нейтронографических исследований [14].

В заключение приведем таблицу основных макро- и микропараметров исследованных квазиодномерных антиферромагнетиков с треугольным упорядочением:

	Т <sub>N</sub> , К	<i>H</i> <sub>c</sub> , <i>H</i> <sub>c</sub> , кЭ при <i>T</i> → 0	<b>Ј, Г</b> Гц	J', ГГц	<i>D</i> , ГТц
CsNiCl <sub>3</sub>	4,7 [5]	19,2	345 [16]	8,2 ± 10%	$-0,59 \pm 10\%$
RbNiCl <sub>3</sub>	11 [5]	20,1	383 [17]	38 ± 10%	$-1,0 \pm 10\%$
CsMnBr <sub>3</sub>	8,3 [15]	64	214 [14]	0,5 ± 5%	$+1,95 \pm 5\%$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Зализняк И.Л., Прозорова Л.А., Петров С.В.//ЖЭТФ. 1990. Т. 97. С. 359.

- 2. Петренко 0.А., Петров С.В., Прозорова Л.А.// Іbidem. Т. 98. С. 727. 3. Андреев А.Ф., Марченко В.И.// УФН. 1980. Т. 130. С. 39. 4. Зализняк И.А., Марченко В.И., Петров С.В. и др.// Письма ЖЭТФ. 1988. Т. 47. С. 172.
- Sachiwa N.// J. Phys. Soc. Japan. 1969. V. 27. P. 561.
  Zaliznyak LA., Prozorova L.A., Chubukov A.V.// J. Phys.: Condens. Matter. 1989. V. 29. P. 4743.
- 6. Zaliznyak LA., Prozorova L.A., Chubukov A.V.// J. Phys.: Condens. Matter. 1989. V. 29. P. 4/43.
  7. Morra R.M., Buyers W.J.L., Armstrong R.L., Hirakawa K.//Phys. Rev. B. 1988. V. 38. P. 543.
  8. Tun Z., Buyers W.J.L, Harrison A., Rayne J.A.// Ibidem. 1991. V. 43. P. 1331.
  9. Haldane F.D.M. Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. P. 1153.
  10. Bonner J.C., Muller G.//Phys. Rev. B. 1983. V. 29. P. 3216.
  [11] Harrison A., Collins M.F., Abu-Dayyeh J., Stager C.V.//Ibidem. 1991. V. 43. P. 679.
  12. Chubukov AV.// J. Phys. C: Sol. State Phys. 1988. V. 21. P. 441.
  13. Gaulin B.D., Mason T.E., Collins M.F., Larese I.Z.// Phys. Rev. Lett. 1989. V. 62. P. 1380.

- Gaulin D.D., Muson T.L., Collins M.F., Larese T.Z.// Phys. Rev. Lett. 1989. V. 62. P. 1380.
  Gaulin B.D., Collins M.F., Buyers W.J.L.// J. Appl. Phys. 1987. V. 61. P. 3409.
  Eibshutz M., Sherwood R.C., Hsu F.S.L., Cox D.E.// A I P Conf. Proc. 1972. V. 17. P. 864.
  Buyers W.J.L., Morra R.M., Armstrong R.L., Hogan M.J., Gerlach P., Hirakawa K.//Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 371.
  Witteven H.T., van Veen J.A.R.// J. Phys. and Chem. Sol. 1975. V. 35. P. 337.

## 53(048)

# НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР (25 декабря 1991 г.)

25 декабря 1991 г. в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

1. Р.А. Сюняев, М.Р. Гильфанов, С.А. Гребенев, О.В. Терехов, Е.М. Чуразов. Результаты спутника ГРАНАТ. Открытие и локализация источников эмиссии в линии аннигиляции позитрона в Центре Галактики и в Новой Созвездия Мухи. Обнаружение гамма-линий синтеза дейтерия 2,2 МэВ в спектре солнечной вспышки,

2. С.О. Демокритов. Прямое наблюдение осцилляций РККИ-взаимодействия в слоистых магнитных системах.

Краткое содержание одного доклада публикуется ниже.

