

XI. МАГНЕТИЗМ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР

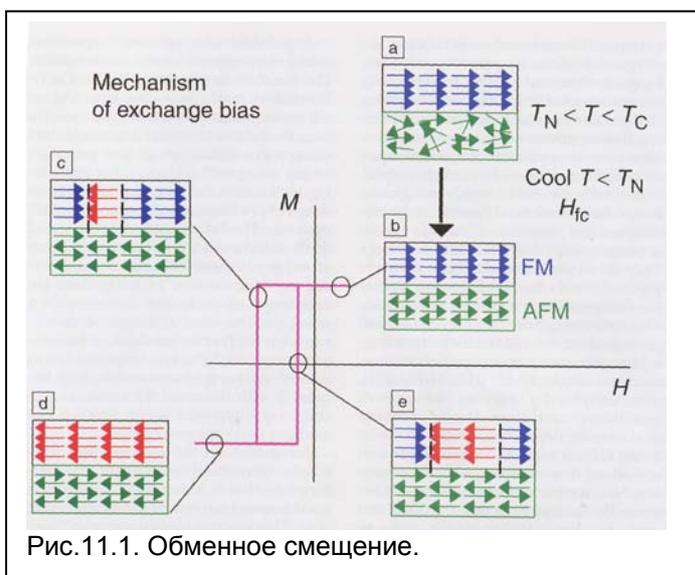
Магнитные многослойные системы. Обменное смещение (exchange bias). Обменно-связанные магнитомягкие подслои для сред хранения информации. Гигантское магнитное сопротивление. Антиферромагнитная связь. Использование различной коэрцитивности слоев. Обменное смещение-спиновый затвор. Применения GMR. Магнитные нанонити (1D системы). Применения.

Магнитные многослойные системы.

Интерес к магнитным многослойным структурам мотивируется их многочисленными применениями, как уже реализованными так и разрабатываемым, в области магнито- и спин-электроники, например, высокочувствительные сенсоры магнитных полей, устройства магнитной записи и хранения информации и т.д. Большой интерес проявляется к исследованиям фазовых переходов, спиновой структуры, масштабирования (качественного изменения свойств), эффектов близкого действия (proximity) при уменьшении размерности материалов.

Так же как и тонкие пленки, многослойные структуры получают магнетронным распылением, электронно-лучевой эпитаксией, и другими методами осаждения тонких пленок. Двух- и многослойные магнитные структуры состоят из чередующихся слоев с различными магнитными свойствами. Особое внимание привлекают два свойства таких структур: *обменное смещение* и *гигантское магнитосопротивление*.

Обменное смещение (exchange bias). Явление обменного смещения возникает в системе, состоящей из ферромагнитной пленки на антиферромагнитной подложке. Эффект был обнаружен в 1956 г. Мейкледженом и Бином [M-B] в системе Co/CoO. Эффект обнаруживается по смещению



петли гистерезиса из симметричного положения относительно $H=0$ в сторону больших или меньших H , рис. 11.1. Природа эффекта состоит в следующем. При температуре больше температуры Нееля (T_N) антиферромагнетика (AFM), но меньше температуры Кюри (T_C) ферромагнетика (FM), антиферромагнетик находится в магнитно-разупорядоченном, а ферромагнетик в упорядоченном состоянии (рис.11.1а). При уменьшении температуры ниже T_N в присутствии поля H_c AFM упорядочивается, рис. 10.1в, и обменная связь через интерфейс обеспечивает эффективное магнитное поле. Это магнитное поле смещает петлю гистерезиса, как показано на рис. 10.1с,д,е.

В настоящее время, эффект играет большую роль в таких высокотехнологических устройствах как считывающие головки. Такие компании как IBM, Motorola и Самсунг активно работают над технологией MRAM (magnetic random access memories - магнитная память произвольного доступа) высокой плотности [1-Sch, 2-Naj]. Уже разработаны 4 Мбитные MRAM.

Обменно-связанные магнитомягкие подслои для сред хранения информации. В средах хранения информации отношение сигнал-к-шуму (SNR) растет как $N^{1/2}$, где N – число зерен на один бит информации, а также с уменьшением $M_r t$ среды, где M_r – остаточная намагниченность, а t – толщина магнитного слоя. При увеличении плотности записи размер бита становится настолько мал, что в отсутствии внешнего магнитного поля его магнитная энергия $K_u V$, где V – объем бита, уже не способна противостоять тепловым флуктуациям; магнитная информация стирается со временем [3-Rich, 4-Wel]. В качестве выхода было предложено использовать антиферромагнитную связь (antiferromagnetic coupling-AFC), чтобы увеличить эту стабильность и увеличить плотность продольной записи информации (т.е. способа записи и хранения информации с вектором намагничивания, ориентированном в плоскости диска-носителя) [5-Aba, 6-Ful].

