

## ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ДИСПЕРСИЕЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ В СВЕРХРЕШЕТКЕ Co/Ag

Л.М.Дедух<sup>1)</sup>, В.Н.Матвеев\*, В.И.Никитенко

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

\* Институт проблем технологии микроэлектроники РАН  
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 5 апреля 2000 г.

После переработки 11 апреля 2000 г.

Обнаружено, что перемагничивание набора супертонких пленок Co, связанных обменным ферромагнитным взаимодействием через слои Ag, может протекать с образованием не предсказывавшегося нового типа доменной структуры. За счет некогерентного разностороннего вращения спинов при уменьшении поля, перпендикулярного легкой оси, в образце сначала формируются специфические макродомены. Их разделяет не неелевская стенка, а широкая переходная область, содержащая высокую плотность микродоменов, размер которых коррелирует с размером зерен в пленках. Дальнейшее перемагничивание протекает благодаря зарождению обычных доменных границ в макродомене в магнитостатическом поле на краю пластины и их смещению в направлении переходной области. Приведено объяснение этих процессов с учетом характера выявленной дисперсии магнитной анизотропии.

PACS: 75.70.Ch

Как известно, реальные магнетики всегда содержат дефекты кристаллической решетки, с которыми связаны внутренние микронапряжения и микроразориентации в образце. Они могут складываться, образуя еще и макронапряжения, уравновешенные на расстояниях порядка размера образца, или формируя разориентации макроскопических объемов кристалла – разнообразные границы зерен, текстуры. В слоистых системах макронапряжения и кристаллографические разориентации зачастую неизбежно возникают из-за разницы параметров решеток соседних слоев. Все это приводит к разориентации осей легкого намагничивания (ОЛН) в разных участках кристалла, дисперсии анизотропии различной масштабности. Ее влияние на характеристики гистерезисных петель начали изучать уже давно [1].

В последние годы обозначился повышенный интерес к изучению многослойных пленок, в которых чередуются прослойки с различным магнитным порядком. Они могут обладать рядом уникальных, используемых для решения важнейших практических задач, свойств (гигантским магнитосопротивлением, однонаправленной анизотропией и т.д.), которые в значительной степени определяются особенностями поведения доменной структуры [2–4]. Эти особенности решающим образом зависят от характера поля анизотропии. Поэтому одной из важнейших проблем в этой бурно развивающейся области фундаментальных и прикладных исследований является получение сведений о влиянии дисперсии анизотропии на элементарные акты процессов намагничивания многослойных структур. Ниже представлены результаты такой работы.

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

Одномерная сверхрешетка, состоящая из 150 чередующихся между собой слоев Co и Ag толщиной  $9 \text{ \AA}$  каждый, была выращена на установке ALCATEL при давлении  $Ag \cdot 10^{-5}$  мбар методом магнетронного (Co) и катодного (Ag) распыления на  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  подложке при 77 К. Доменная структура исследовалась с помощью техники магнитооптических индикаторных пленок (МОИП) [5]. В качестве индикаторной использовалась феррогранатовая монокристаллическая пленка с намагниченностью, лежащей в ее плоскости. Она располагалась непосредственно на исследуемом образце. Поля рассеивания на его краях, доменных стенках и дефектах решетки вызывали локальные отклонения намагниченности из плоскости индикаторной пленки, которые выявлялись за счет двойного эффекта Фарадея в поляризованном свете, отраженном от ее нижней поверхности, покрытой алюминием.

Перемагничивание сверхрешетки Co/Ag в разных направлениях показало, что она обладает своеобразной, но четко выраженной одноосной анизотропией: ее дисперсия определяла стохастические отклонения ОЛН в микрозернах на малые углы (до  $\sim 2^\circ$ ), а также дополнительно плавный разворот легкой оси (в пределах  $14^\circ$ ) вдоль всего исследованного образца сверхрешетки размером 2 мм. Образец, намагниченный до насыщения в направлении ОЛН, после снятия внешнего поля оставался монодоменным. При дальнейшем инвертировании знака внешнего поля ( $H$ ) на краях образца в области максимальных магнитостатических полей зарождались доменные стенки (рис.1а), при смещении которых перемагничивался весь образец. Возникающие доменные стенки имели криволинейную форму, что обусловлено макроскопической дисперсией анизотропии. Когда  $H$  отклонялось от ОЛН, все возрастающую роль начинали играть процессы вращения намагниченности ( $M$ ), и поэтому взаимное расположение  $M$  в доменах постепенно изменялось (рис.1б). Существенно изменялись при этом и направление вытянутости клиновидных доменов и кривизна разделяющих их доменных стенок.

