

МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ В АМОРФНЫХ И МОДУЛИРОВАННЫХ ПЛЕНКАХ Tb-Fe

© Е.В.Шипиль, А.Н.Погорельй

Институт металлофизики Академии наук Украины,
252680 Киев, Украина
(Поступила в Редакцию 12 июля 1995 г.)

Изучено поведение одноосной магнитной анизотропии пленок Tb-Fe различных толщин и концентраций. Показано, что при низких концентрациях тербия аморфных пленок (менее 10 at.%) и соответственно малых толщинах слоев тербия модулированных пленок зависимости перпендикулярной магнитной анизотропии (k_u) в них сильно различаются, отличается даже знак. При возрастании толщин слоев многослойной структуры до значений, соответствующих концентрациям тербия 10–23 at.% (соответственно $N_{Tb}/N_{Fe} = 1-2$, где N_{Tb}/N_{Fe} — отношение монослоев), происходит формирование «магнитного интерфейса», который расширяется до тех пор, пока все атомы со стороны слоев Tb и со стороны слоев Fe не будут вовлечены во взаимодействие через межслойную границу — структурный интерфейс.

Аморфные пленки сплавов (АПС) Tb-Fe принадлежат к числу наиболее исследованных из сплавов типа редкоземельный металл-переходный металл (РЗМ-ПМ). Объясняется это тем, что основные свойства этого материала повторяют большую группу свойств сплавов РЗМ-ПМ, и в то же время АПС Tb-Fe выгодно выделяются среди других совокупностью магнитных параметров, которые уже позволили им зарекомендовать себя на практике в качестве основы носителя информации для термомагнитной и перпендикулярной записи.

Одним из наиболее важных свойств этих пленок является наличие перпендикулярной одноосной магнитной анизотропии.

Изучению ее особенностей в АПС Tb-Fe посвящен целый ряд публикаций, например [1–6].

В последние годы очень большой интерес появился к различным многослойным структурам (МСС), как к многообещающим потенциальным материалам. В частности, проведены некоторые исследования магнитной анизотропии в МСС Tb/Fe [7–10]. Полезно было бы сравнить поведение анизотропии в этих двух объектах. Так, например, известно [11], что в АПС и МСС Tb-Fe перпендикулярная магнитная анизотропия k_u проявляется примерно в одном и том же диапазоне эквивалентных составов. Считается, что в обоих случаях одноионный механизм вносит основной вклад в k_u [4–8]. Однако поведение k_u в зависимости от состава в АПС и МСС сильно различается. Причина

такого различия между до сих пор неясна. Непонятно также, каково влияние немагнитного тербия на величину анизотропии в МСС.

В данной работе экспериментально исследовано влияние толщин слоев МСС Tb/Fe на величину их k_u и полученная зависимость сопоставлена с концентрационной зависимостью k_u в АПС Tb_xFe_{100-x}.

1. Методика эксперимента

Для исследований были приготовлены четыре серии образцов Tb-Fe: I — Tb_xFe_{100-x} АПС ($0 < x < 100$); три серии образцов МСС с одинаковым набором толщин слоев Tb ($d_{Tb} = 5, 10, 16, 23, 31, 40 \text{ \AA}$) и различными толщинами слоев d_{Fe}: II — 8, III — 15, IV — 25 Å.

Пленки для исследований получали на стеклянных и слюдяных подложках при комнатной температуре одновременным или поочередным осаждением слоев железа и тербия из двух независимых источников электронно-лучевого испарения в условиях безмасляного вакуума не хуже 10^{-5} Па [12]. Мгновенные скорости испарения контролировались во время осаждения независимо для тербия и железа с помощью квадрупольного масс-спектрометра. Толщины составляющих слоев измеряли двумя кварцевыми резонансными датчиками в процессе осаждения пленки с последующим анализом состава слоев методом оже-спектроскопии. Общая толщина АПС составляла 120 nm, МСС — 80–90 nm. Пленки покрывались in situ защитным слоем Al₂O₃ толщиной 40 nm.

Кристаллографическая структура пленок исследовалась с помощью обычной рентгеновской методики. На основе малоуглового рентгеновского анализа определялись параметры слоев в МСС. Все измерения проводились при комнатной температуре. Электросопротивление и спонтанный эффект Холла измерялись по четырехконтактной схеме на постоянном токе. Максимальное магнитное поле при измерении спонтанного эффекта Холла составляло 10 kOe. Известно, что основным достоинством экспериментальной методики измерения спонтанного эффекта Холла является возможность определять как характеристики электронной структуры материала (коэффициенты обычного R_0 и спонтанного R_s эффекта Холла), так и магнитные характеристики ($4\pi M_0$).