В отличие от обычной однослойной среды-носителя в AFC-структуре предложено использовать два магнитных слоя: основной слой (1) и стабилизирующий слой (2), причем

произведение остаточной намагниченности M_r на толщину слоя t удовлетворяет условию $(M_r t)_2 > (M_r t)_1$. AFC оказывает стабилизирующее воздействие благодаря тому, что при этом: 1) уменьшается размагничивающее поле и 2) возрастает барьер перемагничивания бита. Слои с обменно-связанными чередующимися антиферромагнитными и ферромагнитными слоями исследуются в качестве претендентов на магнитомягкие подслои в перспективной системе с перпендикулярной ориентацией магнитных моментов. Исследовались системы многослойных структур $\text{FeTaN (20nm)}\text{-}[\text{IrMn(10nm)}\text{ – FeTaN(20 nm)}]_9$ под записывающим 45 нм-слоем CoCrTaPt и структуры стекло-Cu (20nm)-IrMn(10nm)[$\text{Co}_{35}\text{Fe}_{65}$ (50nm)-IrMn(10nm)]₄- $\text{Co}_{35}\text{Fe}_{65}$ (25nm) [7-Jung]. Мы будем рассматривать более детально структуры сред для магнитной записи и хранения информации в главе XIV.

Гигантское магнитное сопротивление. Эффект гигантского магнитосопротивления (giant magnetoresistive (GMR effect) был открыт в 1988 г. независимо двумя группами [8-Baibich, 9-Binasch] (Peter Gruenberg of the KFA research institute in Julich, Germany, and Albert Fert of the University of Paris-Sud). Гигантским эффектом называется поскольку он только гораздо больше, чем прежде наблюдавшийся эффект в металлах. Этот эффект вызвал большой интерес как со стороны физиков, так и со стороны технологов, поскольку он открывал не только новые страницы физики, но и обещал большие возможности приложений для магнитной записи и сенсоров. В настоящее время все современные дисководы магнитной записи используют эту технологию. Помимо этого – твердотельные компасы, сенсоры в автомобилестроении, неразрушаемая магнитная память, геологоразведка и т.д..

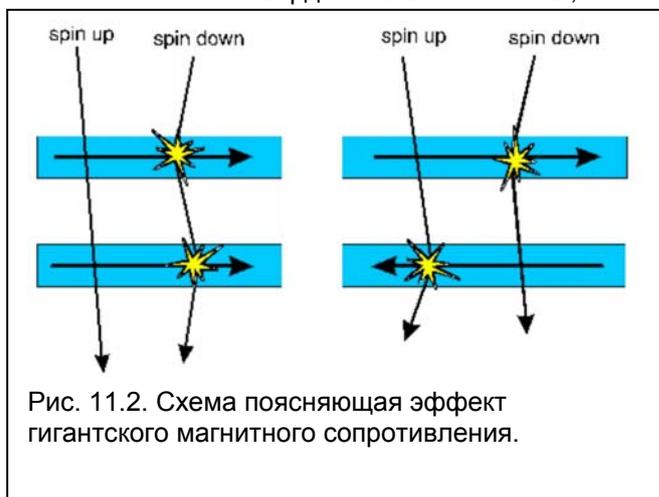


Рис. 11.2. Схема поясняющая эффект гигантского магнитного сопротивления.

магнитная память, геологоразведка и т.д..

Наиболее простая схема наблюдения эффекта состоит из двух магнетиков, разделенных изолирующим промежутком в несколько нм. Схема аналогична эксперименту с поляризованными пучками, где ориентированные параллельно поляризаторы пропускают свет, а перпендикулярно-ориентированные – нет. Как проиллюстрировано на рис. 11.2, первый магнитный слой пропускает электроны только в одном спиновом состоянии. Если магнитный момент во втором слое ориентирован параллельно, то тогда эти электроны легко проникают через структуру и сопротивление мало. Если же магнитный момент во втором слое не

выстроен параллельно, то оба электрон-спиновых состояния оказываются в невыгодном положении и сопротивление оказывается высоким. Максимальное сопротивление наблюдается для антипараллельной ориентации магнитных моментов.

