

## НАБЛЮДЕНИЕ СПИН-ВОЛНОВЫХ СОЛИТОНОВ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ

*Б.А.Калиникос, Н.Г.Ковшиков, А.Н.Славин*

При исследовании импульсного распространения сверхвысокочастотных (СВЧ) спиновых волн в ферромагнитных пленках (ФП) впервые обнаружено явление самоиндуцированной прозрачности спин-системы. Экспериментально регистрируемые факты и приводимые теоретические представления свидетельствуют о солитонной природе наблюдаемого явления.

Исследования проводились при комнатной температуре на перпендикулярно намагниченных до насыщения тонких монокристаллических пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) с малыми магнитными потерями (параметр диссипации  $\Delta H_k = 0,2 - 0,3 \text{ Э}$ ), выращенных на подложках из гадолиний-галлиевого граната ориентации  $[111]$ . Возбуждение и прием спиновых волн (СВ) осуществлялись с помощью обычной конструкции<sup>1</sup>, включавшей короткозамкнутые возбуждающую и приемную микрополосковые антенны шириной по  $30 \mu\text{м}$  и длиной по  $4 \text{ мм}$ , фотолитографически сформированные на керамической подложке. Расстояние между антеннами составляло  $4 \text{ мм}$ .

Для выполнения опытов были выбраны образцы, экспериментально проявляющие себя как ФП с закрепленными поверхностными спинами. Закрепление поверхностных спинов приводит к диполь-дипольному "расталкиванию" дисперсионных ветвей, отвечающих волнам одинакового типа симметрии<sup>2</sup>. Дипольное "расталкивание" совместно с обменным расщеплением (для тонких ФП) делают спектр СВ существенно дискретным<sup>1)</sup> (см. рис. 1, а). На частотах вблизи дипольных "щелей" имеет место сильная дисперсия групповой скорости СВ.

<sup>1)</sup> В случае свободных поверхностных спинов дипольные "щели" в спектре настолько малы, что они "замазываются" процессами релаксации.

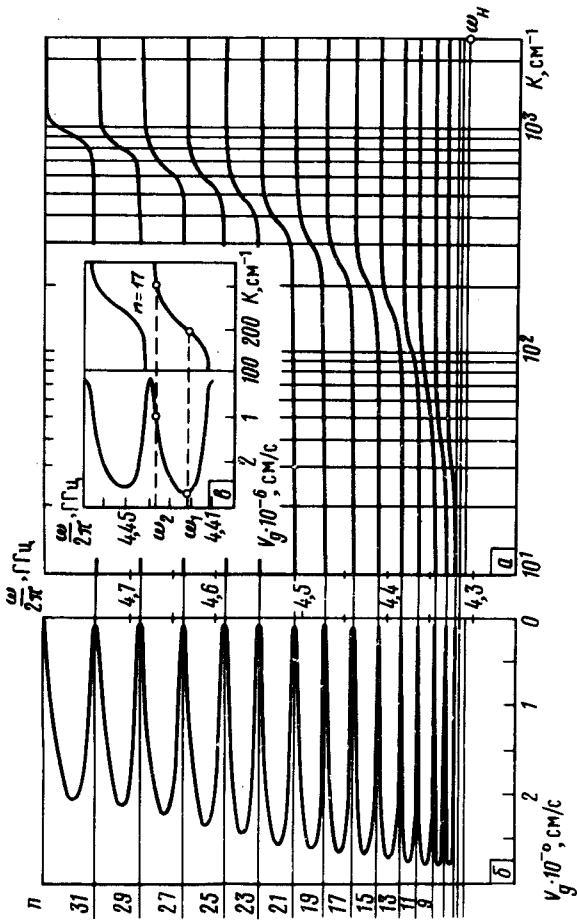


Рис. 1. Спектр (а, в) СВ, групповая скорость СВ (б, в) и амплитудно-частотная характеристика (г) исследуемой ФП, полученная в линейном режиме

