

ДИНАМИЧЕСКАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ В АМОРФНЫХ ПЛЕНКАХ С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

Г.С.Кандаурова¹⁾, В.Е.Иванов

Уральский государственный университет

620083 Екатеринбург, Россия

Поступила в редакцию 20 октября 1997 г.

В аморфных пленках гадолиний-кобальт в узких температурных интервалах по обе стороны от точки магнитной компенсации обнаружено явление динамической самоорганизации магнитных доменов. В ограниченной области амплитуд и частот переменного магнитного поля формируются спиральные динамические домены.

PACS: 75.60.Ch

1. При исследовании доменной структуры пленок ферритов-гранатов (ФГ) в переменном магнитном поле было обнаружено явление динамической самоорганизации системы взаимодействующих движущихся магнитных доменов [1, 2]. Дальнейшие исследования показали большое разнообразие упорядоченных динамических доменных структур, наиболее примечательными из которых являются спиральные динамические домены (СДД). В пленках ФГ спиральные домены формируются в определенной ограниченной области амплитуд H_0 и частот f переменного поля. В этой области ($H_0 - f$) пленки переходят в возбужденное состояние, названное в [3] ангерным состоянием. Самыми характерными признаками этого состояния в [3] выделены: самоорганизация динамического коллектива магнитных доменов и эволюция этого коллектива. Эволюция проявляется прежде всего в том, что, пока действует переменное поле, СДД возникают и исчезают с частотой, много меньшей частоты накачки. Исследование указанного явления привело к обнаружению массы новых эффектов: формирование идеально упорядоченных двумерных доменных массивов (решеток), составленных из доменов различной геометрии, своеобразные пульсации гантелевидных доменов [4, 5], преобразование источников динамических доменов [6, 7], необычные динамические гистерезисные свойства [8, 9]: динамическая однодоменность [7, 9, 10], индуцированное полем смещение ангерного состояния [11]. Все это получено при исследовании пленок ФГ с перпендикулярной анизотропией. Совершенно необходимо было поставить задачу поиска и изучения динамической самоорганизации и ангерного состояния в других многодоменных магнитных средах. Только тогда можно говорить об универсальности этого явления в физике магнитных доменов.

2. Мы выбрали в качестве объекта исследования аморфные пленки гадолиний - кобальт (Gd_xCo_{1-x}), обладающие перпендикулярной анизотропией. Эти пленки могут иметь широкий спектр магнитных свойств благодаря тому, что x в системе Gd_xCo_{1-x} может меняться непрерывно, а температура компенсации магнитного момента T_k линейно зависит от x . Пленки Gd-Co, содержащие "низкоанизотропные" ионы Gd, отличаются от других пленок редкая земля - переходный элемент

¹⁾ e-mail: Gerta.Kandaurova@usu.ru

(например, Tb-Fe-Co, Dy-Co и др.) сравнительно "низкой" коэрцитивной силой. Они интенсивно исследовались как альтернативные пленкам ФГ с целью применения в запоминающих устройствах на подвижных цилиндрических доменах. Изучение доменосодержащих сред, в том числе пленок ФГ и Gd-Co, не потеряло своей актуальности и по сей день в связи с возможностью применения их в устройствах магнитооптики [12], в частности, для визуализации неоднородных магнитных полей [13] и топографирования пространственно-неоднородных температурных полей [14]. По статическим свойствам доменная структура киттелевского типа в пленках Gd-Co является аналогом доменной структуры пленок ФГ с перпендикулярной анизотропией [15]. В то же время по микроструктуре и многим другим физическим свойствам пленки ФГ и пленки Gd-Co совершенно различны. Априори динамическое поведение доменной структуры в пленках Gd-Co предсказать нельзя по следующим причинам. Эпитаксиальные пленки ФГ фактически являются монокристаллическими диэлектриками и в магнитном отношении трехподрешеточными ферримагнетиками. Пленки Gd-Co являются металлическими аморфными пленками со сложной иерархией структурных неоднородностей [16]. В магнитном отношении это двухподрешеточные ферримагнетики. Кроме того, коэрцитивность доменных границ H_c в аморфных пленках примерно на порядок больше, чем в пленках ФГ. Изменяя состав системы Gd-Co, можно получить пленки, у которых T_k не на много отличается от комнатной. В этом случае появляется возможность, умеренно варьируя температуру образца, менять намагниченность M_s , поле насыщения H_s , коэрцитивную силу H_c , период доменной структуры в размагниченном состоянии $2d_0$ в очень широких пределах. Отсюда повышается вероятность получения такого сочетания этих параметров, при которых в переменном поле могли формироваться СДД. Именно такая постановка эксперимента в данной работе привела к успеху.

