Физика низких температур, 1995, т. 21, № 3, с. 343–346

Хроника

УДК 537.6

14-й Международный коллоквиум по магнитным пленкам и поверхностям

(Германия, Дюссельдорф, 28 августа — 2 сентября 1994 г.)

А. С. Ковалев, Е. С. Сыркин

Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Украина, 310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47

Статья поступила в редакцию 24 октября 1994 г.

С 28 августа по 2 сентября 1994 года в Университете им. Генриха Гейне в Дюссельдорфе (Германия) проводился 14-й Международный коллоквиум по магнитным пленкам и поверхностям совместно с Симпозиумом по магнитным ультратонким пленкам, многослойным системам и поверхностям. Спонсорами и организаторами этой конференции выступили: Deutsche Forschungsgemeinschaft, European Physical Society, Gesellschaft von Freunden und Forderen der Heinrich-Heine-Universitat Düsseldorf, Max-Plank-Gesellschaft, Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Landers NRW. Конференция проходила на территории Дюссельдорфского университета им. Генриха Гейне и была прекрасно организована, в чем немалая заслуга председателя оргкомитета профессора Е. Кискера — директора Института электронной физики (г. Дюссельдорф).

При подборе докладов и постеров основное внимание было уделено следующим направлениям исследований: 1) гигантское (и в меньшей степени обычное) магнитосопротивление и сенсорные устройства на принципе магнитосопротивления; 2) магнитооптика и дихроизм и их применение в магнитозаписи; 3) магнитные свойства многослойных структур, сверхтонких пленок и поверхностей и, в первую очередь, магнитное связывание слоев и магнитная анизотропия тонких пленок и поверхностей; 4) методика роста тонких слоев и многослойных структур и процессы намагничивания; 5) методы исследования магнитной структуры поверхностей и пленок, магнитное изображение и, в частности, сканирующая туннельная и магнитосиловая микроскопия; 6) традиционные вопросы структуры и динамики доменных границ и распространения спиновых волн применительно к многослойным системам, тонким пленкам и границам раздела различных сред.

Среди работ, традиционных для физики магнитных пленок, выделяется большая группа докладов (около трети всех представленных), посвященных экспериментальному исследованию явления гигантского магнитосопротивления (ГМС). Открытое сравнительно недавно (V. N. Baitich et al., *Phys. Rev. Lett.* 61, 2472 (1988)), это явление сразу же привлекло внимание как с точки зрения физики, так и технических применений. В докладах [A2, A3,A5,A20]* указывается на возможность использования ГМС в сенсорных устройствах для считывания информации с магнитных дисков и пленок. После демонстрации фирмой IBM в 1991 году считывающей головки, использующей принцип МС, плотность записи, которая допускается такими устройствами, растет на 30–60% в год. Однако считается, что для достижения плотности записи в 10 биллионов бит на квадратный дюйм к 2000–2005 годам необходимо перейти на сенсорные устройства на принципе ГМС, которые предпочтительней традиционных устройств, использующих анизотропное МС (АМС) пермаллоя [A2]. Сенсорные устройства на принципе ГМС обладают в 10 раз большей чувствительностью, чем в случае АМС, прекрасной линейностью характеристик и низким шумом [A3,A5]. Поскольку явление ГМС было открыто на слоистых структурах Fe–Cr, где ферромагнитные слои взаимодействуют антиферромагнитно через немагнитные прослойки, это явление привлекло внимание исследователей, занимающихся магнитными свойствами тонких пленок и слоистых структур. Сейчас как теоретически (см., например, [A10,A13,A14,A119]), так и экспериментально [A11,A15] доказано, что ГМС связано с рассеянием электронов на неоднородностях магнитной структуры в магнитоупорядоченном состоянии. Роль этих неоднородностей могут играть не

* Нумерация ссылок в данном тексте соответствует обозначению докладов в тезисах конференции: Colloquium Digest of 14th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, 28 August — 2 September 1994, Düsseldorf, Germany

