

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЩЕЛИ В СПЕКТРЕ СПИНОВЫХ ВОЛН В МУЛЬТИСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ Co/Pd

Р.С.Исхаков, И.В.Гавришин, Л.А.Чеканова

Институт физики Сибирского отделения РАН¹⁾

660036 Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 6 мая 1996 г.

Методом спин-волнового резонанса на мультислойных пленках Co/Pd обнаружена энергетическая щель в спектре спиновых волн, обусловленная брэгговским рассеянием на периоде модуляции одномерной сверхрешетки $q = 2\pi/(d_1 + d_2)$. Показана асимметрия этой щели: "положительное" отклонение в 2–3 раза превышает "отрицательное".

PACS: 73.90.+f, 75.30.Ds

Наша работа посвящена исследованию такой особенности спиновых волн в мультислойных пленках, как энергетическая щель в спектре. Актуальность этой задачи определяется следующими причинами. Известно, что спектр волн в периодической мультислойной среде (одномерная сверхрешетка) имеет зонную структуру. Возникают запрещенные зоны (или щели), обусловленные брэгговским рассеянием волн, первая из которых расположена при волновом векторе $k_b = q/2$, где $q = 2\pi/(d_1 + d_2)$ – волновой вектор модуляции сверхрешетки, $(d_1 + d_2)$ – период сверхрешетки, а d_1, d_2 – толщины индивидуальных слоев. Эта проблема была изучена во многих теоретических работах (для магнитных возбуждений смотри, например, [1–7]). Теоретически рассчитанный спектр спиновых волн для ферромагнитных мультислойных сред с одномерной модуляцией анизотропии β , намагниченности m или обмена α в области $k \sim k_b$ аналогичен приведенному на рис.1а, где величина щели Δ пропорциональна величинам $\Delta\beta$, Δm , $\Delta\alpha$, соответственно. Существует также ряд экспериментальных работ, выполненных методом СВР (спин-волнового резонанса) [8–15] и бриллюэнманделъштамовского рассеяния [16,17], в которых исследовались спиновые волны в мультислойных пленках. Однако эти исследования были выполнены в области волновых векторов меньших k_b и проблематика этих работ существенно отлична от проблематики большинства теоретических исследований. В экспериментальных работах либо измеряется эффективная константа обменного взаимодействия в таком сложном композиционном материале, как мультислойные пленки типа FM/FM [8–13], либо целью исследования является определение межслойного обменного взаимодействия в мультислойных пленках типа FM/NM [14–17] (NM – немагнитный металл). Известно, что методом СВР спектр стоячих спиновых волн регистрируется в волновом диапазоне $\sim 10^5 - 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$. Поэтому задача данного исследования – изготовление мультислойных пленок с величинами k_b , лежащими на середине измеряемого диапазона и экспериментальное обнаружение проявлений брэгговского рассеяния, такого как характерная особенность зависимости обменной жесткости $\eta(k)$ в области $k - k_b$ (рис.1б).

¹⁾e-mail: rauf@iph.krasnoyarsk.su.

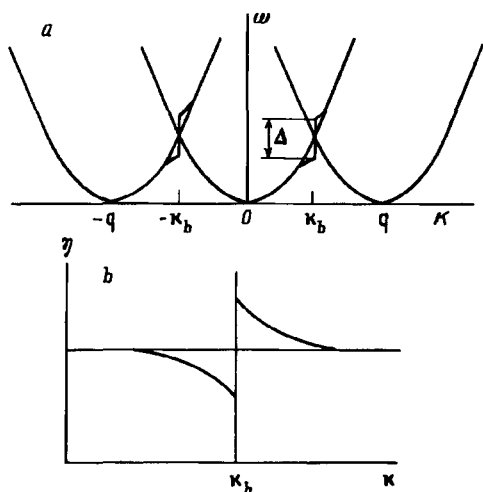


Рис.1. Теоретически рассчитанный спектр спиновых волн в ферромагнитной мультислойной пленке в координатах $\omega(\mathbf{k})$ (а) и соответствующая им обменная жесткость $\eta(\mathbf{k})$ (б)