На более строгом языке, обменное взаимодействие расщепляет структуру полос в зоне проводимости, так что вблизи поверхности Ферми плотность состояний электронов со спином «вверх» и «вниз» оказывается неодинаковой. Согласно «золотому правилу» Ферми, интенсивность рассеяния пропорциональна плотности состояний в конечном состоянии, так что скорость рассеяния для двух ориентаций спинов различна. Для получения параллельной ориентации моментов в двух ферромагнетиках достаточно приложить достаточное для насыщения поле. Для получения антипараллельного намагничивания используются три основных принципа: 1) антиферромагнитная связь, 2) различная коэрцитивность и 3) структура спинового диода с обменным смещением.

Антиферромагнитная связь. Первые наблюдения эффекта GMR были сделаны на монокристаллическом «сэндвиче» (100) Fe/Cr и сверхрешетке, выращенной с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ = MBE) в ультравысоком вакууме (UHV). Вскоре было установлено, что такими же свойствами обладают поликристаллические структуры, выращенные с помощью гораздо более простой техники – магнетронного распыления [3=Paq]. Кроме этого было установлено, что GMR может наблюдаться во многих многослойных системах с магнитными переходными элементами. Было установлено, что магнитные моменты в соседних Fe-слоях в многослойной структуре Fe/Cr/Fe с ориентацией (100) ориентируются антипараллельно, когда толщина слоев Cr составляет около 9 Å [10-Gru86]. Но по мере увеличения толщины немагнитного слоя знак обменной связи между двумя магнитными слоями осциллирует [11-Paq]: при некоторой толщине магнитные моменты в соседних ферромагнитных слоях вновь стремятся к противоположной ориентации. Прикладывая достаточно сильное магнитное поле, мы можем

заставить магнитные моменты ориентироваться вдоль поля. Осцилляторный характер связи оказался достаточно общим свойством почти всех многослойных систем, в которых немагнитные слои могут быть переходными металлами 3d, 4d, или 5d оболочек или благородным металлом [12-Par]. Период осцилляций варьируется от нескольких атомных слоев, типично 10 Å и до 20 Å. Только те многослойные структуры, для которых межслоевая связь является антиферромагнитной, демонстрируют GMR. Только в этих системах относительная ориентация магнитных моментов в соседних слоях может существенно меняться под действием приложенного магнитного поля.

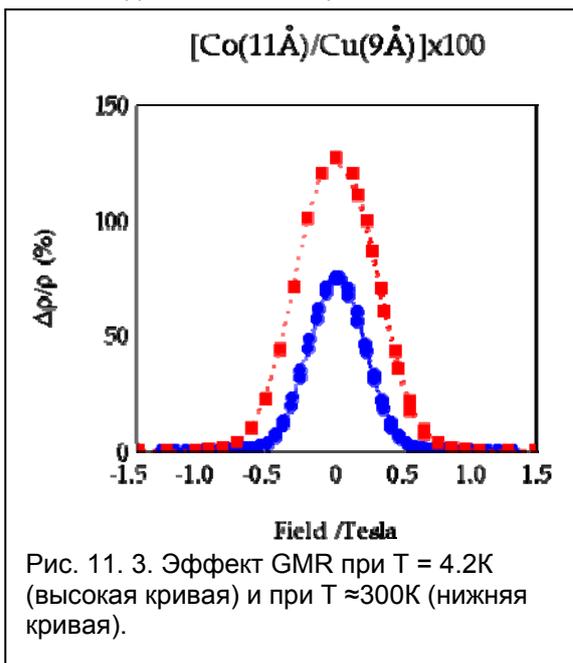


Рис. 11. 3. Эффект GMR при T = 4.2K (высокая кривая) и при T ≈ 300K (нижняя кривая).

Таким образом возникают два состояния с различным сопротивлением. Можно изготовить многослойную структуру, называемую *сверхрешеткой*, в которой магнитные и промежуточные слои повторяются многократно. Например, в Co/Cu – многослойной структуре получен сильный эффект GMR даже при комнатной температуре [13-Par, 14-Par] (более 110% [14-Par]). Каждый магнитный слой Co отделен от соседнего тонким слоем Cu. На рис. 11.3 изображены зависимости относительного сопротивления от величины внешнего магнитного поля для

промежуточного слоя Cu толщиной 9Å, где антиферромагнитная связь наиболее сильная. При нулевом магнитном поле сопротивление наиболее высокое, поскольку все Co- слои