только немагнитные прослойки в слоистых соединениях, но и доменные границы в разветвленных доменных структурах [A47]. В частности, с доменными границами, по-видимому, связана ГМС тонких пленок, однородных по составу [A9]. С этим обстоятельством связан интерес к ГМС со стороны физиков, традиционно занимающихся структурой и динамикой доменных границ. Другие возможности неоднородных магнитных структур, приводящих к ГМС, связаны с гранулированной структурой — магнитные гранулы в немагнитной матрице — [A21–A23], островковой структурой сверхтонких магнитных пленок, наносимых на подложку [A24], доменными границами в пленках, связанными с дефектами (ступеньками) подложки [A105,A69]. Однако наиболее перспективным направлением с точки зрения приложений является синтез и исследование свойств многослойных систем «магнитик–немагнитик» с очень малой толщиной слоев и высокой точностью соблюдения толщины и состава слоев. При этом возникают технологические проблемы создания тонких пленок в несколько атомных слоев и разной степенью однородности покрытия [B1] и развития новых методов исследования микроструктуры (в том числе магнитной) тонких поверхностных слоев. Наряду с традиционными методами, основанными на магнитооптическом эффекте Керра [B31] и сканировании туннельного микроскопа [D132], на конференции был продемонстрирован принципиально новый прибор — магнитный силовой микроскоп (МСМ), который с большим разрешением описывает структуру магнитных неоднородностей в тонких магнитных пленках [A120]. Основная идея нового метода детектирования заключается в сканировании вдоль поверхности магнитной иглы. При прохождении над областью неоднородности магнитного поля в игле возникает магнитная сила, притягивающая или отталкивающая иглу от поверхности. При этом регистрируется изгиб упругого элемента, поддерживающего иглу. Представляется, что МСМ может стать важным инструментом в экспериментальном исследовании магнитных пленок и поверхностей. Еще одним инструментом изучения кристаллической структуры поверхности и доменной структуры объема в антиферромагнетиках может быть исследование магнитной структуры тонких ферромагнитных пленок на поверхности АФМ: ступеньки на поверхности АФМ и выход на нее доменных границ порождают в ферромагнитной пленке ФМ доменные границы [A69,A105]. С точки зрения фундаментальной науки (в том числе теории) интерес представляют два направления исследований. Во-первых, изучение зависимости эффективного обменного взаимодействия между магнитными слоями через немагнитную прослойку от типа прослойки и ее толщины. Обменное взаимодействие зависит периодически от толщины прослойки, что проявляется в периодической зависимости от этой толщины ГМС [A12,A36,A37] или намагниченности [A54]. Во-вторых, изучение зависимости ГМС многослойных структур от числа слоев и их взаимной ориентации во внешнем магнитном поле [A51]. Для структур из нескольких слоев (до 10) на кривой зависимости МС от поля экспериментально отчетливо наблюдаются ступеньки, связанные с переориентацией намагниченности в отдельных слоях [A51].

Кроме использования многослойных магнитных систем с ГМС в сенсорных электронных устройствах подобные магнитные многослойные пленки могут быть использованы в магнитооптических дисках (МО) для магнитооптической записи информации с большой плотностью. После появления в 1983 году МО-диски совершенствуются и плотность информации увеличивается за счет уменьшения длины волны и использования магнитоиндуцированного сверхразрешения. Оба эти направления разрабатываются фирмой Sony на основе многослойных МО дисков с большой степенью вращения поляризации света на малых длинах волн. На конференции был представлен обзорный доклад [A1] и большое число экспериментальных работ [A112,A118] по исследованию магнитных свойств многослойных систем типа Co–Cr–Ta, Co–Zr–Ta, Tb–Fe–Co и т.д.

Большое магнитооптическое керровское вращение поляризации связано с перпендикулярной намагниченностью (перпендикулярная анизотропия) ультратонких слоев Co. Магнитная анизотропия немонотонно зависит от толщины слоя, и направление легкой оси перпендикулярно слою лишь в узком интервале малых толщин [B2]. С этим связано большое число представленных докладов по зависимости магнитной анизотропии тонких пленок от толщины, температуры и состава [B3–B5,B14,B16,B17,B20,B22,B23].

О различных применениях многослойных магнитных структур и тонких пленок в технологических устройствах указывалось в докладах [C2,C3,D1,D2,D22,D39,D40,D59,D78,D93,D100, D107,D122,P6].

Отметим, что, поскольку во всех перечисленных научных проблемах речь идет о тонких (в несколько атомных слоев) многослойных структурах и интерфэйсах, эта область физики магнитных явлений фактически смыкается с физикой мезоскопических явлений, являющейся сейчас одним из основных направлений.