3. Исследуемые пленки Gd-Co были получены методом ионно-плазменного распыления в атмосфере аргона на стеклянные водоохлаждаемые подложки, защищенные с поверхности покрытием (SiO_2) толщиной 0.05 мкм. Пленки Gd-Co, в которых уже в течение процесса нанесения сформировалась доменная структура, как правило, обладают стабилизацией доменных границ [17]. Это накладывает существенное ограничение на движение границ и перестройку всей доменной структуры. Поэтому с целью исключения паразитного влияния этого эффекта пленки напылялись в присутствии магнитного поля, перпендикулярного их поверхности. Доменная структура наблюдалась при помощи полярного магнитооптического эффекта Керра. Пространственно-однородное переменное синусоидальное магнитное поле $H = H_0 \sin(2\pi ft)$ ориентировалось по нормали к пленке. Частота переменного поля f варьировалась от 0.05 до 50 кГц, а амплитуда H_0 от 0 до 300 Э. Температура образцов менялась в пределах от -20 до 150°C . Время экспозиции при фотографировании доменной структуры составляло несколько секунд. Систематизация экспериментальных данных, проведенная в [18] указывает на то, что СДД формируются при определенном сочетании магнитных свойств, в частности, ширины доменов d_0 и характеристической длины материала [4]. Поэтому основной характеристикой, связанной с формированием СДД, в данной работе мы также считали ширину доменов.

4. Полученные результаты продемонстрируем на примере пленки $\text{Gd}_{22}\text{Co}_{78}$ с перпендикулярной анизотропией. Толщина пленки составляла $L = 0.4$ мкм, температура компенсации 55°C . На рис.1 показана температурная зависимость полупериода

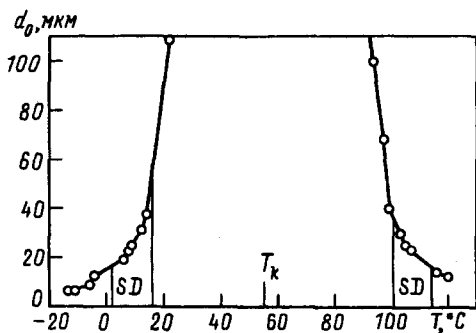


Рис.1. Температурная зависимость ширины доменов в размагниченном состоянии исследуемой аморфной пленки гадолиний – кобальт

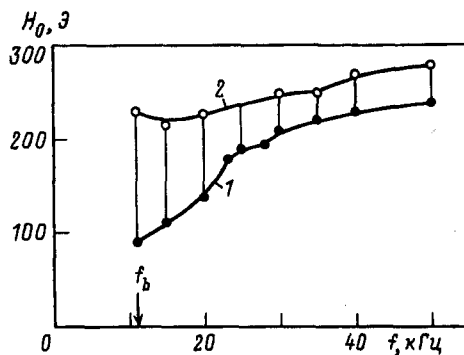


Рис.2. Амплитудно-частотная область существования спиральных динамических доменов в аморфной пленке гадолиний – кобальт при температуре 100 °С