На рис. 1, *a* приведен спектр СВ симметричных типов, рассчитанный для пленки ЖИГ толщины  $L = 5,8$  мкм (при  $\alpha = 3,1 \cdot 10^{-12}$  см $^{-2}$ ,  $\omega_M = 4,9$  ГГц,  $\omega_H = 4,312$  ГГц) по дисперсионному уравнению<sup>2</sup>:

$$(\omega^2 - \omega_n^2)(\omega^2 - \omega_\beta^2) = (\omega_H + \omega_M \alpha k_n^2)(\omega_H + \omega_M \alpha k_\beta^2) P_{n\beta}^2. \quad (1)$$

Все обозначения приведены в<sup>2</sup>. В длинноволновом  $kL < 1$  приближении матричный элемент  $P_{n\beta} = 2kL(2 - kL)/\pi^2 n^2 \beta^2$ . На рис. 1, *b* построены частотные зависимости групповых скоростей  $V_g = \partial\omega/\partial k$ , рассчитанные по (1) для наиболее быстрых на заданных частотных интервалах спиновых волн. На вставке рис. 1, *в* в увеличенном масштабе показаны кривые  $\omega(k)$  и  $V_g(\omega)$  в окрестности "щели"  $\beta = 1$ ,  $n = 17$ .

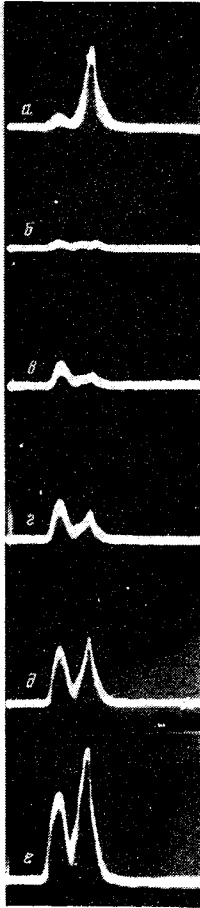


Рис.2

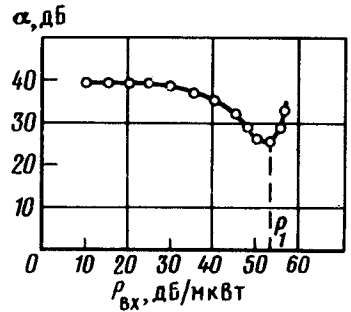


Рис.3.

Рис. 2. Осциллограммы огибающих импульсного сигнала, прошедшего ФП при различных значениях несущей частоты (*a*, *б*) и входной мощности (*в*, *г*, *д*, *е*). (Осциллограммы получены на частотах, расположенных в окрестности "щели"  $\beta = 1$ ,  $n = 17$ )

Рис. 3. Зависимость затухания импульсного сигнала при распространении в ФП от входной мощности

Эксперименты по импульсному линейному распространению СВ выполнялись следующим образом. На входную антенну подавались импульсы длительностью  $\tau = 100$  нс с частотой повторения  $10^4$  Гц при мощности, заведомо обеспечивающей линейный режим распространения СВ. Несущая частота выбиралась в одном из интервалов между "щелями" (например, равной  $\omega_1$  рис. 1, *в*), т. е. в области сравнительно слабой дисперсии. Тогда на выходной антенне регистрировался задержанный импульс (рис. 2, *a*) (первый импульс на осциллограммах рис. 2 соответствует входному сигналу). Затем несущая частота постепенно повышалась при неизменном низком уровне мощности входного импульса  $P_{вх}$ . Это приводило к дисперсионному расплыванию задержанного импульса и к изменению его формы так, что на частоте  $\omega_2$  вблизи "щели" (рис. 1, *в*) этот импульс становился двугорбым с двумя максимумами, соответствующими большему и меньшему временам задержки, а амплитуда его уменьшалась

(рис. 2, б). Последующее увеличение  $P_{вх}$  при неизменной несущей частоте  $\omega_2$  приводило к тому, что из второго максимума задержанного импульса (соответствующего большему времени задержки) образовывался солитон. Рис. 2, в, г, д, е иллюстрируют изменение формы солитона по мере увеличения входной мощности. На рис. 3 приведена зависимость затухания импульсного СВЧ сигнала прошедшего через ФП от его мощности. Видно, что начиная с некоторого значения  $P_{вх}$  образуется солитон (см. рис. 2, в), т. е. возникает самоиндуцированная прозрачность спин-системы, причем при  $P_{вх} = P_1$  "просветление" становится максимальным (рис. 3), а амплитуда солитона наибольшей (рис. 2, е). При дальнейшем увеличении  $P_{вх}$  солитон дробится и амплитуда его уменьшается.