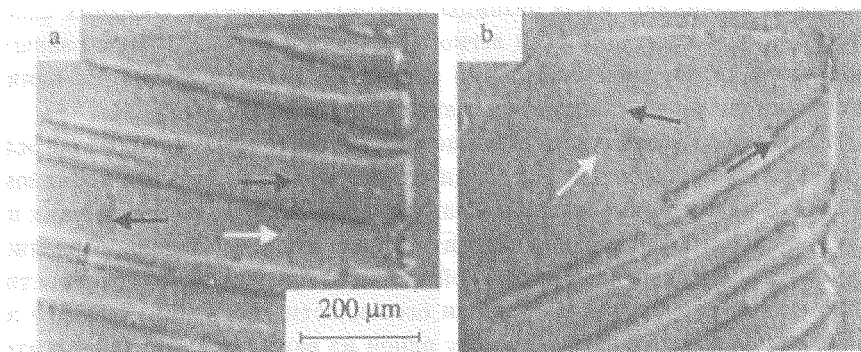


Рис.1. Доменные структуры, возникшие при перемагничивании сверхрешетки Co/Ag в инвертированном поле, действующем вдоль ОЛН (а –  $H = -40 \text{ Э}$ ) и под углом в  $45^\circ$  к ней (б –  $H = -45 \text{ Э}$ ). Белая стрелка указывает направление инвертированного поля. Черная стрелка здесь и ниже указывает направление намагниченности

Иной тип доменной структуры возникал при перемагничивании сверхрешетки Co/Ag в направлении оси трудного намагничивания (ОТН), перпендикулярного ОЛН. На рис.2,а-с показаны особенности такого процесса в одном из ее углов. Рис.2а иллюстрирует его магнитооптическое изображение в условиях намагниченности до насыщения в направлении ОТН, параллельной вертикальной рамке рисунка. Горизонтальная темная полоса связана с магнитостатическими полями, возникшими на перпендикулярном к  $M$  крае образца и выявленными за счет эффекта Фарадея при слегка раскращенных николях микроскопа. Параллельный к  $M$  вертикальный край сверхрешетки не проявляется на рис.1а. Характер изменения контраста изображения магнитостатических полей на краях образца и в его центральных участках, происходящего при уменьшении  $H$  (рис.2b), свидетельствует о протекании процесса некогерентного вращения векторов  $M$ . Оно приводило к формированию микродоменной структуры (рис.2с), разительно отличающейся от описанной выше обычной структуры с краевыми доменами, разделенными стенками, примеры которых показаны на рис.1. Размер образующихся микродоменов коррелирует с размером зерен ячеистой субструктуры сверхрешетки, которая легко выявлялась в отраженном от поверхности сверхрешетки свете. При последующем инвертировании знака  $H$  и его увеличении наблюдалось постепенное исчезновение магнитооптического контраста, связанного с микродоменами. На рис.2d представлено изображение сверхрешетки, намагниченной в направлении, обратном показанному на рис.2а.

