

© 1991

## НОВЫЙ ТИП НЕОДНОРОДНОГО СПИН-СПИНОВОГО РЕЗОНАНСА, ИНДУЦИРОВАННОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ МАГНИТНОЙ ПЛЕНКИ

*С. В. Тарасенко*

На примере двухслойной структуры антиферромагнетик-диэлектрик изучены необходимые условия, при выполнении которых совместный учет магнитоупругого и неоднородного обменного взаимодействий приводят к новому типу резонансного поглощения бегущих объемных спиновых волн. В случае свободной магнитной пластины найденный тип магнитного резонанса не реализуется.

Как известно [1, 2], наличие в ограниченном магнетике магнитодипольного и неоднородного обменного взаимодействий может при определенных условиях приводить к резонансному взаимодействию бегущих поверхностной (объемной) магнитостатической и объемной обменной спиновых волн (неоднородный спин-спиновый резонанс (НССР)). Что же касается влияния решетки на спиновую динамику реального магнетика, то до сих пор учет магнитоупругого взаимодействия (вне области магнитоакустического резонанса) сводился к формированию магнитоупругой щели в спектре спиновых волн с  $|\mathbf{k}| \rightarrow 0$  ( $\mathbf{k}$  — волновой вектор) [3]. Вместе с тем в работе [4] было показано, что если частота  $\omega$  и волновой вектор  $\mathbf{k}$  магнитных колебаний удовлетворяют эластостатическому критерию [5] <sup>1</sup>

$$\omega^2 \ll s^2 \mathbf{k}^2, \quad (1)$$

где  $s$  — скорость звука в неограниченной среде, то в магнетике конечных размеров формируется новый тип безобменных спиновых колебаний: эластостатические спиновые волны (ЭСВ). Механизм их дисперсии подобен механизму дисперсии бегущих магнитостатических волн (МСВ), однако в ЭСВ магнитные моменты в условиях (1) взаимодействуют через дальнедействующее поле квазистатических упругих деформаций. Следуя указанной выше аналогии между МСВ и ЭСВ, можно на основании результатов работы [2] ожидать, что в эластостатическом пределе (1) одновременный учет магнитоупругого и неоднородного обменного взаимодействий может приводить к резонансному взаимодействию бегущих безобменной поверхностной ЭСВ и объемной обменной спиновой волны. Однако до сих пор этот вопрос не изучался.

В связи со сказанным целью данной работы является нахождение необходимых условий, при которых совместный учет магнитоупругого и неоднородного обменного взаимодействий в эластостатическом пределе (1) дает в ограниченном магнетике новый тип неоднородного спин-спинового резонанса (НССР): резонансное взаимодействие бегущих поверхностной безобменной эластостатической и объемной обменной спиновых волн. В качестве примера рассмотрим пленку толщиной  $d$  легкоосного (ось  $OZ$ ) двухподрешеточного ( $M_1, M_2$  — намагниченности подрешеток) анти-

<sup>1</sup> Влияние конечности скорости распространения упругих колебаний на рассмотренные ниже эффекты будет проведено отдельно.

ферромагнетика (АФМ) [6], поскольку в АФМ одновременно имеют место обменное усиление магнитоупругих и обменное ослабление магнитодипольных эффектов [3]. Будем считать, что нормаль к поверхности АФМ пленки  $\mathbf{n} \parallel \mathbf{OX}$ , а сама пленка (среда 1) имеет акустический контакт с диэлектрическим слоем (среда 2) толщиной  $t$ . Для удобства расчетов магнитоупругие и упругие свойства сред 1 и 2 полагаем изотропными, но различными для АФМ пленки и ее диэлектрического покрытия. Если спины на границах АФМ пленки закреплены, а внешние поверхности данной двухслойной структуры свободны от направлений, то, решая стандартным методом (см., например, [7]) соответствующую граничную задачу, можно показать, что спектр спиновых волн, бегущих в плоскости  $XU$  ( $\mathbf{k} \in XU$ ,  $k_x=0$ ,  $\mathbf{n} \parallel \mathbf{OX}$ ) структуры АФМ пленка—диэлектрический слой, с учетом магнитоупругого и неоднородного обменного взаимодействий в условиях (1) описывается уравнением вида  $AB=0$ , где

$$A = \operatorname{tg} \chi_1 d, \quad \chi_1^2 = \frac{\omega^2 - \omega_{me}^2 - \omega_\Delta^2 - c^2 k_y^2}{c^2}, \quad (2)$$

$$B = \chi_2 \operatorname{tg} \chi_2 d \{ \mu \operatorname{th} k_y d + \operatorname{th} k_y t \} - \frac{\omega_{me}^2}{\omega_{me}^2 + \omega_\Delta^2 - \omega^2} k_y \operatorname{th} k_y t \operatorname{th} k_y d, \quad (3)$$

$$\chi_2^2 = \frac{\omega^2 - \omega_\Delta^2 - c^2 k_y^2}{c^2}, \quad \mu \equiv \frac{\mu_1 \chi_2^2}{\mu_2 \chi_1^2} \Big|_{k_y=0}. \quad (4)$$