Поскольку для гигантского магнитосопротивления необходимо наличие эффективного антиферромагнитного взаимодействия между магнитными слоями, на конференции было представлено много работ как экспериментальных, так и теоретических, посвященных исследованию этого взаимодействия.

Обычно используется РККИ теория или расчет связывания электронов в квантовой стенке. В ряде теоретических докладов проводится сравнение результатов двух подходов [D23] и предлагаются новые теоретические модели, связанные со специфической плотностью электронных состояний [D25], расчетом с помощью гриновских функций [D24] и вычислениями с использованием более общего формализма, в котором магнитное связывание слоев выражается в терминах коэффициента отражения блоховских волн на границе раздела парамагнетик — ферромагнетик [D22].

Необходимость развития теории магнитного связывания мультислоев связана, в частности, с экспериментальным изучением магнитного взаимодействия ферромагнитных слоев, разделенных различными (нетрадиционными для гигантского магнитосопротивления) типами прослоек. Прослойка может быть антиферромагнитоупорядочена как в структуре типа Fe/Mn/Fe, и вызывать антиферромагнитное взаимодействие между слоями [D20]. В качестве прослойки может быть использован изолятор, например аморфный Si [D22], и в этом случае обменное взаимодействие между слоями экспоненциально спадает с толщиной прослойки и растет с ростом температуры в противоположность случаю металлической прослойки. Наконец, очень интересна ситуация в слоистом магнетике с немагнитными полупроводниковыми прослойками [C3]. В таком магнитном полупроводнике магнитное взаимодействие может быть индуцировано светом или термоиндуцировано.

В традиционных многослойных системах типа ферромагнетик — немагнитный металл период осцилляций обменного интеграла может как совпадать с удвоенной толщиной атомного слоя в немагнитной прослойке, как в системах Fe/Cr/Fe с резкими границами [D15], так и существенно его превосходить при размытых границах и особой форме поверхности Ферми (наличие узких ячеек). Для последнего случая в системе Co/Cu/Co при допировании медной прослойки атомами Ge и Ni установлено соответствие изменения плотности электронов и диаметра ячейки на поверхности Ферми с изменением периода осцилляций обменного взаимодействия в согласии с $1D$ РККИ теорией [D13].

Кроме осцилляций обменного взаимодействия с толщиной немагнитной прослойки экспериментально наблюдались осцилляции, обусловленные толщиной магнитных слоев, связанные с интерференцией блоховских волн внутри ферромагнитных слоев [D3, D14, D17].

Большое внимание в представленных докладах было уделено изучению магнитных свойств поверхности и тонких пленок на поверхности. Отмечено, что температура Кюри поверхностного слоя магнетика может быть выше своего объемного значения [D54], а оптические свойства сверхтонких магнитных пленок (например, пленка Fe толщиной меньше 20 слоев на Au) существенно отличаются от таковых в объеме. Существует сильное взаимное влияние субстрата и поверхностного слоя. Так, ступенчатая структура поверхности типа $(1,0,n)$ ферро-(антиферро)магнетика вызывает возникновение доменной структуры в магнитном монослойном покрытии [D11]. С другой стороны, покрытие магнитной пленки даже моноатомным слоем переходных или благородных металлов вызывает поворот магнитной анизотропии перпендикулярно плоскости поверхности [C7], что важно для увеличения эффекта Керра в магнитооптических приложениях. Такое же явление наблюдается и при покрытии магнитной поверхности редкоземельными атомами [B25]. Следует отметить большое разнообразие методов исследования магнитных свойств поверхности. Перечислим фотоэлектронную спектроскопию [D56], лоренцовскую спектроскопию [D58], зеркальную электронную микроскопию [D61], использование сканирующего электронного микроскопа со спин-поляризационным анализом вторичных электронов [D60] и упомянутого выше сканирующего магнитосилового микроскопа [D57]. Сама тонкая ферромагнитная пленка также может служить инструментом исследования субстрата: например, спиновым детектором, производящим селекцию по спину эмитируемых из субстрата фотоэлектронов [D50].

На конференции были широко представлены направления, традиционные для физики магнитных явлений, такие как физика доменных границ и спиновых волн.