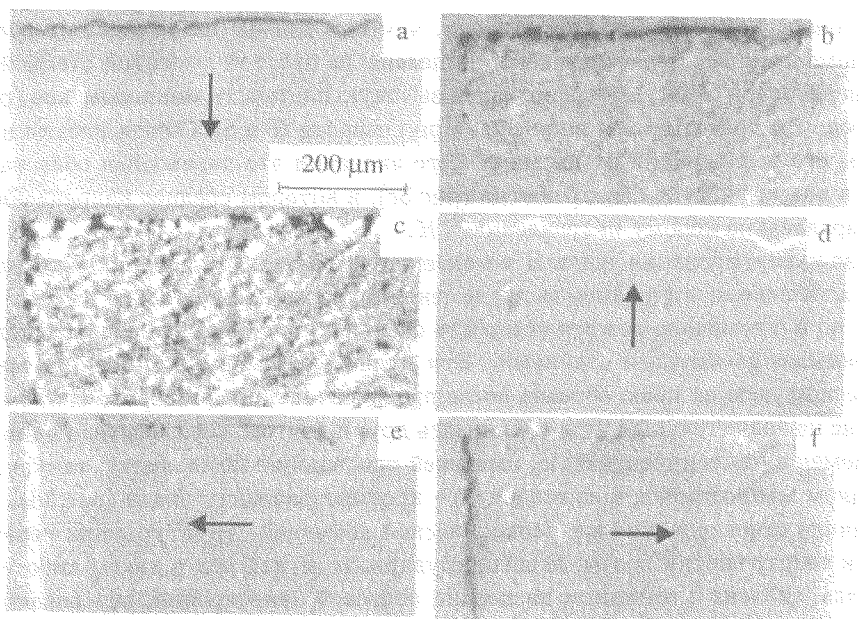


Рис.2. Магнитооптическое изображение сверхрешетки Co/Ag, намагниченной до насыщения вдоль среднего направления ОТН (а -  $H = 200$  Э, d -  $H = -200$  Э), в слабом поле (b -  $H = 40$  Э) и после его выключения (с); e,f - фотографии, полученные после выключения поля ( $H = -200$  Э), предварительно повернутого от средней ОТН на  $-1^\circ$  (e) и  $+1^\circ$  (f)

Когда  $H$  отклонялось от ОТН на углы, превосходящие  $\pm 1^\circ$ , то при уменьшении его величины происходило когерентное вращение намагниченности по ходу часовой стрелки или против него в этом участке образца, которое вызывало появление полей рассеивания и возрастающего однородного магнитооптического контраста на вертикальном крае сверхрешетки. Такой однородный разворот  $M$  приводил систему при уменьшении поля до нуля к ее однородному намагничиванию параллельно ОЛН (рис.2e,f).

Решающее влияние на формирование описанной микродоменной структуры в процессе перемагничивания сверхрешетки вдоль ОТН оказывает мелкомасштабная дисперсия анизотропии, обусловленная стохастическими слабыми (в пределах одного градуса) отклонениями направлений ОЛН в зернах многослойки от среднего направления, задаваемого наведенной ростовой анизотропией. При действии  $H$  вдоль ОТН перемагничивание осуществлялось за счет разностороннего вращения  $M$  в зернах, в которых направления ОЛН были развернуты в противоположные стороны от направления внешнего магнитного поля. При этом формировались микродомены.

Плавное и значительное (до  $14^\circ$ ) изменение ориентации легкой оси вдоль всего образца в направлении усредненной ОЛН приводило при перемагничивании образца в перпендикулярном направлении к возникновению весьма необычной не рассматривавшейся теоретически доменной структуры. Помимо микродоменной структуры в участках кристалла, где локальные ОТН отклонялись от  $H$  на небольшие углы (до  $1^\circ$ ) разного знака, в соседних больших объемах образца за счет квазиоднородного, но противоположно направленного вращения  $M$  формировались также макроскопические домены (рис. 3b). В каждом из них локальные ОТН были отклонены на углы одного знака, но тем в большей степени, чем они дальше находились от области с микродоменами. Макродомены были разделены не простой доменной стенкой, а широкой переходной областью, содержащей высокую плотность микродоменов (рис.3b), таких же, что представлены на рис.2с. При повороте  $H$  в плоскости пленки и последующем его уменьшении от насыщающего значения эта переходная область выявлялась в новом участке сверхрешетки (рис.3с), в котором среднее направление ОТН было параллельно новому направлению<sup>2)</sup>  $H$ .

После инвертирования знака  $H$  в медленно возрастающем поле противоположной полярности перемагничивание макродоменов происходило не только за счет вращения  $M$ , но и с помощью рождения и роста обычных клиновых доменов, разделенных заряженными доменными стенками. Эти клиновые домены возникали в магнито-статическом поле на краю образца после предварительного разворота спинов в макродомене на значительный угол и, сливаясь друг с другом, образовывали один новый макродомен с намагниченностью, имеющей продольную компоненту, такую же как в исходном макродомене, а нормальную – противоположного знака (рис.3d).

Причина формирования макроскопической доменной структуры при перемагничивании сверхрешетки полем, перпендикулярным легкой оси в каком-либо участке кристалла, связана с влиянием дисперсии ростовой анизотропии, обуславливающей

<sup>2)</sup> Таким образом, представлялось возможным, контролируя угол поворота  $H$ , не только измерять угол "скоса" ОЛН, но и определять расположение направлений ОЛН в плоскости сверхрешетки. В частности, в исследованном образце постепенное перемещение переходной области между макродоменами по всему образцу (размером 2мм) соответствовало повороту  $H$  на  $14^\circ$ . Угол между усредненными направлениями ОЛН в показанных на рис.3b и 3с участках соседних макродоменов равен  $176^\circ$ .