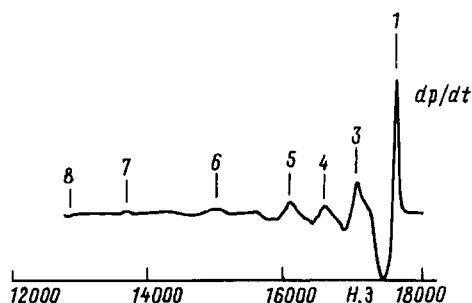


Рис.2. Спектр СВР мультислойной пленки ($\text{Co}_{400}/\text{Pd}_{10}$)₅

Мультислойные пленки Co/Pd были получены методом химического осаждения на стеклянную подложку из водного раствора. Толщина слоев $d_1(\text{Co})$ варьировалась от 100 до 400 Å, слоев $d_2(\text{Pd})$ от 5 до 40 Å, количество пар слоев изменялось от 4 до 22, общая толщина при этом не превышала 3000 Å. Период модуляции ($d_1 + d_2$) оценивался по скорости осаждения индивидуальных слоев, которая определялась весовым методом с точностью $\sim 10\%$ (ранее в работе [9] достоверность результатов весового метода была проверена на нескольких образцах путем прямого измерения периода ($d_1 + d_2$) методом малогоуглового рассеяния рентгеновских лучей (излучение $\text{CuK}\alpha$) по осцилляциям Кизиха, результаты прямого и косвенного определения периода модуляции расходятся не более чем на 10%).

Спектр СВР изучался на стандартном спектрометре ЭПА-2М с частотой $f = 9.2$ ГГц. Пленки намагничивались нормально к поверхности, температура измерения – комнатная. Спектр СВР наблюдался на всех образцах с наибольшим количеством пиков (до 10 и более мод) при толщине Pd $d_2 = 10$ Å. Один из полученных спектров приведен на рис.2. В спектрах присутствовали как четные, так и нечетные моды, что характерно для всех изготовленных пленок Co/Pd . Обработка спектра СВР велась по правилам, отработанным ранее [18]: величины резонансных полей отстраивались в координатах $(H_1 - H_n, n^2)$, что позволяло (благодаря связи $k_n = n\pi/d_0$, где d_0 – общая толщина мультислойной пленки) сопоставлять зависимость $\delta H_{1n}(n^2)$ с дисперсионной кривой $\omega(k^2)$. Для наглядной демонстрации эффекта брэгговского рассеяния из экспериментальной зависимости $h_r(n^2) = H_0 - \eta_e n^2$, где $\eta_e = \alpha M(\pi/d_0)^2$, рассчитывалась зависимость $\eta_e(n)$, которая в случае выполнения для спектра СВР мультислойной пленки условия $k_{\min} < k_b < k_{\max}$, должна обладать характерной особенностью в области $k \sim k_b$.

На рис.3 представлены зависимости $\delta H_{1n}(n^2)$ для двух пленок. Кривая 1 соответствует мультислойной пленке Co/Pd с количеством пар слоев $N = 5$