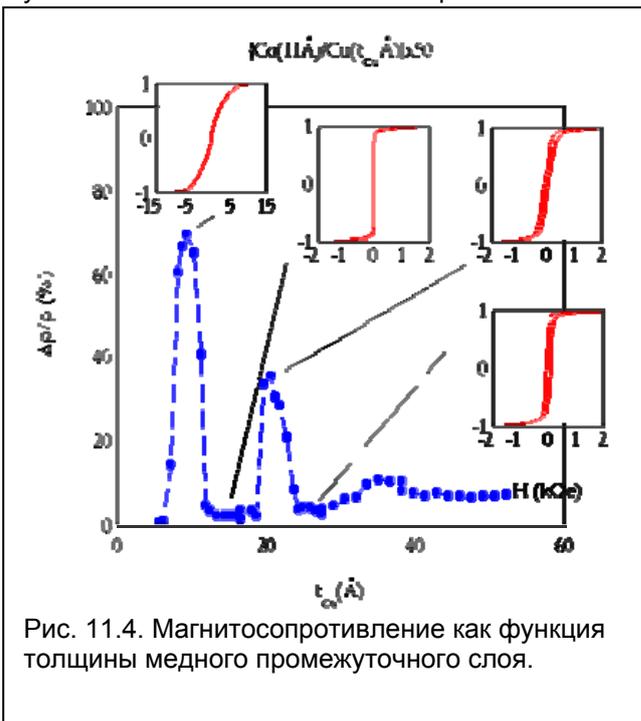


Рис. 11.4. Магнитосопротивление как функция толщины медного промежуточного слоя.

ориентированы антипараллельно, и сопротивление падает по мере увеличения поля и выстраивания спинов вдоль поля до полного насыщения. Квадраты (высокая кривая) измерена при T = 4.2K, нижняя кривая – при T ≈ 300K. Видно, что величина GMR составляет 75% при комнатной температуре и 130% при 4.2 K, т.е. существенно выше, чем собственное сопротивление материала, особенно при низких температурах. Зависимость GMR от толщины Cu слоя изображена на рис. 11.4. Видны 3 пика. При больших толщинах промежуточного слоя образец теряет межслоевую связь и небольшая случайная связь между слоями дает небольшой эффект GMR (3-й пик и выше). В то же время, когда имеется сильная ферромагнитная связь GMR=0. Можно заметить, что 1й пик находится на толщине Cu только 9Å – в то же время атом меди имеет диаметр 3Å. Осаждение такого сплошного слоя без пор стало возможным недавно благодаря последним достижениям технологии осаждения в сверхвысоком

вакууме (UHV). Данные на этом рисунке получены при комнатной температуре. На вставках показаны петли гистерезиса, полученные методом магнитооптического эффекта Керра (H в кЭ). Они демонстрируют различные виды связи при различных толщинах.

В то время как для проявления максимального GMR-эффекта необходимо около 20 кЭ, магнетосопротивление порядка 50-60% можно получить в полях порядка нескольких сотен эрстед и значения порядка 20% в полях порядка нескольких десятков эрстед. Для такого эффекта и толщины Cu могут быть больше. Большие значения магнетосопротивления при комнатной температуре делают такие многослойные структуры перспективными для множества технологических приложений.

Образцы, подобно этому, имеют наибольший GMR эффект поскольку *длина среднего свободного пробега* наибольшая для электронов, движущихся в ориентированных ферромагнетиках и минимальная в антиферромагнитно связанных слоях. Однако, для сенсоров такие системы не подходят, поскольку требуют слишком больших полей.

Использование различной коэрцитивности слоев. Если использовать два различных материала с различными переключающими полями, тогда, при включении реверсирующего поля один слой переключается раньше другого, мы имеем желаемую антипараллельную ориентацию. Контраст между слоями должен быть хорошим, однако, на практике большинство материалов не

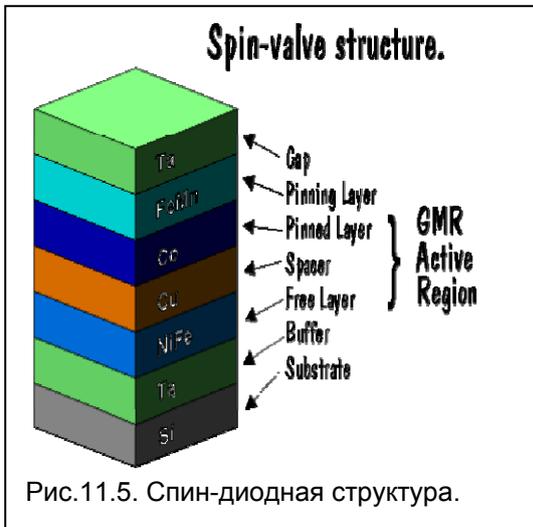


Рис.11.5. Спин-диодная структура.