Здесь  $\mu_1$  ( $\mu_2$ ) — модуль сдвига в среде 1 (2);  $\omega_{me}^2$  — магнитоупругая щель в спектре АФМР;  $\omega_\Delta^2$  — активация спектра спиновых волн, обусловленная легкоосной магнитной анизотропией;  $c$  — минимальная фазовая скорость спиновых волн в легкоосном АФМ [6]. Отщепляющийся корень в (2)–(4) ( $A=0$ ) соответствует объемной  $\chi_1^2 \geq 0$  спиновой волне с  $\mathbf{k} \in XU$  и поляризацией  $\tilde{e}_y \neq 0$ , не взаимодействующей с упругими колебаниями, поляризованными вдоль  $OZ$  ( $\tilde{u}_z \neq 0$ ) при  $\mathbf{n} \parallel \mathbf{OX}$ .<sup>2</sup> Что же касается уравнения  $B=0$  (2), то, как показывает анализ, оно определяет закон дисперсии бегущих в плоскости  $XU$  спиновых колебаний с  $\tilde{e}_x \neq 0$ , сопровождаемых полем квазистатических упругих деформаций с  $\tilde{u}_x \neq 0$ .

В пределе  $k_y d \ll 1$  из (2)–(4) следует, что

$$\cos \frac{\chi_2 d}{2} = 0, \quad \sin \frac{\chi_2 d}{2} = 0, \quad (5)$$

$$\omega_m^2 \simeq \omega_\Delta^2 + \omega_{me}^2 \frac{\operatorname{th}(k_y t) \operatorname{cth}(k_y d)}{\operatorname{th}(k_y t) \operatorname{cth}(k_y d) + \mu_1/\mu_2}. \quad (6)$$

Таким образом, (5) дает спектр симметричных ( $p=2, 4, 6, \dots$ ) и антисимметричных ( $p=1, 3, 5, \dots$ ) объемных ( $\chi_2^2 > 0$ ) обменных спиновых волн

$$\Omega_{2mp}^2 \simeq \omega_\Delta^2 + c^2 (\pi p/d)^2, \quad (7)$$

а (6) определяет спектр безобменной поверхностной ЭСВ с шириной спектра, определяемой не только величиной  $\omega_{me}^2$ , но и относительной толщиной диэлектрического слоя  $t/d$ . Поскольку при толщине АФМ пленки  $d$ , удовлетворяющей условию

$$(1 + \mu_2/\mu_1)^{-1} < c^2 \pi^2 d^{-2} / \omega_{me}^2 < (1 + \mu_2 d / \mu_1 t)^{-1}, \quad (8)$$

области существования указанных типов магнитных колебаний совпадают, то, следовательно, в случае  $\omega_m = \Omega_{2mp}$  реализуется новый тип НССР с участием бегущих объемной обменной и поверхностной эластостатической спиновых волн.

<sup>2</sup>  $\tilde{e}_i$ ,  $u_i$  определяют малые смещения вблизи равновесного положения вектора антиферромагнетизма  $\mathbf{e} \sim \mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2$  и смещений решетки  $\mathbf{u}$  соответственно.

Взаимодействие указанных мод, как следует из (2)–(4), приводит к столкновению дисперсионных ветвей и образованию в области НССР связанных обменно-эластостатических спиновых волн. Анализ условий возбуждения рассмотренных типов магнитных колебаний ( $\tilde{\epsilon}_x \neq 0, \tilde{u}_z \neq 0$ ) показывает, что в данной геометрии ( $\mathbf{n} \parallel \text{OX}, \mathbf{k} \in \text{XY}$ ) наличие НССР в результате взаимодействия объемной обменной и поверхностной эластостатической спиновых волн приводит к появлению дополнительной серии максимумов в спектре поглощения СВЧ поля  $\mathbf{h}$  с поляризацией  $h = h_y$ . Отметим принципиальную важность акустического контакта АФМ пленки с диэлектрической подложкой ( $t \neq 0$ ), поскольку, как следует из (5), в предельном случае свободной АФМ пленки ( $\mu_2 = 0$  или  $t = 0$ ) рассмотренный выше тип безобменных поверхностных ЭСВ (а следовательно, и НССР с их участием) не реализуется.

Автор выражает глубокую признательность Е. П. Стефановскому за плодотворные обсуждения.

#### Список литературы

- [1] Ганн В. В. // ФТТ. 1966. Т. 8. № 11. С. 3167–3172.
- [2] Wolfram T., de Wames R. E. // Sol. Stat. Comm. 1970. V. 8. N 3. P. 191–194.
- [3] Туров Е. А., Шавров В. Г. // УФН. 1983. Т. 140. № 3. С. 429–462.
- [4] Сукстанский А. Л., Тарасенко С. В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 4. С. 28–32.
- [5] Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979. 639 с.
- [6] Иванов Б. А., Лапченко В. Ф., Сукстанский А. Л. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 1. С. 173–180.
- [7] Филищов Б. Н. // Препринт ИФМ 80/1. Свердловск, 1980. 62 с.

Донецкий  
физико-технический институт  
АН УССР

Поступило в Редакцию  
8 января 1991 г.