Образование солитонов было зафиксировано на ФП толщиной от 4 до 7 мкм, причем, оно всегда имело место на частотах, лежащих в непосредственной близости, но на 1 — 3 МГц ниже одной из дипольных "щелей", там, где  $V_g$  убывает с ростом частоты. В частотных интервалах между "щелями" образование солитонов не наблюдалось вплоть до значений входной мощности в 1 Вт.

Качественное объяснение наблюдаемого эффекта может быть дано в рамках теории нелинейных волн <sup>3</sup>.

Для дипольно-обменных СВ, описываемых дисперсионным уравнением (1) известным методом <sup>3</sup> получаем нелинейное параболическое уравнение, описывающее эволюцию огибающей комплексной амплитуды переменной намагниченности  $\varphi(x, t)$  СВ:

$$i \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} + V_g \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial k^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - \frac{\partial \omega}{\partial |\varphi|^2} |\varphi|^2 \varphi = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) имеет солитонные решения, если  $(\partial \omega / \partial |\varphi|^2 \partial^2 \omega / \partial k^2) < 0$ . Вводя в закон дисперсии (1) зависимость от  $|\varphi|^2$  аналогично <sup>4, 5</sup> и вычисляя производные, нетрудно убедиться, что приведенное выше неравенство выполняется в частотных областях ниже "щелей",

где  $\frac{\partial^2 \omega}{\partial k^2} = V_g \frac{\partial V_g}{\partial \omega} < 0$ . Таким образом, предсказания теории совпадают с экспериментом в областях сильной дисперсии СВ ниже дипольных "щелей" в спектре.

Теория <sup>5</sup>, построенная в безобменном приближении, предсказывает образование солитонов слабодисперсионных СВ. В описываемых экспериментах такие солитоны могли бы наблюдаться между "щелями", где дисперсия СВ сравнительно невелика. Однако на этих участках спектра зарегистрировать солитоны нам не удалось. По-видимому, это связано с существенным различием реального дипольно-обменного и безобменного законов дисперсии, которое имеет место на частотах, лежащих не только вблизи "щелей", но и между ними, если "щели" расположены достаточно близко друг к другу.

Описанное поведение солитонов имеет много общего с поведением магнитоакустических солитонов в КМпF<sub>3</sub> <sup>6</sup>, которые также наблюдались в области сильной дисперсии там, где  $\partial V_g / \partial \omega < 0$ .

Явление образования солитонов наблюдалось нами и в касательно намагниченных пленках ЖИГ при возбуждении квазиповерхностных СВ. Оно также имело место в частотных областях вблизи дипольных "щелей" в спектре, но выше "щелей", а солитон, в отличие от случая перпендикулярно намагниченной ФП, образовывался не из второго максимума задержанного импульса (см. рис. 2, б, в), а из первого, соответствующего меньшему времени задержки.

#### Литература

1. Ganguly A.K., Webb D.C. IEEE Trans. MTT, 1975, MTT-23, 998.
2. Калинин Б.А. Известия высш. уч. зав., серия Физика, 1981, 24, 42.
3. Карпман В.И. Нелинейные волны в диспергирующих средах, 1973, М.: Наука.
4. Лукомский В.П. Украинский физический журнал, 1978, 23, 134.

5. Звездин А.К., Попков А.Ф. ЖЭТФ, 1983, 84, 606.

6. Богданова Х.Г., Голенищев-Кутузов В.А., Монахов А.А., Кузько А.В. Лукомский В.П., Човнюк Ю.В.

Письма в ЖЭТФ, 1980, 32, 476.

Электротехнический институт  
им. В.И.Ульянова (Ленина)

Поступила в редакцию  
7 августа 1983 г.

---