

## ПРЯМОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ПЕРЕОРИЕНТАЦИОННЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В АНТИФЕРРОМАГНИТНОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ $\text{CoNiCu}/\text{Cu}$

*Л.М.Дедух<sup>1)</sup>, В.С.Горнаков, Ю.П.Кабанов, В.И.Никитенко*

*Институт физики твердого тела РАН  
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 31 октября 1996 г.

С использованием магнито-оптического метода визуализации полей рассеяния изучены особенности протекания индуцированных внешним магнитным полем фазовых превращений и соответствующие им взаимные переориентации спинов в ферромагнитных  $\text{CoNiCu}$  слоях многослойной пленки, связанных антиферромагнитным обменным взаимодействием через немагнитные  $\text{Cu}$  прослойки. Установлено, что процесс перемагничивания этого нанокompозитного материала осуществляется ориентационным фазовым переходом типа спин-фlop за счет образования и движения специфических доменных границ, а также некогерентным поворотом спинов к приложенному полю. Показано, что в зависимости от направления внешнего магнитного поля относительно легкой оси в результате таких превращений возникают и несимметричные угловые фазы.

PACS: 75.50.Ee, 75.70.-i

Успехи в синтезе нанокompозитных тонкопленочных материалов, обладающих рядом уникальных свойств, стимулировали мощный всплеск активности в различных областях физики и открыли новые направления в исследованиях поверхностного, межповерхностного и тонкопленочного магнетизма [1–3]. Было обнаружено, в частности, что в магнитных сверхрешетках, состоящих из тонких ферромагнитных и немагнитных слоев, характер обменного взаимодействия между магнитными слоями осциллирует с изменением толщины немагнитных прослоек от ферромагнитного к антиферромагнитному. В последнем случае основному состоянию системы соответствует антипараллельная ориентация спинов в соседних магнитных слоях. Перемагничивание таких материалов характеризуется весьма специфическими петлями гистерезиса и может быть описано [4] в терминах ориентационных фазовых превращений первого и второго рода, обусловленных спин-флип и спин-фlop процессами [5]. К настоящему времени уже выполнено большое число работ, основанных на измерении макроскопических характеристик таких искусственно созданных антиферромагнетиков. По этим характеристикам анализировали спин-переориентационные фазовые переходы. Экспериментальные исследования, однако, еще не доведены до уровня прямого изучения в режиме реального времени кинетики их протекания, типа возникающих фаз, процессов зарождения и смещения доменных границ, а также вращения магнитных моментов в соседних слоях.

Недавно было показано [6], что такие исследования могут быть проведены с помощью новой магнито-оптической методики, в которой для выявления состояния магнитной структуры и ее изменения в процессе перемагничивания непрозрачного магнетика используется индикаторная феррогранатовая пленка с осью легкого намагничивания, лежащей в плоскости пленки. Она располагается непосредственно на исследуемом образце. Магнитостатические поля рассеяния над его поверхностью вызывают отклонения магнитных моментов в индикаторной пленке от ее плоскости. Возникающая вертикальная компонента

<sup>1)</sup>e-mail: dedukh@issp.ac.ru

выявляется в отраженном поляризованном свете по двойному эффекту Фарадея, поскольку отражение светового пучка происходит от нижней поверхности пленки, покрытой тонким слоем алюминия. Такой метод отличается простотой и высокой чувствительностью, обеспечивает неразрушающий контроль качества материала и наблюдения изменений магнитной структуры в режиме реального времени.

В настоящей работе этот метод применен для последовательного изучения спин-переориентационных фазовых переходов в антиферромагнитной многослойной системе  $\text{Co}_{64}\text{Ni}_{31}\text{Cu}_5/\text{Cu}$ , состоящей из 200 би-слоев. Они выращивались на медной подложке, ограниченной плоскостями  $\{100\}$ , методом электроосаждения [7]. Толщина ферромагнитных слоев равнялась 2 нм, а немагнитных медных – 1 нм. Как уже сообщалось [8], исследуемая система с указанными параметрами характеризуется гигантским магнитосопротивлением, что давало основание полагать, что между магнитными слоями в ней действуют антиферромагнитные обменные взаимодействия.