(d_0) доменной структуры в размагниченном состоянии. В температурном интервале ($T_k - 30, T_k + 30$) °С доменная структура имеет нерегулярный вид. Конфигурация и размеры доменов определяются в основном распределением дефектов, на которых закрепляются доменные границы. Действие переменного магнитного поля при этих температурах вызывает некоррелированное колебательное движение доменных границ около некоторых положений равновесия. Увеличение амплитуды поля при всех используемых частотах приводит к полному размыванию картины доменной структуры, что визуально наблюдается как серый фон. При удалении от T_k доменная структура становится лабиринтарной структурой, типичной для пленок с перпендикулярной анизотропией. В температурных интервалах (1 – 15) °С и (100 – 113) °С (на рис.1 отмечены буквами SD) и в области частот 10 – 50 кГц при увеличении амплитуды H_0 до некоторой критической величины (кривая 1 на рис.2) происходит формирование СДД. Примеры картин доменной структуры в исходном размагниченном состоянии и СДД при одной и той же температуре $T = 110$ °С приведены на рис.3а и рис.3б, соответственно. Мелкие СДД (1 – 2 витка) – короткоживущие. Они возникают и исчезают, снова возникают и так далее, пока действует поле накачки. При этом характерные для ангерного состояния времена, T_g – время жизни и T_w – время ожидания [3], составляют 1 – 2 с. На рис.3б такие одновитковые спирали видны в верхней части фотографии. Относительно крупные СДД, состоящие из трех и более витков (рис.3б), – долгоживущие. Для них T_g было больше времени наблюдения, которое составляло 10 с при фиксированной температуре. Замечено, что эти СДД локализованы в той области пространства, в которой они зародились. Количество СДД с положительным и отрицательным знаками топологического заряда [3] приблизительно одинаково. Достижение H_0 второго критического значения (кривая 2 на рис.2) приводит к разрушению СДД. При более высоких амплитудах визуально наблюдается серый фон. Представленная на рис.2 амплитудно-частотная ($H_0 - f$) область существования СДД слева имеет четко обозначенную граничную частоту $f_b = 10$ кГц. Это означает, что слева от f_b и выше кривой 2 на рис.2 в системе доменов реализуется пространственно-временной хаос. В неупорядоченной доменной структуре домены и доменные стенки двигаются в разных направлениях и с различными скоростями. Между кривыми 1 и 2 имеют место переходы хаос ↔

порядок. Здесь формируются упорядоченные динамические структуры – спиральные домены, доменные стенки колеблются около устойчивых положений равновесия. Область $(H_0 - f)$ меняет свои количественные характеристики при вариации температуры, качественно оставаясь подобной той, что представлена на рис.2. При этом частота f_b сохраняется довольно высокой: $f_b > 10$ кГц. Справа область $(H_0 > f)$ обрезана частотой $f = 50$ кГц, что связано с ограничениями используемой методики возбуждения переменного поля. Из рис.1 видно, что температурные интервалы стабильности СДД практически симметрично расположены относительно T_k и им соответствуют симметричные в пределах погрешности измерения участки кривой $d_0(T)$.

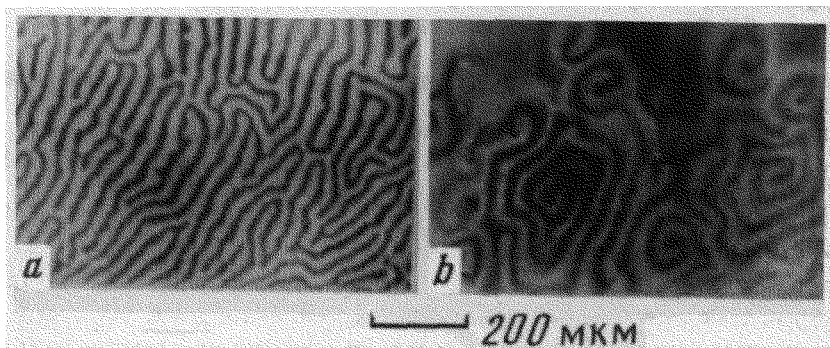


Рис.3. Фотографии доменной структуры при температуре $T = 110^\circ\text{C}$ на одном и том же участке образца в размагниченном состоянии (а) и в переменном магнитном поле с $H_0 = 180$, Э, $f = 30$ кГц (b)