#### 537.611.44.45(048)

С.О. Демокритов. Прямое наблюдение осцилляции РККИвзаимодействия в слоистых магнитных системах. За прошедшие голь лет после открытия антиферромагнитного (A $\Phi$ ) взаимодействия в слоистой системе Fe/Cr/Fe это явление было исследовано весьма подробно [1 — 4]. Особый интерес вызвал тот факт, что при изменении взаимной ориентации намапшченностей соседних пленок Fe наблюдался эффект гигантского магнитосопротивления [2, 4, 5]. Оказалось, что это явление носит общий характер, и к настоящему времени подобный эффект найден во многих слоистых системах [6]. В 1990 г. были обнаружены сильно затухающие осцилляции величины A $\Phi$  взаимодействия как функции толщины немагнитной пленки *d* в системах Fe/Cr/Fe, Co/Cr/Co, а также Co/Ru/Co [4]. Однако первые результаты были получены на поликристаллических образцах. К тому же применявшийся метод исследования — анализ кривых намагничивания не давал никакой информации о величине ферромагнитного взаимодействия. Поэтому дальнейшие исследования пошли по пути улучшения качества изучаемых образцов и получения более полной информации о происходящих в таких магнитных слоистых системах явлениях.

Для получения монокристаллических образцов напыление пленок производилось в сверхвысоком вакууме (лучше, чем  $2 \cdot 10^{-9}$  торр) с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. В качестве подложки использовался GaAs. По известной методике [7] сначала формировался буферный слой из 1 нм Fe/150 нм Ag, на который уже и наносилась собственно исследуемая система. Характерные толщины пленок Fe составляли 3 — 10 нм, а немагнитных прослоек (Cr, Al, Au) — 0 — 7 нм. При получении состав образцов контролировался с помощью оже-спектрометра, а кристаллические свойства и морфология границ между пленками с помощью дифрактометров на медленных и быстрых электронах (LEED, RHEED). Все это позволяет утверждать, что пленки были монокристаллические с плоскими границами. Загрязнение пленок (например, кислородом), а также диффузия Ga и As сквозь буфер не наблюдались. В качестве величины, характеризующей качество магнитных пленок, приведем измеренную коэрцитивную силу, которая составляла 4 - 5Э.

Для изучения зависимости величины магнитного взаимодействия в слоистой системе от толщины немагнитной пленки d эти пленки изготавливались в форме клина. При этом фактически в одном образце имелась возможность исследовать широкий диапазон толщин d при идентичных свойствах магнитных пленок Fe. Эта клинообразная геометрия не искажала магнитных свойств слоистой системы, что проверялось путем сравнения с образцами с постоянной величиной толщины прослойки. Поскольку длина клина составляла 16 мм, а изменение толщины 5 — 6 нм, то он никоем образом не искажал морфологию поверхности пленок. Действительно, изменение толщины клина на один монослой происходило на расстоянии не менее 0,5 мм.

Экспериментальная информация о величине взаимодействия между магнитными слоями получалась из анализа кривых намагниченности M(H), а также из частот спиновых волн, распространяющихся в слоистой системе. Кривые M(H) измерялись с помощью сканирующего магнитометра, работающего на основе магнитооптического эффекта Керра (МОЭК). Частоты спиновых волн измерялись с помощью бриллюэн-мандельштаммовского рассеяния (БМР) света. В обоих случаях источником света служит сфокусированный лазерный пучок. Сканируя этим пучком вдоль клина, можно фактически изучать слоистые системы с различной величиной d. По сравнению с МОЭК методика БМР имеет преимущество в том, что она позволяет измерять не только  $A\Phi$ , но ферромагнитное ( $\Phi$ M) взаимодействие. Для количественной оценки обменного взаимодействия между соседними ферромагнитными пленками поверхностная обменная энергия записывается в виде [8]

$$E_s = -2A_{12}\cos\delta\theta,\tag{1}$$

где  $E_{\rm s}$  обозначает энергию на единицу площади пленки, а  $\delta\theta$  — это угол между векторами намагниченности двух пленок. Параметр  $A_{12}$ , определенный в (1), получается из кривой M(H) по величине поля насыщения  $B_{\rm s}$ , при котором намагниченности обеих пленок устанавливаются вдоль поля. Отсюда ясно, что таким методом можно измерить только АФ взаимодействие, поскольку при ФМ взаимодействии между пленками их намагниченности уже в нулевом поле параллельны друг другу. В случае пренебрежимо малой анизотропии  $A_{12}$  вычисляется по  $B_{\rm s}$ :

$$A_{12} = -B_{\rm s} M d_0 / 4, \tag{2}$$

где M и  $d_0$  — соответственно намагниченность и толщина магнитной пленки.