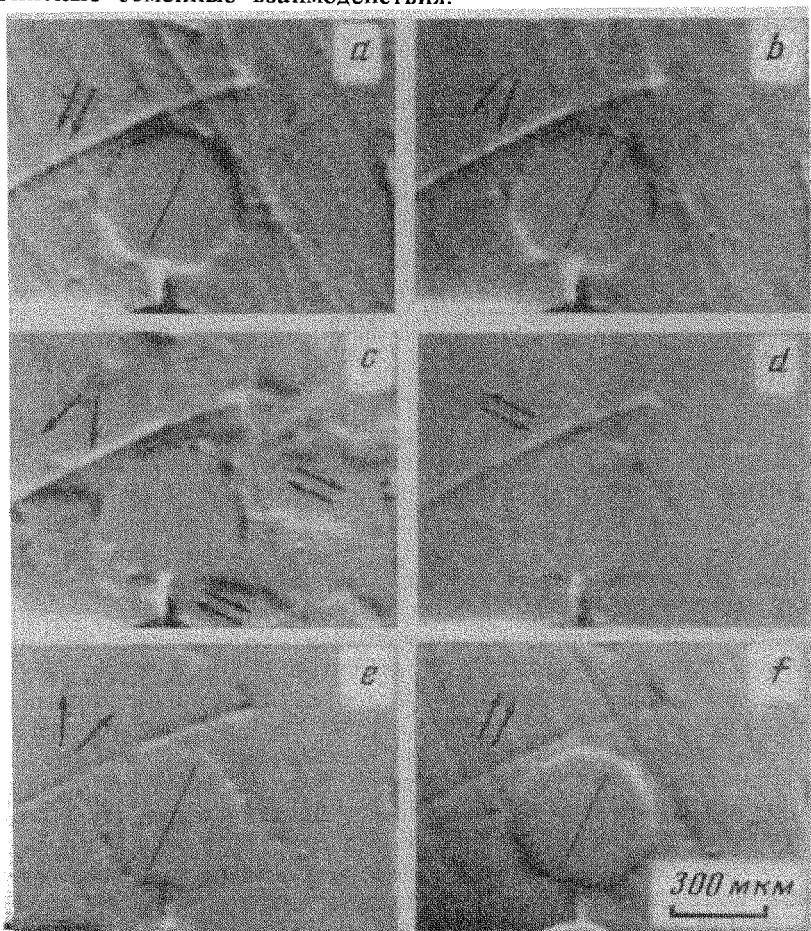


Рис.1. Магнито-оптическое изображение полей рассеяния, возникающих вблизи краев дырки в многослойной пленке при ее перемагничивании вдоль направления легкой оси: *a* –  $H = +21$  МТл, *b* –  $-4.2$ , *c* –  $-5.5$ , *d* –  $-6.3$ , *e* –  $-10.5$ , *f* –  $-21$ . Стрелками указаны направления намагниченностей в подрешетках. Тонкие линии обозначают ось симметрии изображения дырки

Для проведения последовательного контроля за состоянием намагниченности в многослойной пленке, помещенной в перемагничивающее ее магнитное

поле, в ней высверливалось небольшое отверстие. Возникающие на его краю магнитостатические поля рассеяния (рис.1а) дают информацию о состоянии намагниченности в объеме исследуемого образца. Максимальный черно-белый контраст изображения при слегка раскрещенных поляризаторах возникает на противоположных краях отверстия, перпендикулярных векторам намагниченности. Края, параллельные этим векторам, практически не дают полей рассеяния. В участках образца, расположенных вдоль "черных" краев, магнитный поток выходит из образца, а вдоль "белых" – входит в него. Таким образом, при однородной намагниченности образца ось симметрии изображения обусловленного отверстием магнитостатических полей (показана на рисунках тонкой линией) совпадает с направлением результирующего магнитного момента. При высверливании миниатюрного отверстия его форма и края не получаются идеальными. Их искажения вызывают дополнительные мелкошабные изменения интенсивности в изображении полей рассеяния. На рис.1а также выявились поля рассеяния, связанные с дефектами структуры, в том числе с царапинами.



Рис.2. Доменные границы, возникшие в процессе спин-переориентационного фазового перехода

Кинетика перемагничивания исследованной многослойной структуры существенно зависела от направления действия внешнего поля ( $H$ ). Рис.1 иллюстрирует характер изменения полей рассеяния, возникающих вблизи отверстия при перемагничивании образца, предварительно намагниченного до насыщения вдоль направления легкой оси. Вначале, по мере уменьшения  $H$  до нуля, инвертирования его знака и последующего увеличения, наблюдалось только слабое уменьшение черно-белого контраста (рис.1б). При достижении поля некоторой критической величины обнаруживалось возникновение доменов, как правило, вблизи краев образца и вокруг дефектов его структуры. На рис.1с такие домены видны вблизи дырки. В более крупном плане они показаны на рис.2. Домены новой фазы вырастали, обметая весь объем образца, в очень узком диапазоне значений  $H$ . Рис.1д получен сразу же после завершения процессов смещения. На этой стадии перемагничивания практически исчезают поля рассеяния (они видны лишь вблизи дефектов, где, очевидно, нарушены условия для существования антиферромагнитных обменных взаимодействий). Этот факт является важным аргументом в пользу того, что в исследуемой многослойной пленке действуют антиферромагнитные обменные взаимодействия между магнитными слоями, поскольку в ферромагнитном образце после полного завершения процессов смещения доменных границ формируется однодоменное, а не размагниченное, состояние.