Отметим исследование с использованием машинного моделирования внутренней структуры и ее изменения по толщине пленки для доменных границ разной симметрии в тонких ферромагнитных пленках [D63,E2] и экспериментальное исследование доменых структур в аморфных магнетиках [D67]. Следует отметить также идейно новые работы по нелинейной хаотической динамике доменных границ: в докладе [D86] численно изучена хаотическая динамика стенок и бифуркационная картина изменения этой динамика в зависимости от величины и частоты внешнего магнитного поля, а в докладах [D69,D86,D102] экспериментально и теоретически рассмотрен фрактальный рост доменной структуры при перемагничивании.

Спиновые волны на поверхности магнетика и в многослойных магнитных структурах также обладают специфическими свойствами. В многослойных пленках спектр магнонов имеет щелевой характер [D75], который сохраняется, но видоизменяется в периодически стохастических многослойных структурах [D70]. Вблизи поверхности могут существовать специфические как линейные

[A100], так и нелинейные [D74,A96,A106] поверхностные спиновые волны. Другим видом нелинейных волн в магнитных пленках являются магнитные солитоны [A91,A106].

На конференции была представлена большая группа докладов по использованию магнитооптических эффектов в исследовании магнитных пленок и многослойных структур. Они могут быть использованы для изучения доменной структуры тонких пленок, что особенно результативно при одновременном применении нескольких методик, например эффекта Керра и Войгта [C2]. Новым важным инструментом изучения магнитных поверхностей, пленок и интерфейсов может стать нелинейный эффект Керра, так как намагниченность существенно воздействует на поляризацию и дихроизм второй гармоники [C4,E5]. С точки зрения практического применения в элементах записи информации очень важными могут быть материалы типа железо-иттриевого граната с гигантским фарадеевским вращением [D106,D107].

Поскольку вопрос о магнитооптическом вращении тесно связан с характером магнитной анизотропии, большое количество докладов было посвящено возможности существования в тонких пленках анизотропии, перпендикулярной плоскости пленки. В обычных условиях перпендикулярная анизотропия существует лишь в узком интервале малых толщин пленок [B2], однако ситуация меняется при покрытии поверхности монослоем благородных и переходных металлов [C7] или редкоземельных элементов [B29] за счет магнитострикции при приложении давления [B30], а также за счет образования интерфейсов в объеме магнетика [B35].

Следует отметить участие в работе конференции большой группы физиков из стран СНГ и значительное количество докладов, представленных учеными этих стран.