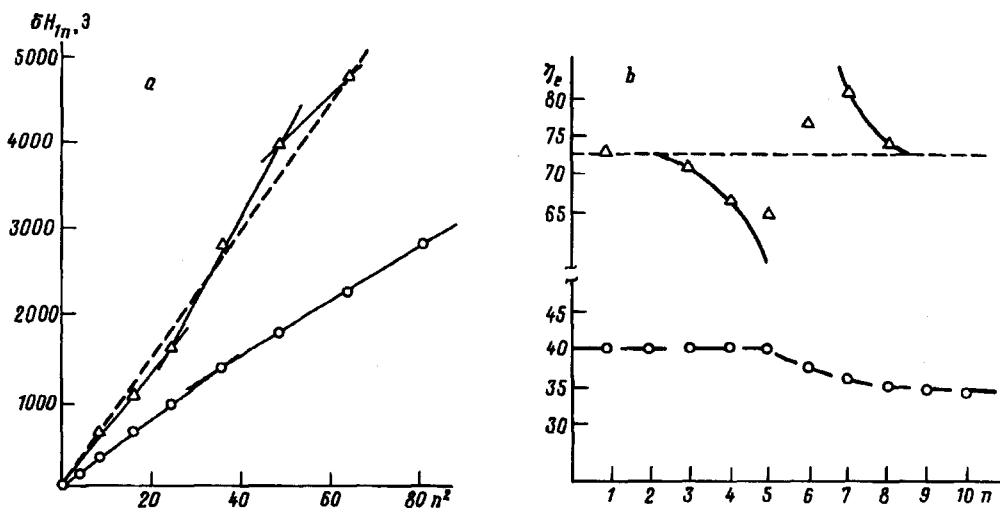


Рис.3. Зависимости резонансных полей H_r мультислойной пленки $(Co_{400}/Pd_{10})_5$ - Δ и гетерофазной пленки $Co-Pd$ - o в координатах $\delta H_{1n}(n^2)$ (a); эффективная обменная жесткость $\eta_e(n) = \eta(\pi/d_0)^2$ (b) для этих систем

($N = d_0 / \{d_1 + d_2\}$), кривая 2 относится к гетерофазной пленке $Co-Pd$ с тем же весовым соотношением Co и Pd . Видно, что ход зависимостей $\delta H_{1n}(n^2)$ существенно различается: если кривая 2 описывается хорошо выраженной модификацией $\omega(k)$ типа "обменный" излом (терминология работы [18]), то кривая 1 характеризуется особенностью $\omega(k)$ типа "ступенька". Эта особенность наблюдается в области волновых векторов $k_i \sim k_b = \pi / (d_1 + d_0) = 6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ ($d_1 = 400 \text{ \AA}$, $d_2 = 10 \text{ \AA}$). Зависимости $\eta_e(n)$, рассчитанные из экспериментальных величин H_r спин-волновых мод, приведены на рис.3б.

Зависимость $\eta_e(n)$ для гетерофазной системы $Co-Pd$ здесь демонстрирует эффект перенормировки эффективной обменной жесткости η_e для спиновых волн при уменьшении длины волны λ до размера неоднородности параметра обмена, неоднократно наблюдаемый ранее (см., например, [18-20]). Зависимость $\eta_e(n)$ для мультислойной системы Co/Pd качественно повторяет теоретически предсказываемую зависимость $\eta(k)$ (рис.1б), в частности, $\eta_e(n)$ обладает характерной особенностью $\eta(k)$ в области $k - k_b$, что позволяет использовать эту экспериментальную кривую для измерения величины энергетической щели Δ .

Достоверность экспериментального обнаружения эффекта брэгговского рассеяния в мультислойных пленках Co/Pd обеспечивается тем, что аналогичные зависимости $\eta_e(n)$ наблюдались и при других количествах пар слоев ($N = 4$, $N = 6$ и т.д.). Однако существуют и различия между экспериментальными $\eta_e(n)$ и теоретическими $\eta(k)$. Несущественное - отсутствие резкого скачка в точке $k = k_b$, что объясняется погрешностью технологии получения образцов, допускающей в реальных мультислойных пленках вариации толщин индивидуальных слоев. Существенное, как видно из рис.4, где представлены нормированные η_e для двух пленок Co/Pd - при достаточно хорошей локализации эффекта в области $k \sim k_b$ (от $0.3k_b$ до $1.7k_b$) наблюдается разница в величине отклонения $\Delta\eta$ до и после координаты энергетической щели k_0 ,

