

05;12

Изменение „закритического“ состояния пленок $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{16}\text{Cu}_5\text{Mo}_4$, полученных радиочастотным напылением

© А.В. Свалов,¹ Г.В. Курляндская,^{1,2} Х. Хаммер,³ П.А. Савин,¹ О.И. Тутынина⁴

¹ Уральский государственный университет им. А.М. Горького, 620083 Екатеринбург, Россия

² Университет Овиедо, Овиедо, Испания

³ Институт прикладной физики, Университет Генриха Гейне, Дюссельдорф, Германия

⁴ Уральский технический институт связи и информатики, Екатеринбург, Россия

e-mail: andrey.svalov@usu.ru

(Поступило в Редакцию 9 декабря 2003 г.)

Измерены величины намагниченности насыщения, констант перпендикулярной анизотропии и вращающейся анизотропии, коэрцитивной силы тонких магнитных пленок сплава $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{16}\text{Cu}_5\text{Mo}_4$, полученных радиочастотным напылением в исходном состоянии и после отжига. Определена связь между наличием перпендикулярной анизотропии и „закритическим“ состоянием образцов. Показана возможность улучшения магнитной мягкости данных пленок с помощью дополнительных термообработок.

Введение

Магнитомягкий сплав $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{16}\text{Cu}_5\text{Mo}_4$ (так называемый μ -металл) в последние годы вновь привлек к себе внимание исследователей в связи с возможностью использования его в электронных устройствах на основе эффекта гигантского магнитного импеданса (ГМИ). Суть явления ГМИ состоит в изменении комплексного сопротивления Z на переменном токе частоты ω , т.е. импеданса проводника из магнитомягкого ферромагнетика при воздействии на него внешнего магнитного поля $Z(\omega) = R(\omega) - iX(\omega)$ [1,2]. Проводники для таких устройств выполняются, как правило, в виде проводов, лент, фольг или пленочных структур [3–5]. Известны результаты исследований μ -металла на образцах в виде фольги [6] и пленок, полученных магнетронным распылением [7], показавшие пригодность этого материала для ГМИ сенсоров. Но надо иметь в виду, что пленочное состояние вносит определенные коррективы и свойства пленки могут отличаться от свойств массивного образца из того же самого материала. Особенности получения магнитных пленок путем напыления способны приводить к появлению наведенной перпендикулярной магнитной анизотропии в образцах. Возникновение этой анизотропии может быть связано со столбчатой структурой пленок, напряжениями, существующими в пленках, анизотропным распределением пар атомов и т.п. Скорее всего, в каждом конкретном случае причина этой анизотропии определяется материалом пленки, а также способом и условиями ее получения [8,9]. Наличие перпендикулярной анизотропии в пленке в свою очередь может привести к так называемому „закритическому“ состоянию образца, характеризующемуся специфической петлей гистерезиса, повышенной коэрцитивной силой H_c , вращающейся магнитной анизотропией в плоскости образца и мелкой полосовой доменной структурой, в доменах которой спонтанная намагниченность

ориентирована под углом к плоскости пленки [10,11]. В данной работе исследуется „закритическое“ состояние пленок сплава $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{16}\text{Cu}_5\text{Mo}_4$, полученных методом радиочастотного ионно-плазменного напыления.

Образцы и методика эксперимента

Пленки были осаждены на стеклянные водоохлаждаемые подложки в атмосфере аргона при давлении $1 \cdot 10^{-3}$ Торр, предварительный вакуум составлял $5 \cdot 10^{-7}$ Торр. В качестве мишени использовалась пластина диаметром 10 см, выполненная из сплава $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{16}\text{Cu}_5\text{Mo}_4$. Предполагалось, что состав осажденных пленок повторяет состав мишени. Пленки напылялись в присутствии постоянного магнитного поля, ориентированного в плоскости подложки, для формирования в образцах анизотропии с осью легкого намагничивания (ОЛН) в плоскости образца. Величина поля составляла примерно 100 Ое. Толщина образцов определялась интерференционным методом Толанского. Петли гистерезиса измерялись с помощью магнитооптического эффекта Керра в интервале полей ± 100 Ое (частота изменения поля 50 Hz) и на вибрационном магнитометре — в интервале полей ± 500 Ое. Намагниченность насыщения M_s и константа перпендикулярной анизотропии K_p определялись с помощью вращательного анизометра по методике [12]. Константа вращающейся анизотропии K_{rot} определялась из кривых вращающих моментов (КВМ), измеренных в различных по величине магнитных полях от 10 до 500 Ое, при этом направление поля изменялось в плоскости пленки. Доменная структура наблюдалась с помощью порошковых фигур. Отжиг образцов проводился в вакууме при давлении $1 \cdot 10^{-6}$ Торр.