Другой способ измерения  $A_{12}$  — это анализ частот спиновых волн. Детально он описан в [9]. В слоистой системе из двух магнитных пленок наблюдаются две ветви спиновых волн. Первая — это Дэмон-Эшбаховская (ДЭ) мода, чья частота не зависит от межпленочного взаимодействия. Частота второй "оптической" моды уже зависит от величины взаимодействия, ее можно использовать для вычисления  $A_{12}$ .

Уже в первых экспериментах на монокристаллических образцах Fe/Cr/Fe были обнаружены осцилляции взаимодействия типа АФ-ФМ-АФ... [10] (рис. 1). Оказалось также, что закон затухания этих осцилляции зависит от температуры и предсказанный для двумерной системы теорией Рудермана— Киттеля-Косии-Иосиды (РККИ) закон  $d^{-2}$  наблюдается только при низких температурах. При комнатной температуре, например, наблюдается закон, близкий к  $d^{-5}$ . Как и в [4], период осцилляции составлял около 1,7 — 1,8 нм, что при сравнении с теорией РККИ приводит к исключительно малой величине  $k_{\rm F}$ , соответствующего этим осцилляциям. Делались попытки объяснить данное противоречие наличием на поверхности Ферми Сг областей, близких к границе зоны Бриллюэна. Такие "длинноволновые" осцилляции связывались также с биением между РККИ-колебаниями и периодичностью атомной решетки. Однако независимо от предлагаемых моделей должны были существовать и "коротковолновые" осцилляции с периодом, близким к двум межатомным расстояниям решетки немагнитного металла. Действительно, на зависимости  $\bar{A}_{12}$  от *d*, полученной в [10], наблюдалась тонкая структура, которую можно рассматривать как проявление сильно подавленных коротковолновых осцилляции. Уже в [11] отмечалось, что РККИ-осцилляции подавляются шероховатостью поверхности, причем для коротковолновых осцилляции условия на качество поверхности жестче, чем для длинноволновых (в меру отношения периодов). Поэтому дальнейшие поиски коротковолновых осцилляции пошли по пути улучшения качества поверхности пленок. Было обнаружено, что в системе Fe/Cr/Fe, эпитаксиально полученной на подложке из AsGa, граница между пленкой Cr и верхней пленкой Fe по качеству хуже, чем граница между нижней пленкой Fe и пленкой Cr. Однако была найдена специальная методика



Рис. 1. Зависимость  $A_{12}$  от толщины прослойки Cr в системе Fe/Cr/Fe при комнатной температуре, полученная из МОЭК- и БМР-экспериментов. *FM* — ферромагнетизм, *AFM* — антиферромагнетизм; *N* — толщина пленки, выраженная в монослоях

обработки поверхности пленки Cr in situ с помощью электронного пучка, которая настолько улучшает качество поверхности, что коротковолновые осцилляции функции  $A_{12}(d)$  становятся легко наблюдаемыми [12]. На рис. 2 приведены сравнительные данные для нормального и обработанного электронным пучком образцов. Видно, что осцилляции, проявлявшиеся на нормальном образце как слабо выраженная тонкая структура, явно проявились после электронной обработки.

Была разработана также технология приготовления слоистых систем, с использованием железных вискеров [13—15]. При этом, как показала электронная дифрактометрия, поверхности пленок в таких системах оказались гораздо лучше, чем в приготовленных на GaAs. Поэтому неудивительно, что коротковолновые РККИ-осцилляции в них оказались еще более выраженными. В [14] с помощью методики, не позволяющей измерять величину  $A_{12}$ , а только регистрировать ее знак, обнаружено около 20 периодов коротковолновых осцилляции.

Система Fe/Cr/Fe первая, но не единственная, где обнаружены коротковолновые осцилляции  $A_{12}$ . Такие же осцилляции были обнаружены в системе Fe/Mn/Fe, изготовленной на основе вискера [16], а также в системе Fe/Au/Fe [17]. Причем даже без специальной обработки система Fe/Au/Fe, эпитаксиально нанесенная на GaAs, имеет поверхности пленок с качеством,



Рис. 2. Зависимость  $A_{12}$  от толщины прослойки Cr для нормального (1) и обработанного электронным пучком (2) образцов

достаточным для наблюдения коротковолновых осцилляции, хотя в Fe/Au/Fe сама величина  $A_{12}$  гораздо меньше, чем в системе Fe/Cr/Fe. Отметим также систему Fe/Al/Fe, где наблюдалось РККИ-взаимодействие, несмотря на отсутствие в Al d-электронов [17].