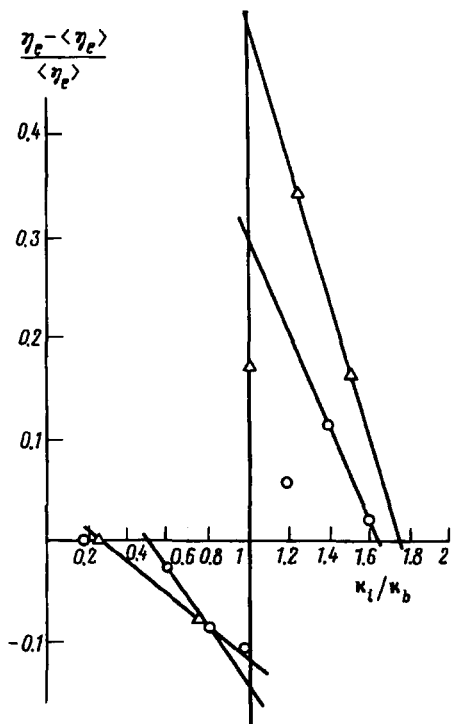


Рис.4. Нормированные значения спин-волновой жесткости η_e для пленок $(Co_{400}/Pd_{10})_5$ - о и $(Co_{400}/Pd_{10})_4$ - Δ в области $k \sim k_b$

причем "положительное" отклонение в 2-3 раза превышает "отрицательное". Последнее свидетельствует об асимметрии энергетической щели $\Delta \sim \Delta\eta$, понимание которой может быть достигнуто в ходе дальнейших теоретических исследований.

Работа выполнена при частичном финансировании Краевого фонда науки (грант 3F 0165).

1. P.Grunberg and K.Mika, Phys. Rev. B27, 2955 (1983).
2. J.Barnas, Solid. State Comm., 61(6), 405 (1987).
3. Ю.В.Грибкова, А.М.Каганов, Письма в ЖЭТФ 47, 588 (1988).
4. В.Hillebrands, Phys. Rev. B41, 530 (1990).
5. Ю.И.Горобец, ФТТ 34, 1486 (1992).
6. М.Ш.Ерухимов, Г.М.Ерухимов, Б.Э.Беренштейн, ФТТ 36(6), 1621 (1994).
7. V.A.Ignatchenko, R.S.Iskhakov, and Yu.I.Mankov, JMMM 140-144, 1347 (1995).
8. R.P.van Staple, F.J.A.M.Greidanus, and J.W.Smits, J. Appl. Phys. 57(4), 1282 (1985).
9. Р.С.Исхаков, А.С.Чеканов, Л.А.Чеканова, ФТТ 32(2), 441 (1990).
10. R.Kordecki, R.Meckenstock, J. Pelzl etc., JMMM 121, 524 (1993).
11. J.-W.Layadi, J. Appl. Phys. 64(10), 610 (1988).
12. M.Rivoire, G.Suran, H.J.de Wit etc., JMMM 93, 489 (1991).
13. R.Krishnan, H.Sakakima, J.F.Cochran etc., JMMM 67, 88 (1987).
14. Q.Y.Jin, M.Lu, Q.S.Bie etc., JMMM 140-144, 565 (1995).
15. H.R.Zhai, X.B.Zhu, M.Lu etc., JMMM 140-144, 525 (1995).
16. A.Murayama, M.Murayama, K.Nishiyama etc., J. Appl. Phys. 69(8), 5661 (1991).
17. P.Grunberg, R.Shreiber, Y.Pang etc., Phys. Rev. Lett. 57(10), 2442 (1986).
18. В.А.Игнатченко, Р.С.Исхаков, Л.А.Чеканова и др., ЖЭТФ 75, 6534 (1978).
19. L.J.Maksymowicz, D.Temple, and R.Zuberek, JMMM 53(3), 303 (1986).
20. Р.С.Исхаков, А.С.Чеканов, Л.А.Чеканова, ФТТ 30(4), 970 (1988).