	$L, \mu m$	M_s, G	H_c, Oe	$K_p, \text{erg/cm}^3$	$K_{rot}, \text{erg/cm}^3$	$L_c, \mu m$
Образец 1	0.1					
Исходное состояние		600	4	$4 \cdot 10^5$	—	0.1
После отжига $320^\circ C, 1 h$		600	3	$3 \cdot 10^5$	—	0.2
После отжига $420^\circ C, 1 h$	600	600	3	$1 \cdot 10^5$	—	0.3
Образец 2	0.31					
Исходное состояние		600	20	$5 \cdot 10^5$	$1.8 \cdot 10^4$	0.1
После отжига $320^\circ C, 1 h$		600	14	$2 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^4$	0.2
После отжига $420^\circ C, 1 h$	600	600	10	$8 \cdot 10^4$	—	0.3

Результаты и обсуждение

В данной работе приведены результаты исследований двух типов образцов толщинами $0.1 \mu m$ (образец 1) и $0.31 \mu m$ (образец 2). На рис. 1 представлены петли гистерезиса, измеренные с помощью вибромагнитометра на образцах 1 (a) и 2 (b) в исходном состоянии, поле прикладывалось в плоскости пленки. Для тонкой пленки наблюдается низкокоэрцитивная прямоугольная петля, типичная для пленок с намагниченностью, расположенной в плоскости образца. Более толстый образец обладает петлей, характерной для пленок, находящихся в „закритическом“ состоянии. Это состояние возникает, если толщина пленки L превышает некоторую критическую толщину $L_c = 2\pi(A/K_p)^{1/2}$, а фактор качества $Q = K_p/2\pi M_s^2 < 1$, где A — параметр обменного взаимодействия. Если предположить, что $A = 2 \cdot 10^{-6} \text{ erg/cm}$ для этого сплава [11], и воспользоваться полученными для данного образца величинами M_s и K_p (см. таблицу), то получим $L_c = 0.1 \mu m$. Аналогичная оценка для тонкого образца дает $L_c = 0.1 \mu m$. Заметим, что величины L_c приведены здесь с точностью до $0.1 \mu m$ и с учетом приблизительности использованной величины параметра обменного взаимодействия. Тем не менее сравнение результатов этих оценок с толщиной образцов позволяет предполагать, что вероятность нахождения в „закритическом“ состоянии у второго образца больше, чем у первого.

Еще одним доказательством в пользу этого предположения служит наблюдавшаяся на данном образце микрополосовая доменная структура (рис. 2), которую не удалось обнаружить на первой пленке. Перестройка именно этой доменной структуры при перемагничивании пленки ответственна за более высокие, чем на тонком образце, коэрцитивную силу и поле насыщения (рис. 1).

Третьим свидетельством „закритического“ состояния толстого образца является наличие вращающейся магнитной анизотропии в плоскости пленки, ось легкого намагничивания которой задается приложением к плен-

ке достаточно большого магнитного поля. Это поле способно изменить направление полосовых доменов, ориентация которых и задает положение ОЛН. При