переключаются достаточно резко, чтобы этот метод работал хорошо. Хорошие результаты получены с многослойными структурами $\{Co/Cu/Fe/Cu\}_xN$, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Такого типа структуры иногда называют «псевдо»-спиновыми затворами.

Обменное смещение-спиновый затвор (диод). В качестве примера на рис. 11.5 приведена спин-диодная структура, предложенная в качестве GMR сенсора магнитных полей [15-Die]. Принцип работы такой структуры состоит в том, что одна ее часть весьма чувствительна к внешним полям, другая, служащая магнитной системой отсчета, – не чувствительна. Такая структура дает биполярный сигнал высокой

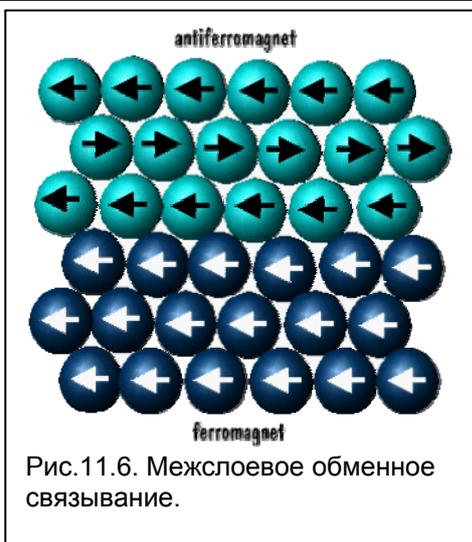


Рис.11.6. Межслоевое обменное связывание.

чувствительности в оптимизированном устройстве.

Основой структуры является обменная связь ферромагнетика с антиферромагнетиком. Антиферромагнитный слой FeMn, служащий опорным слоем, используется для ориентации слоя Co в определенном направлении. Магнитомягкий слой NiFe может быть ориентирован параллельно или антипараллельно воздействию слабого магнитного поля. Слои Co и NiFe разделяет слой Cu, достаточно толстый чтобы *устранить магнитную связь* между этими слоями. Слой Ta служит буфером (для лучших условий роста) и защитой от окисления поверхности. Толщина активной GMR области – около 100Å, толщина всей структуры – около 300Å, толщина Si-пластины на которую осаждается структура около миллиметра. Намагниченность в слое Co определяется намагниченностью последней плоскости антиферромагнетика FeMn и не подвержена влиянию слабых полей, действующих в этом направлении, рис. 11.6 и 11.1. Только преодолевая эффективное обменное магнитное поле можно реверсировать намагниченность в Co.

Применения GMR. Детектирование магнитных полей и устройств на этом принципе, например, детектирование вращающихся объектов. На этом принципе устроена система антиблокировки тормозов автомобиля. В этом случае магнитные поля могут быть достаточно большими. Для других применений, таких как

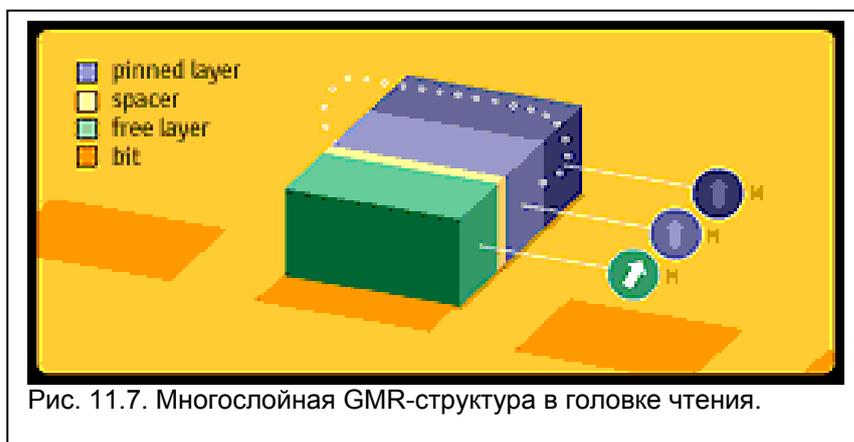


Рис. 11.7. Многослойная GMR-структура в головке чтения.