При дальнейшем росте  $H$  магнито-оптический контраст изображения отверстия возникает вновь и усиливается. Однако окраска краев меняется на противоположную. Положение оси его симметрии остается прежним. Это показывает, что появляющийся суммарный магнитный момент ориентирован в направлении, противоположном исходному. Очевидно, что он возникает и

растет с полем за счет одновременного разворота спинов в обеих подрешетках к направлению действия  $H$  (рис.1e). Это свидетельствует и о том, что за счет процессов рождения и роста доменов происходил неоднородный спин-переориентационный фазовый переход (СПФП) типа спин-флоп [4]. Направления намагниченностей в подрешетках в образующейся при этом коллинеарной фазе показаны на рис.1c и d антипараллельными стрелками.

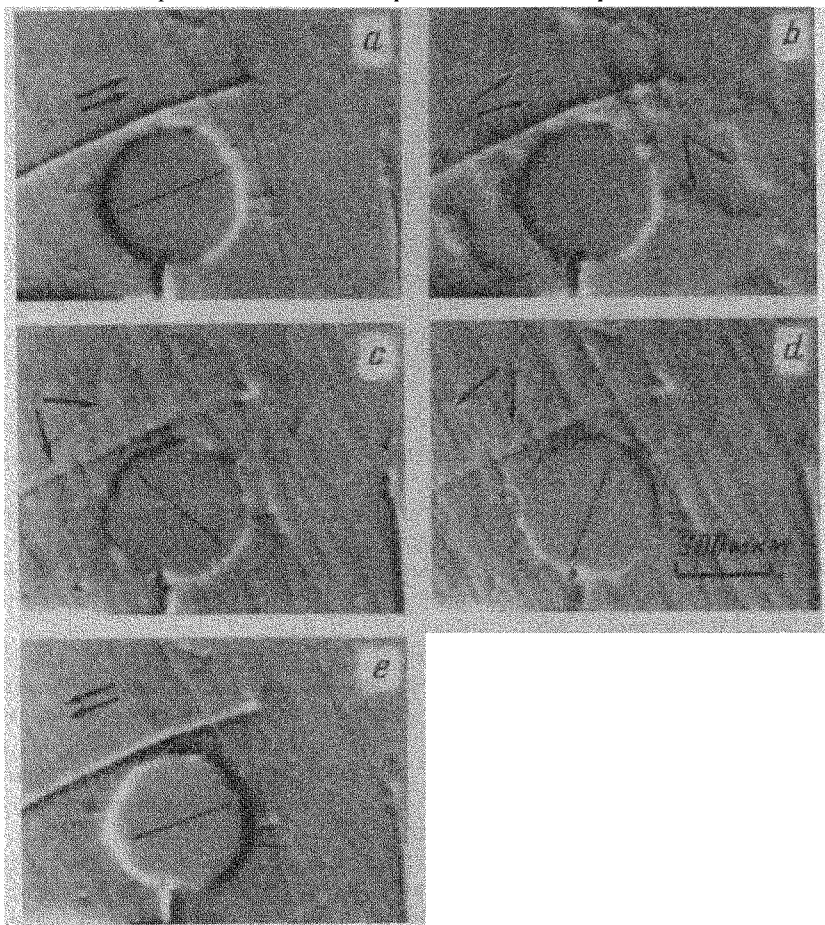


Рис.3. Магнито-оптические изображения полей рассеяния на разных этапах перемагничивания пленки в направлении, совпадающем с ориентацией стрелок  $e$ :  $a-H = +21$  мТл,  $b--7.2$ ,  $c--13.4$ ,  $d--14.7$ ,  $e--21$

Таким образом, при уменьшении внешнего поля от насыщающих значений параллельность намагниченностей в подрешетках нарушается, начинает формироваться угловая фаза. При дальнейшем снижении  $H$  угол между спинами в соседних слоях растет. Этот процесс продолжается даже после инвертирования знака внешнего поля и его дальнейшего увеличения вплоть до некоторой критической величины, при которой зарождается и начинает расти за счет движения доменных границ новая коллинеарная фаза (рис.1b). Антипараллельное расположение спинов в подрешетках (рис.1d) реализуется в узком диапазоне  $H$  неоднородным СПФП типа спин-флоп. При дальнейшем росте  $H$  угловая фаза образуется вновь. Угол между намагниченностями в подрешетках начинает уменьшаться от  $180^\circ$  до нуля, когда спины в состоянии насыщения в каждом слое ориентируются вдоль внешнего поля.