5. Сравнение с пленками ФГ показывает следующее. В пленках ФГ при изменении амплитуды и частоты магнитного поля визуально наблюдается большое разнообразие упорядоченных ДДС; другими словами, они имеют весьма сложные динамические доменные фазовые диаграммы [10]. В исследованных пленках Gd-Co мы пока обнаружили только СДД, причем при более высоких частотах, чем в пленках ФГ. Далее, в пленках Gd-Co имеет место пространственная локализация многовитковых СДД в отличие от пленок ФГ, в которых такие СДД могут относительно свободно перемещаться по образцу и взаимодействовать между собой. И, наконец, максимальное количество витков в СДД исследованных пленок Gd-Co составляет 4 – 5, тогда как в пленках ФГ количество витков в СДД может достигать 15 – 20. Таким образом, изучена низкочастотная динамика коллектива магнитных доменов в аморфных пленках Gd-Co с перпендикулярной анизотропией и проведены в температурном интервале, захватывающем точку магнитной компенсации. Продемонстрирована самоорганизация динамического массива магнитных доменов и образование спиральных структур в магнитных пленках, резко отличных по микроструктуре и многим магнитным свойствам от ранее изученных пленок ФГ. Поэтому есть основания считать явление динамической самоорганизации многодоменных магнитных сред универсальным явлением.

Авторы благодарят Е.А.Русинову за помощь в работе.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 96-02-16199 а).

-
1. Г.С.Кандаурова, А.Э.Свидерский, Письма в ЖЭТФ 47, 410 (1988).
 2. Г.С.Кандаурова, А.Э.Свидерский, Письма в ЖТФ 14, 777 (1988).
 3. Г.С.Кандаурова, А.Э.Свидерский, ЖЭТФ 97, 1218 (1990).
 4. Ф.В.Лисовский, Е.Г.Мансветова, Е.П.Николаев, ЖЭТФ 103, 213 (1993).
 5. Ф.В.Лисовский, Е.Г.Мансветова, Ч.М.Пак, ЖЭТФ 108, 1031 (1995).
 6. Г.С.Кандаурова, ФММ 79, 158 (1995).
 7. Г.С.Кандаурова, Ж.А.Кипшакбаева, ФТТ 37, 1058 (1995).
 8. Г.С.Кандаурова, В.Х.Осадченко, Письма в ЖТФ 20, N21, 24 (1994).
 9. Г.С.Кандаурова, В.Х.Осадченко, Письма в ЖТФ 21, N20, 11 (1995).
 10. Г.С.Кандаурова, А.А.Русинов, ДАН 340, 610 (1995).
 11. Г.С.Кандаурова, А.А.Русинов, Письма в ЖЭТФ 65, 60 (1997).
 12. В.В.Рандошкин, А.Я.Червоненкис, *Прикладная магнитооптика*, М.: Энергоатомиздат, 1990.
 13. А.Я.Червоненкис, Н.Ф.Кубраков, Письма в ЖТФ 8, N11, 696 (1982).
 14. В.Е.Иванов, Г.С.Кандаурова, ФММ 82 N3, 21 (1996).
 15. R.J.Hasegawa, J. Appl. Phys. 45, 3109 (1974).
 16. В.В.Юдин, *Стохастическая магнитная структура пленок с микропоровой системой*, М.: Наука, 1987.
 17. В.Е.Иванов, Г.С.Кандаурова, М.Ф.Каримов, ФММ 79, N3, 59 (1995).
 18. G.S.Kandaurova, A.E.Svidersky, and V.P.Klin, J. Magn. and Magn. Mater. 140-144, 2135 (1995).