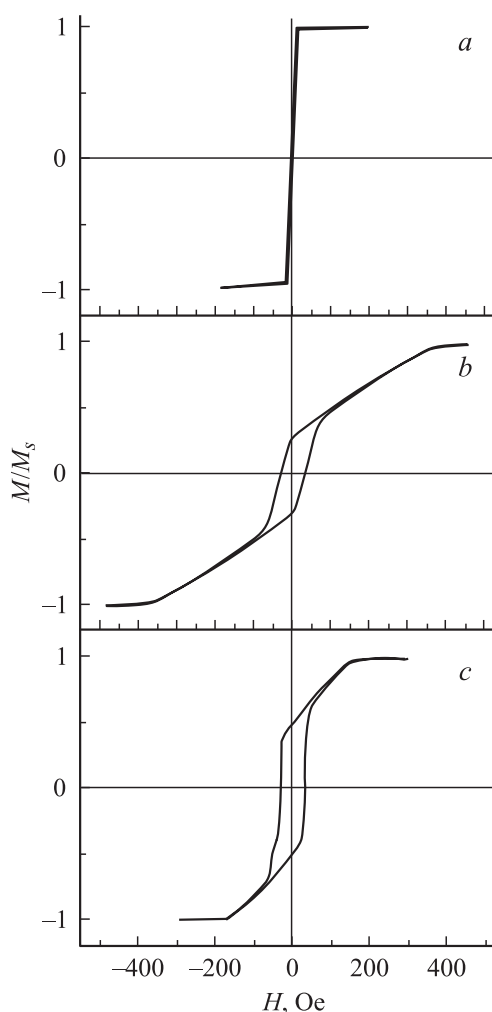


Рис. 1. Петли гистерезиса, измеренные с помощью вибромагнитометра на образцах 1 (a) и 2 (b, c) в исходном состоянии (a, b) и после отжига в течение 1 h при $T = 420^\circ C$.

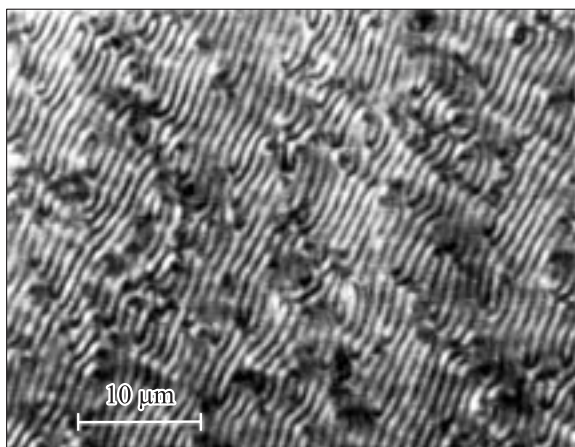


Рис. 2. Микрополосовая доменная структура, наблюдавшаяся на образце 2 в исходном состоянии.

повороте слабого магнитного поля в плоскости пленки ориентация полосовых доменов не меняется, а меняется лишь направление намагниченности в доменах [10,11]. Проявления вращающейся анизотропии можно увидеть на магнитооптических петлях гистерезиса и кривых вращающих моментов.

На рис. 3 представлена схема магнитооптических петель гистерезиса, измеренных в плоскости образца 1 вдоль (рис. 3, *a*) и перпендикулярно (рис. 3, *b*) ОЛН. Эти петли типичны для пленок, обладающих анизотропией в плоскости образца и намагниченностью, ориентированной в плоскости пленки. На этом же рисунке показана магнитооптическая петля гистерезиса, измеренная в плоскости образца 2 в любом направлении после того, как в этом направлении было приложено достаточно большое магнитное поле, ≥ 100 Ое. Поле ориентировало в этом направлении полосовые домены, которые и определяли положение ОЛН. Если же после воздействия на этот образец большого поля образец повернуть в плоскости на 90° и измерять петлю гистерезиса, постепенно увеличивая величину поля, то в малых полях это будет нераскрытая петля, характерная для петли, измеряемой перпендикулярно ОЛН. При превышении некоторой величины поля петля раскрывается и становится характерной для петли, измеряемой вдоль ОЛН (рис. 3, *c*). Данную процедуру можно повторять для любого направления первоначального приложения к образцу большого магнитного поля. Такой характер магнитооптических петель гистерезиса свидетельствует о том, что в данном образце величина вращающейся анизотропии превосходит величину наведенной анизотропии.

На рис. 4 представлена схема кривых вращающих моментов, измеренных с помощью вращательного анизометра на образце 2, направление поля изменялось в плоскости пленки. Предварительно образец был намагничен в своей плоскости полем 1 кОе. В малых полях пленка еще не перемагничивается, кривая вра-

щающих моментов описывается законом $L \sim \sin \theta$ (кривая *a*). В больших полях кривая описывается законом $L \sim \sin 2\theta$, что характерно для одноосной анизотропии (кривая *b*). При увеличении поля вид КВМ свидетельствует о вращении ОЛН за внешним полем (кривая *c*). С дальнейшим ростом поля КВМ переходит в кривую, описываемую законом $L \sim \sin 2\theta$ с небольшой амплитудой, не зависящей от величины поля (кривая *d*). Если приложить постоянное поле 1 кОе в направлении, перпендикулярном первоначальному, то фаза кривой *b* изменится на 90° , а фаза кривой *d* останется неизменной. Это свидетельствует о том, что кривая *d* описывает одноосную наведенную анизотропию, существующую в пленке, а кривая *b* — вращающуюся магнитную анизотропию.