A1. M. Kanako (Sony Korporation, Japan).
A2. J. Kent Howard (IBM Storage Systems Division, USA).
A3. J. C. S. Kools et al. (Phil. Res. Lab. The Netherlands).
A5. J. L. Leal et al. (INESC, Portugal).
A9. R. Ramesh (Belcore, Red Bank, NJ USA).
A11. A. Barthelemy et al. (Orsay cedex, France).
A12. S. K. J. Lenczowski et al. (Eindhoven, The Netherlands).
A15. S. S. Parkin (IBM Research Division, USA).
A20. V. A. Tutin et al. (Chernogolovka, Russia).
A21. C. Bellouard et al. (Nancy, France).
A22. A. Azizi et al. (IPCMC-Gemme, CNRS, France).
A23. E. Kolb et al. (Paris, France).
A24. M. Nishikawa et al. (Ibaraki, Japan).
A36. N. Thangari et al. (IBM, USA).
A37. A. Dinia et al. (IPCMS-GEMME. Strasburg, France).
A47. Shufeng Zhang and Peter M. Levy (New York, USA).
A51. M. Mulloy et al. (Orsay, France).
A54. J. V. Harkins et al. (London, UK).
A69. A. Berger and H. Hopster (Irvine, USA).
A91. A. S. Kovalev et al. (Kharkov, Ukraine).
A96. A. L. Sukstanskii and S. V. Tarasenko (Donetsk, Ukraine).
A100. T. G. Petrova and E. S. Syrkin (Kharkov, Ukraine).
A105. D. Stoeffer and F. Ganter (IPCMS-GEMME CNRS, France).
A106. A. S. Kovalev and D. A. Zolotarev (Kharkov, Ukraine).
A112. T. Shimatsu et al. (Yonezawa, Japan).
A113. T. Shimatsu et al. (Yonezawa, Japan).
A114. H. Yoshimoto et al. (Tokyo, Japan).
A115. S. Nakagawa and M. Nage (Tokyo, Japan).
A116. D. Raasch et al. (Philips Aachen, Germany).
A117. P. Meyer et al. (Paris, France).
A118. W. P. Van Drent et al. (AE Enschade, The Netherlands).
A120. S. Porthun et al. (AE Enschade, The Netherlands).
B1. J. Giergiel (Halle, Germany).
B2. M. T. Johnson et al. (Eindhoven, The Netherlands).
B3. C. M. Falco et al. (Tuscon, USA).
B4. B. Hillebrands et al. (Aachen, Germany).
B5. J. L. Davail et al. (Paris, France).
B14. K. Itoh et al. (Kumamoto, Japan).
B16. A. I. Kopeliovich et al. (Kharkov, Ukraine).
B17. M. Lubecka et al. (Warshawa, Poland).
B20. H. Rohrmann et al. (Kasel, Germany).
B22. C. F. J. Flipse et al. (Eindhoven, The Netherlands).
B23. J. Harkins and P. E. Donovan (London, UK).
B29. S. Iwata et al. (Nagoya, Japan).
B30. A. Tsukamoto et al. (Chiba, Japan).
B31. S. Jordan et al. (York, UK).
B35. N. Bouterfas et al. (Orsay, France).
C2. R. Schafer (Dresden, Germany).
C3. M. Landolt and B. Briner (Zurich, Switzerland).
C4. U. Pustogowa et al. (Berlin, Germany).
C7. B. Dieny (Grenoble, France) and A. Vedyayev (Moscow, Russia).
D1. R. Jungblut et al. (Eindhoven, The Netherlands).
D2. P. D. Johnson (NY, USA).
D3. P. J. H. Bloemen et al. (Eindhoven, The Netherlands).
D11. H. Dreysse et al. (Strassbourg, France).
D13. J. F. Bobo et al. (Vandoeuvre, The Netherlands).
D14. S. N. Okuno and K. Inomata (Kawasaki, Japan).
D15. A. Mokrani et al. (Nantes, France).
D17. Zhou et al. (Columbus, USA).
D20. S. Handschuh et al. (Julich).
D22. P. Bruno (Paris, France).
D23. J. D. d Albuquerque e Castro et al. (London, UK).
D25. Y. Murayama and K. Koike (Saitama, Japan).
D39. I. I. Falko, S. V. Kuplevakhsky (Kharkov, Ukraine).
D40. I. I. Falko, S. V. Kuplevakhsky (Kharkov, Ukraine).
D50. W. Kuch et al. (Halle, Germany).
D54. Vescovo et al. (Julich, Germany).
D56. T. Kachel et al. (Berlin, Germany).
D57. L. Zhou et al. (Glasgow, Scotland).
D58. T. Zimmermann et. al. (Regensburg, Germany).
D59. S. Becker et al. (Kassel, Germany).
D60. W. Weber et al. (Ruschlikon, Switzerland).
D61. J. Barthel et al. (Halle, Germany).
D63. K. Ramstock et al. (Erlangen, Germany).
D67. P. Perriat et al. (Dijon, France).
D69. J. S. Earl et al. (Keele, Germany).
D70. V. A. Ignatchenko et al. (Krasnoyarsk, Russia).
D74. S. A. Nikitov (Bochum, Germany).
D75. K. Yu. Guslienko (Kiev, Ukraine).
D78. J. McCord et al. (Erlangen, Germany).
D86. T. G. Pokhil and E. N. Nikolaev (Moscow, Russia).
D93. S. V. Lebedev (Moscow, Russia).
D100. V. N. Samofalov et al. (Kharkov, Ukraine).
D102. A. Kirilyuk et al. (Halle, France).
D106. K. Ando et al. (Tsukuba, Japan).
D107. N. Adachi et al. (Tokyo, Japan).
D122. A. Yamaguchi et al. (Nagoya, Japan).
D132. R. Jansen et al. (Eindhoven, The Netherlands).
E2. D. V. Berkov (Chernogolovka, Russia).
E5. H. A. Wierenga (Nijmegen, The Netherlands).
P6. T. Kraft et al. (Dresden, Germany).