как детектирование считывающей головкой магнитных битов на жестком диске, рис. 11.7, должны использоваться материалы с сопротивлением, чувствительным к очень малым полям. Обычные материалы, такие как Ni-Fe изменяют сопротивление при комнатной температуре всего лишь несколько процентов в магнитных полях в несколько эрстед.

Многослойные структуры GMR могут иметь чувствительность до пяти раз более высокую, чем

обычные материалы. IBM начала поставку записывающих и считывающих головок на эффекте GMR в многослойных структурах в 1998 году.

Магнитные нанонити (1D системы).

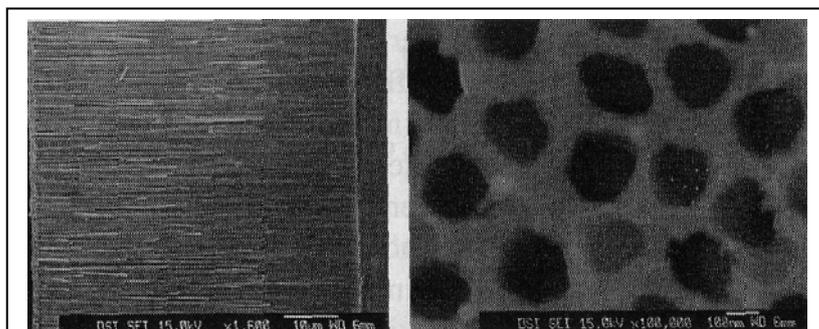


Рис.11.8. СЭМ изображения в поперечном сечении (а) и поверхности нанонити CoNiFe (электрохимическое осаждение через поры в мембране) [19-Han] .

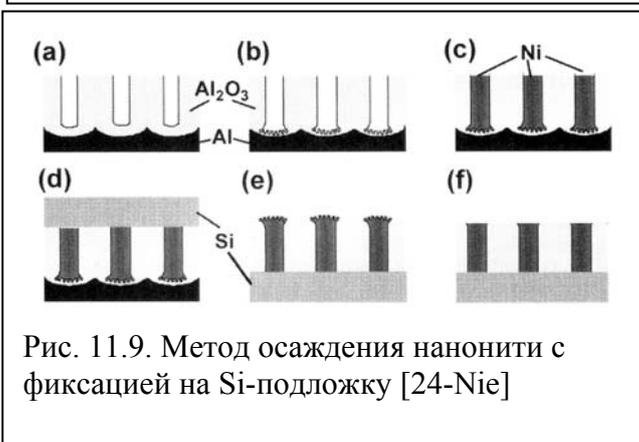


Рис. 11.9. Метод осаждения нанонити с фиксацией на Si-подложку [24-Nie]



Рис.11.10. Схема возможных конфигураций доменной стенки в магнитной проволоке.

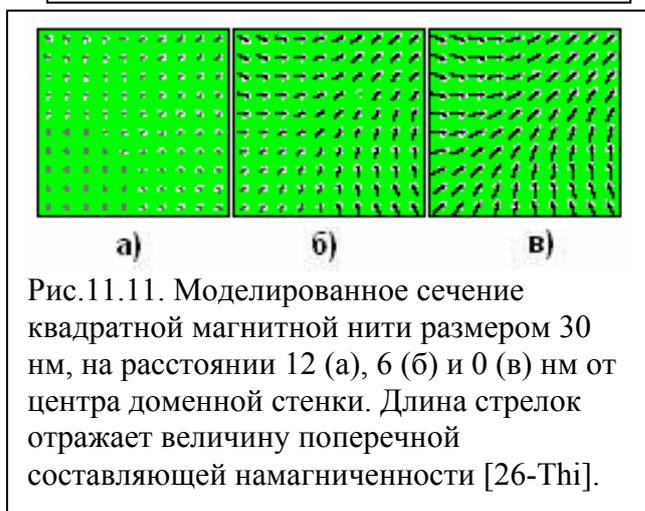


Рис.11.11. Моделированное сечение квадратной магнитной нити размером 30 нм, на расстоянии 12 (а), 6 (б) и 0 (в) нм от центра доменной стенки. Длина стрелок отражает величину поперечной составляющей намагниченности [26-Thi].

конфигурации, как изображено на рис. 11.11, который демонстрирует сложность этой конфигурации [26-Thi].