Исследуемые образцы были подвергнуты последовательному ступенчатому отжигу при температурах 320 и 420°С, длительность термообработки при каждой

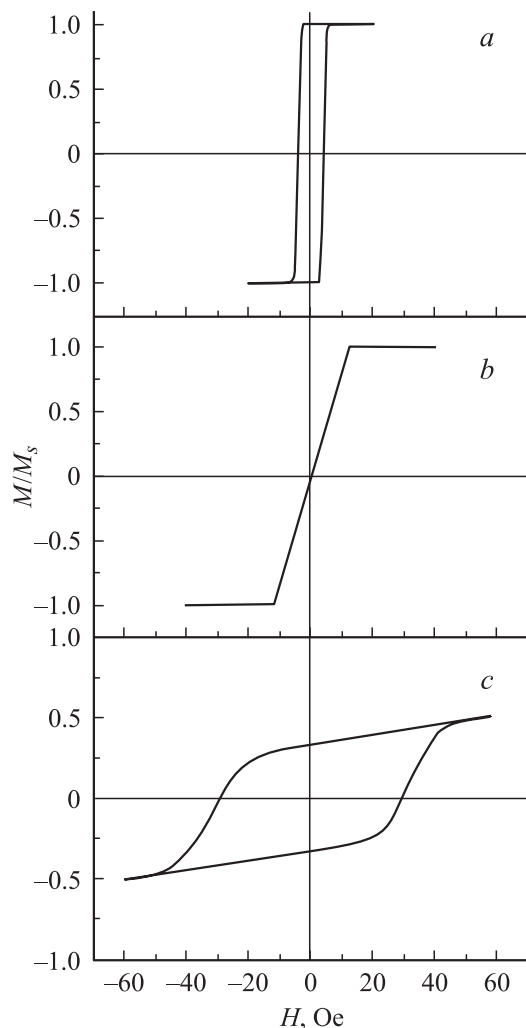


Рис. 3. Схема магнитооптических петель гистерезиса, измеренных на образцах 1 (*a*, *b*) и 2 (*c*) в исходном состоянии вдоль ОЛН (*a*), перпендикулярно ОЛН (*b*) и в любом направлении в плоскости пленки после приложения достаточно большого магнитного поля (*c*).

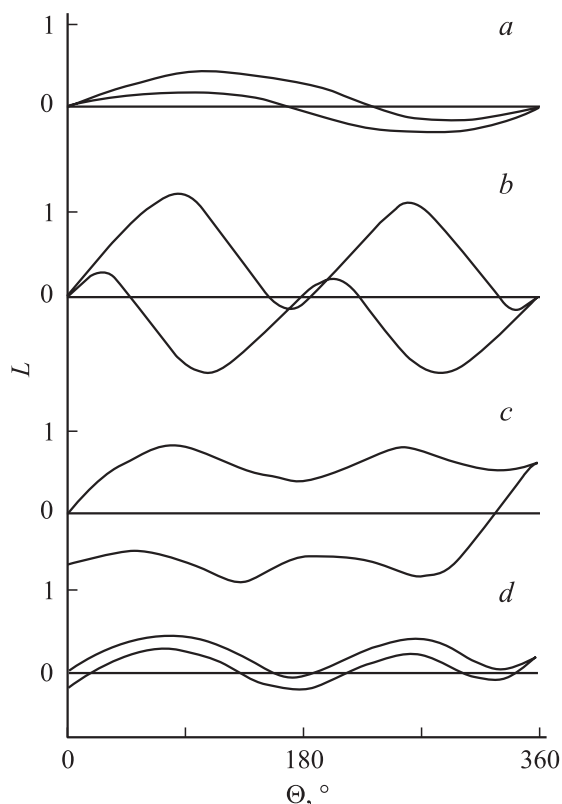


Рис. 4. Схема кривых вращающих моментов, измеренных в плоскости пленки на образце 2. Величина поля измерения: 10 (a); 50 (b); 100 (c); 500 Oe (d). L в произвольных единицах.

