. V. 145. P. 357.

- [13] *Стальмахов Д.С., Игнатьев А.А.* Лекции по спиновым волнам. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1983.
- [14] *Kindyk A.S., Kolosov V.A., Makutina L.N.* // J. Materials Science: Materials in Electronics. 1995. V. 6. P. 25.
- [15] *Vajpai S.N., Carter R.L., Owens J.M.* // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 1988. V. 36. N 1. P. 132.