Уменьшение размерности, как мы видели на примере многослойных структур, приводит к качественно новым свойствам магнитных структур. Мы видели, что частицы малого размера становятся однодоменными (глава VIII) с большой коэрцитивной силой (глава VIII). Однако не только уменьшение размера, но и окружение (матрица) оказывает влияние на

магнитные свойства частицы [16-Kodama, 17-Jing].

Если многослойные структуры можно принимать за двумерные (2D) структуры, где 3-е измерение вырождено, либо в тонкий слой, либо в интерфейс, то проволоочные (или нитевые) структуры можно считать одномерными (1D). Такие структуры получают либо электрохимическим осаждением [18-Henry], в том числе через треки травления в полимерных мембранах [19-Han], осаждением на ступенчатую поверхность [20-Mat], с помощью литографических методов [21-Hehn, 22-Mor] либо резким охлаждением расплава во вращающейся жидкости [23-Rap]. Структура, получающаяся методом электрохимического осаждения через поры, приведена на рис. 11.8. На рис. 11.9 схематично изображен метод осаждения с

фиксацией на Si-подложку [24-Nie]. Благодаря анизотропии формы, вектор намагничивания лежит вдоль нити. Если поперечный размер нити (диаметр) меньше обменной длины, то в поперечном сечении нить будет иметь однодоменную структуру. В продольном направлении могут существовать мультидомены, создавая при этом доменные границы типа «лоб-в-лоб» (“head-to-head”), схематично изображенные на рис. 11.10. При этом, существование доменной стенки, а также сложная конфигурация размагничивающего поля нарушает одномерность, аналитический расчет является в этом случае достаточно грубым [25- Rie]. Необходимо выполнять численное моделирование микромагнитной

Применения. Массивы нанонитей являются перспективной средой для будущих технологий магнитной записи с перпендикулярной намагниченностью. Другой областью применений являются сенсоры. Недавно был обнаружен эффект спонтанного механического вращения аморфных проволок в высокочастотных магнитных полях [28-Chi,29-Cas]. Исследование влияния длины проволоки на возбуждающую частоту и появление вращения при высоких гармониках некоторых

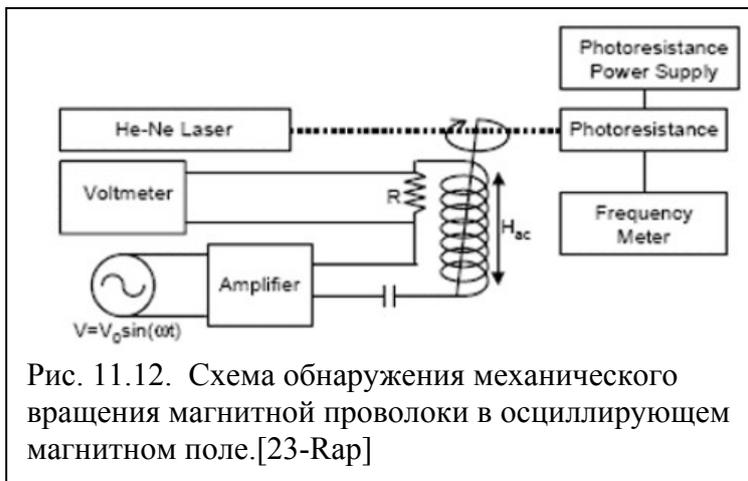


Рис. 11.12. Схема обнаружения механического вращения магнитной проволоки в осциллирующем магнитном поле.[23-Rap]

фундаментальных частот выявляет существование стоячих волн, находящихся в тесной корреляции с природой вращения. На рис. 11.12. показана схема наблюдения эффекта вращения. Результаты исследований [23-Rap] показывают, что эффект вращения появляется только в проволоках, имеющих достаточно большую константу магнитострикции. Когда устанавливается магнитоупругий резонанс, проволока начинает осциллировать, что проявляется в механическом вращении.