температуре составляла 1 h. При более высоких температурах отжиг не проводился из-за ограниченной термостойкости стеклянной подложки.

Термообработка слабо повлияла на свойства тонкого образца: характер петель гистерезиса не изменился, немного уменьшились коэрцитивная сила H_c и K_p (см. таблицу). Для толстого образца наблюдались более заметные изменения. Петли гистерезиса, измеренные с помощью вибромагнитометра, после отжига сохранили „закритический“ вид, но при этом уменьшились коэрцитивная сила и поле насыщения (рис. 1, c). А для кривых вращающих моментов, измеренных с помощью вращательного анизометра в плоскости образца 2 после отжига при 420°C, изменился характер трансформации КВМ при увеличении поля измерения: наблюдался переход от кривой типа *a* сразу к кривой типа *d*, минуя стадии *b* и *c* (рис. 4). Это связано с тем, что уменьшение K_p вследствие отжига приводит к уменьшению угла выхода намагниченности в полосовых доменах [11], а это в свою очередь заставляет стенки доменов и задаваемую ими ОЛН следовать за меньшим по величине полем, чем в исходном состоянии. Это приводит к невозможности определить K_{tot} для данного случая. Оценки L_c показывают, что после отжига при 420°C образец 2 находится на грани перехода в „закритическое“ состояние. Анализ имеющихся данных приводит к выводу, что уменьшение

степени „закритичности“ в результате отжига пленки сплава $Ni_{75}Fe_{16}Cu_5Mo_4$ связано с уменьшением величины перпендикулярной анизотропии, которое в свою очередь может быть вызвано разрушением столбчатой структуры или релаксацией внутренних напряжений в пленке.

Выводы

В данной работе впервые показана возможность реализации так называемого „закритического“ состояния в пленках сплава $Ni_{75}Fe_{16}Cu_5Mo_4$ при определенном сочетании величин перпендикулярной анизотропии и размерных параметров пленок. Отжиг уменьшает величину перпендикулярной анизотропии, что приводит к снижению степени „закритичности“ пленок и повышает их магнитомягкость. Поскольку магнитные свойства тонких пленок, находящихся в „закритическом“ состоянии, ориентированных на применение в режиме высокочастотного перемагничивания, заметно хуже свойств пленок с плоскостной анизотропией, понимание механизма и условий формирования „закритического“ состояния представляется важным с точки зрения их возможного использования в электронных устройствах.

Работа выполнена при поддержке Минобразования РФ (грант № T02-05: 1-3153), гранта REC-005 (ЕК-005-X1), программы „Ramon y Cajal“ Министерства науки и техники Испании.

Список литературы

- [1] Beach R.S., Berkowitz A.E. // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 64. N 26. P. 3652–3654.
- [2] Антонов А.С., Гадецкий С.Н., Грановский А.Б. и др. // ФММ. 1997. Т. 83. № 6. С. 60–71.
- [3] Panina L.V., Mohri K. // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 65. P. 1189–1191.
- [4] Sánchez M.L., Prida V.M., Hernando B. et al. // Chin. Phys. Lett. 2002. Vol. 19. P. 1870–1873.
- [5] Бузников Н.А., Антонов А.С., Рахманов А.Л. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 21. С. 88–94.
- [6] Nie H.B., Pakhomov A.B., Yan X. et al. // Sol. St. Commun. 1999. Vol. 112. N 5. P. 285–289.
- [7] Cho W.-S., Lee H., Kim C.-O. // Thin Solid Films. 2000. Vol. 375. N 1–2. P. 51–54.
- [8] Sugita Y., Fujiwara H., Sato T. // Appl. Phys. Lett. 1967. Vol. 10. P. 229–232.
- [9] Meiklejohn W.H., Luborsky F.E., Frischmann P.G. // IEEE Trans. MAG. 1987. Vol. 23. P. 2272–2274.
- [10] Fujiwara H., Sugita Y., Saito N. // Appl. Phys. Lett. 1964. Vol. 4. N 12. P. 199–200.
- [11] Глазер А.А., Константинова И.Ю., Потапов А.П. и др. // ФММ. 1972. Т. 33. Вып. 5. С. 946–953.
- [12] Miyajima H., Sato K., Mizoguchi T. // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47. N 10. P. 4669–4671.