При отклонении  $H$  от оси легкого намагничивания даже на малые углы ( $\leq 5^\circ$ ) характер ориентационных фазовых превращений качественно изменяется. Рис.3 демонстрирует характер изменения полей рассеяния вблизи дырки в процессе перемагничивания образца в направлении, не совпадающем с легкой осью (оно противоположно ориентации стрелок на рис.3а). На первом этапе вплоть до начала процессов зарождения и смещения доменных границ картина подобна описанной выше. Возникновение доменов новой фазы вблизи дырки зафиксировано на рис.3б. Однако после завершения процессов смещения обнаруживается, что ось симметрии изображения дырки не сохранила свою ориентацию (как на рис.1), а повернулась относительно исходной почти на  $70^\circ$  (рис.3с). Это означает, что в образовавшейся фазе появилась компонента суммарного магнитного момента, перпендикулярная исходной. Кроме того, черно-белый контраст на краях дырки рис.3с значительно слабее по сравнению с исходным (рис.3а). Эти данные указывают на то, что в результате неоднородного СПФП, произошедшего за счет процессов формирования и смещения доменных стенок, образуется несимметричная угловая фаза по отношению к направлению  $H$  (см. расположение стрелок на рис.3с). Подобные описанным несимметричные фазы в антиферромагнитных сверхрешетках предсказывались теоретически для случая перемагничивания их за счет однородного вращения спинов [4].

По мере дальнейшего роста  $H$  происходит усиление интенсивности полей рассеяния и разворот оси симметрии изображения дырки к направлению внешнего поля (рис.3д). На этой стадии намагничивания происходит одновременно увеличение угла между спинами в подрешетках и совместный их разворот таким образом, что биссектриса угла между ними приближается к направлению  $H$ . В насыщенном состоянии (рис.3е) ось симметрии изображения дырки совпадает с исходной (рис.3а), а обе подрешетки намагничены в противоположном направлении.

При действии поля вдоль трудного (перпендикулярного легкому) направления намагничивания положение оси симметрии изображения дырки не изменялось, происходило только постепенное изменение черно-белого контраста на бело-черный. Образование и рост крупномасштабных доменов, подобных описанным выше, не обнаруживались. В этом случае, очевидно, происходило только монотонное вращение спинов, обеспечивавшее изменение угла между намагниченностями подрешеток от  $0$  до  $360^\circ$ .

Таким образом, прямое экспериментальное изучение процессов перемагничивания позволило проследить за относительной ориентацией спинов в подрешетках антиферромагнитной сверхрешетки на всех стадиях ее перемагничивания и идентифицировать коллинеарные и угловые фазы различных типов, возникающие в результате зарождения и смещения доменных границ при различных направлениях магнитного поля относительно легкой оси.

Авторы благодарят Л.Беннетта, С.Хуа и Д.Лашмора за предоставление образцов для исследования. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант 94-02-03815.

1. L.M.Falicov, D.T.Pierce, S.D.Bader et al., *J. Mater. Res.* **5**, 1299 (1990).
2. *Ultrathin Magnetic Structures*, Eds. J.A.C.Bland and B.Hienrich, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
3. A.Fert, P.Grunberg, A.Barthelemy et al., *J Magn. Mater.* **1-8**, 140 (1995).
4. B.Dieny, J.P.Gavigan, and T.P.Reboullat, *J. Phys. Condens. Matter.* **2**, 159 (1990).
5. К.П.Белов, А.К.Звездин, А.М.Кадомцева, Р.З.Левитин, *Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках*, М.: Наука, 1979.
6. L.H.Bennett, R.D.McMichael, L.J.Swartzendruber et al., *Appl. Phys. Lett.* **66**, 888 (1995).
7. M.Altper, K.Attenborough, and R.Hart, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 2144 (1993).
8. S.Z.Hua, D.S.Lashmore, L.Salamanca-Riba et al., *J. Appl. Phys.* **76**, 6519 (1994).