Цитированная литература

1. R.E. Scheuerlein, W.J. Gallagher, S.S.P. Parkin, C.A. Lee, S.T. Roy, R. Robertazzi, W.R. Reohr, *ISSCC Dig. Techn. Pap.* **43** (2000) 128; R.H.Kodama, *J. Magn. and Magn. Mater.* **200** (1999)359
2. P.K. Naji, M. Durlam, S. Tehrani, J. Calder, M.F. DeHerrera, *ISSCC Dig. Techn. Pap.* **44** (2001) 122
3. H.J. Richter *IEEE Trans Magn.*,v.**35**,(1999) p.2790
4. D.Weller and A Moser *IEEE Trans Magn.*,v.**35**,(1999) p.4423
5. E. N. Abarra et al, *Appl. Phys. Lett.* **77** (2000) p.2581
6. E.E. Fullerton et al *Appl.Phys.Lett* **77** (2000) p. 3806
7. H.S. Jung and W.D.Doyle, *IEEE Trans Magn.*,v.**38**,(2002) p.2015
8. M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, "Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices," *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).
9. G. Binasch, P. Grunberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, "Enhanced Magnetoresistance in Layered Magnetic Structures with Antiferromagnetic Interlayer Exchange," *Phys. Rev. B* **39**, No. 7, 4828 (1989).
- 10.P. Grunberg, R. Schreiber, Y. Pang, M. B. Brodsky, and H. Sowers, "Layered Magnetic Structures: Evidence for Antiferromagnetic Coupling of Fe Layers Across Cr Interlayers," *Phys. Rev. Lett.* **57**, No. 19, 2442 (1986).
- 11.S. S. P. Parkin, N. More, and K. P. Roche, "Oscillations in Exchange Coupling and Magnetoresistance in Metallic Superlattice Structures: Co/Ru, Co/Cr, and Fe/Cr," *Phys. Rev. Lett.* **64**, 2304 (1990).
- 12.S. S. P. Parkin, "Systematic Variation of Strength and Oscillation Period of Indirect Magnetic Exchange Coupling Through the 3d, 4d and 5d Transition Metals," *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3598 (1991).
- 13.S. S. P. Parkin, R. Bhadra, and K. P. Roche, "Oscillatory Magnetic Exchange Coupling Through Thin Copper Layers," *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2152 (1991).
- 14.S. S. P. Parkin, Z. G. Li, and D. J. Smith, "Giant Magnetoresistance in Antiferromagnetic Co/Cu Multilayers," *Appl. Phys. Lett.* **58**, 2710 (1991); S. S. P. Parkin, "Origin of Enhanced Magnetoresistance of Magnetic Multilayers--Spin-Dependent Scattering from Magnetic Interface States," *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1641 (1993).
- 15.B. Dieny, V. S. Speriosu, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit, and D. Mauri, "Giant Magnetoresistance in Soft Ferromagnetic Multilayers," *Phys. Rev. B* **43**, 1297 (1991).
- 16.R.H.Kodama, *J. Magn. and Magn. Mater.* **200** (1999)359
- 17.S. Jing, et al, *Science* **271** (1996) 937
- 18.Y.Henry, et al., *Eur.Phys.J. B* **20** (2001) 35.
- 19.G.C. Han, et al, *IEEE Trans. Magn.*, **38** (2002) 2562
- 20.K.Matsuyama, S. Komatsu, Y.Nozaki, *J. Appl. Phys.* **87** (2000) 4724;
- 21.M. Hehn et al, *Sci.* **272** (1996) 1872
- 22.R. Morales et al, *IEEE Trans. Magn.*, **38** (2002) 2565
- 23.V. Raposo, C. Luna, M. V!azquez, *J. of Magn. Magn. Mater.* **242-245** (2002) 1431-1434
- 24.K. Nielsch et al , *IEEE Trans. Magn.*, **38** (2002) 2571
- 25.H.Riedel, A.Seeger, *Phys. Stat. Sol.B* **46** (1971) 377.
- 26.A.Thiaville et al. *J. Magn. and Magn. Mater.***242-245** (2002) 1061-1063
- 27.W.H. Meiklejohn and C.P. Bean, *Phys.Rev.* **102** (1999)p.203

28.H. Chiriac, C.S. Marinescu, T.-A. Ovtari, IEEE Trans. Magn. 33 (1997) 3349

29.F.J. Castano, M. Vázquez, D.-X. Chen, M. Tena, C. Prados, E. Pina, A. Hernando, G. Rivero, Appl. Phys. Lett. 75 (1999) 2117

Вопросы

1. В чем состоит и какова природа обменного смещения?
2. В чем состоит эффект гигантского магнитного сопротивления?
3. В чем состоит эффект осцилляторного поведения антиферромагнитной связи в многослойных магнитных системах? Когда он наблюдается?
4. Пояснить эффект антипараллельной ориентации магнитных моментов при разной коэрцитивности в соседних магнитных слоях?
5. Поясните структуру спинового диода.
6. Где используется GMR?
7. Метод(ы) получения нанонитей.