В ходе исследований слоистых магнитных систем был обнаружен эффект, который на первый взгляд не связан с осцилляциями величины  $A_{12}$ . В системе Fe/Cr/Fe наряду с обыкновенным обменным взаимодействием, которое описывается параметром  $A_{12}$ , существует взаимодействие более высокого порядка вида:

$$E_{\rm s} = B_{12} (\cos \delta \theta)^2, \tag{3}$$

которое при положительных  $B_{12}$  делает энергетически выгодной конфигурацию, когда намагниченности двух пленок взаимно перпендикулярны [18]. Причем для определенных значений d это 90°-ное взаимодействие становится доминирующим и в нулевом внешнем поле осуществляется перпендикулярная конфигурация. Предлагалось несколько микроскопических механизмов, приводящих к такому взаимодействию [12, 8]. Однако после того, как этот эффект был обнаружен и в других системах (Fe/Al/Fe, Fe/Au/Fe), стало ясно, что это явление носит общий характер и не связано с конкретными свойствами

163

Cr. В последнее время появилась работа, где подробно рассмотрено поведение двух магнитных пленок, связанных осциллирующим РККИ-взаимодействием в условиях определенной неоднородности толщины прослойки [19]. В этом случае, как уже неоднократно отмечалось, собственно осцилляции оказываются подавленными, но, как показано впервые в [19], изначальное существование осцилляции приводит к появлению эффективного 90°-ное взаимодействия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Gruenberg P., Schreiber R., Pang Y., Brodsku M.B., Sowers H.// Phys. Rev. Lett. 1986. V. 57. P. 2442.
- 2. Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., Nguen Van Dau F., Petroff F., Etienne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J.//Ibidem. 1988. V. 61. P 2472.
- 3. Krebs J.J., Lubitz P., Chaiken A., Prim. G.A.// Ibidem. 1989. V 4. Parkin S.S.P., More N., Roche K.P.//Ibidem. 1990. V. 64. P. 2304. Ibidem. 1989. V. 63. P. 1645.
- 5. Binash G., Gruenberg P., Saurenbach F., Zinn W.// Phys. Rev. B. 1989. V. 39. P. 482.
- 6. Parkin S.S.P. (в печати в Phys. Rev. Lett.).
- 7. Etienne P., Massies J., Nguen Van Dau F., Barthelemy A., Fert A.// Appl. Phys. Lett. 1989. V. 55. P. 2239.
- 8. Hoffman F., Stankoff A., Pascard H.// J. Appl. Phys. 1970. V. 41. P. 1022.
- 9. Barnas J., Gruenberg P.// JMMM. 1989. V. 82. P. 186. 10. Demokritov S., Wolf J.A., Gruenberg P.//Europhys. Lett. 1991. V. 15. P. 881.
- [11] Wang Y., Levy P.M., Frey J.L.//Phys. Lett. 1990. V. 65. P. 2732.
- 12. Demokritov S., Wolf J.A., Gruenberg P., Zinn W.// Proc. of the Spring MRS Meeting. Anaheim, USA, April 1991.
- 13. Purcell S.T., Folkers W., Johnson M.T., McGee N.W.E., Jager K., van de Stege J., Zeper W.B., Hoving W., Gruenberg P.//Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. P. 903.
- Unguris J., Celotta R.J., Pierce D.T.// Ibidem. P. 140.
  Gruenberg P., Demokritov S., Fuss A., Shreiber R., Wolf J.A., Pursell S.T.// Proc. of ICM. Edinburg. September 1991.
- 16. Purcell S.T. (частное сообщение).
- 17. Fuss A., Demokritov S., Gruenberg P., Zinn W.// J. MMM. 1992. V. 103. P. L 221.
- 18. Ruerig M., Shaefer R., Hubert A., Mosler R., Wolf J.A., Demokritov S., Gruenberg P.//Phys. Stat. Sol. A. 1991. V. 125. P. 635.
- 19. Slonchevskii J.C. (в печати в Phys. Rev. Lett.).