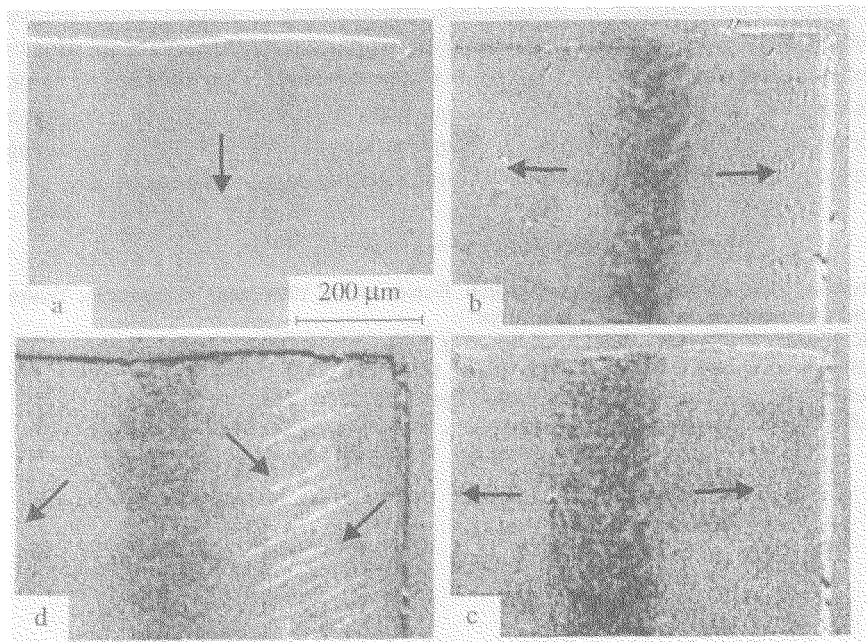


Рис.3. Фотографии сверхрешетки с градиентом угла скоса ОЛН, намагниченной вдоль средней ОТН (а -  $H = 800$  Э) и после выключения поля (b); с - изменение распределения намагниченности, происшедшее после выключения поля, предварительно повернутого на  $+1^\circ$  от исходного направления; d - доменная структура, образованная после последующего инвертирования знака поля ( $H = -60$  Э)

плавное изменение ориентации ОЛН вдоль всего исследованного образца. В описанном случае измеренные углы между легкими осями в центре образца и на его краях были равны  $\pm 7^\circ$ . При отклонении  $H$  от среднего направления ОТН более чем на  $\pm 7^\circ$  макродомены с необычной переходной областью между ними не возникали. Весь образец перемагничивался за счет протекания процессов вращения  $M$ , зарождения и роста доменов, разделенных обычными доменными стенками (см. рис.1).

Известно, что при уменьшении поля, намагнитившего одноосный магнетик параллельно ОТН, обязательно происходят процессы вращения спинов. В совершенном магнетике они могут протекать когерентно в одном из двух направлений: по ходу часовой стрелки или против него. Дисперсия анизотропии на микро- и макроскопических расстояниях снимала это вырождение в исследованном образце. Стохастический разброс отклонений ОЛН от направления действия  $H$  на малые углы ( $\pm 1^\circ$ ) в зернах приводил к некогерентному развороту спинов в них и формированию микродоменов. Макроскопическая дисперсия определяла противоположные направления разворота спинов в макроскопических объемах образца, примыкавших к участку с микродоменами. В результате формировались макродомены, разделенные не неелевской стенкой, а переходной областью с высокой плотностью микродоменов.

Таким образом, в каждый полупериод знакопеременного поля (импульсного, синусоидального или произвольно изменяющегося во времени) достаточной амплиту-

ды на стадии уменьшения  $H$  появлялись макродомены, разделенные неподвижной переходной областью, содержащей высокую плотность микродоменов. После инвертирования знака поля и его возрастания в макродомене зарождалась подвижная доменная стенка. Ее последующее смещение вплоть до аннигиляции с переходной областью перемагничивало макродомен. Перемагничивание всего образца завершалось доворотом векторов  $M$  во всем его объеме к направлению действия  $H$ .

- 
1. M.Prutton, *Thin ferromagnetic films*, London, Butterworths, 1964 (пер. М. Праттон, Тонкие ферромагнитные пленки, Л.: Судостроение, 1967).
  2. J.B.Kortright, D.D.Awschalon, J.Stohr et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **207**, 7 (1999).
  3. A.E.Berkowitz and K.Takano, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 552 (1999).
  4. В. Heinrich and J.F.Cochran, *Advances in Physics* **42**, 523 (1993).
  5. Л.М.Дедух, В.С.Горнаков, Ю.П.Кабанов и др., Письма в ЖЭТФ **64**, 778 (1996).