Показано [13], что в МСС Tb/Fe при достаточно малых толщинах слоев ($d < 10 \text{ \AA}$) основной вклад в намагниченность вносится межслойной границей (интерфейсом). Более того, именно она является основным источником перпендикулярной анизотропии в МСС. Поэтому, используя методику спонтанного эффекта Холла при исследовании МСС Tb/Fe и сочетая ее с традиционной методикой вращательных моментов, можно получить информацию о природе перпендикулярной анизотропии в этих пленках.

Константа перпендикулярной анизотропии k_u , определялась из кривых вращательных моментов, которые измерялись в магнитных полях до 20 kOe.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1,а приведены зависимости k_u от толщины слоя Tb d_{Tb} для трех серий МСС. На рис. 1,б те же экспериментальные точки нанесены в координатах k_u и N_{Tb}/N_{Fe} , где по оси x отложено отношение толщин в единицах монослоев Tb и Fe. В этом представлении все три кривые приобретают аналогичную форму (слегка сдвинутую по оси x).

На рис. 2 кривая, приведенная на рис. 1,б для серии II ($d_{Fe} = 8 \text{ \AA}$), совмещена в единых координатах с экспериментальной зависимостью k_u от концентрации для АПС. Для МСС эффективные значения концентрации рассчитывались, как если бы оба слоя Tb и Fe определенных толщин были бы перемешаны [12].

Концентрационная зависимость k_u АПС Tb_xFe_{100-x} , полученных электронно-лучевым осаждением, в основных своих чертах повторяет ту же зависимость, приведенную в литературе, например, для пленок, приготовленных методом магнетронного сораспыления с двойной пуш-

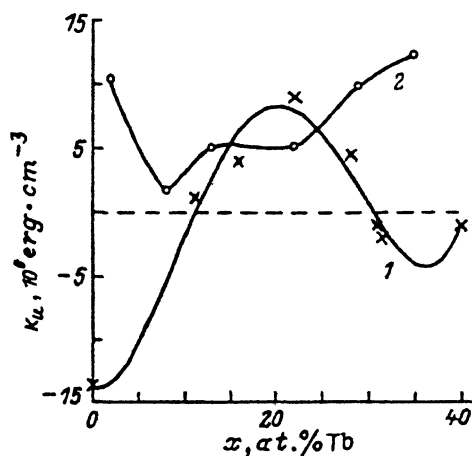
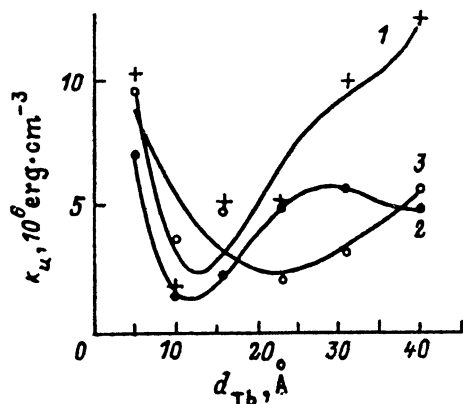


Рис. 1. Зависимости k_u от толщины слоя Tb (а) и от соотношения монослоев Tb и Fe (б) для трех серий МСС.

d_{Fe} (Å): 1 — 8, 2 — 15, 3 — 25.

а



б

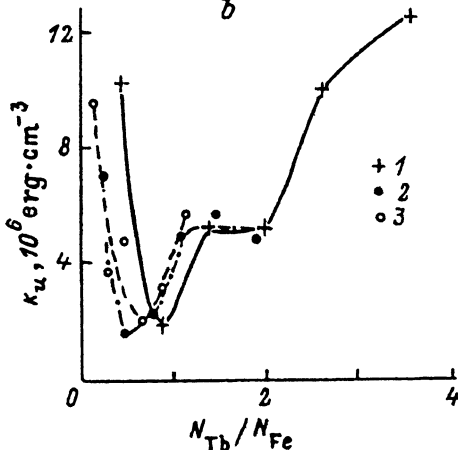


Рис. 2. Зависимости k_u от концентрации для АПС и для МСС.

1 — АФ, Tb_xFe_{100-x} , 2 — МІ, $d_{Fe} = 8 \text{ \AA}$.

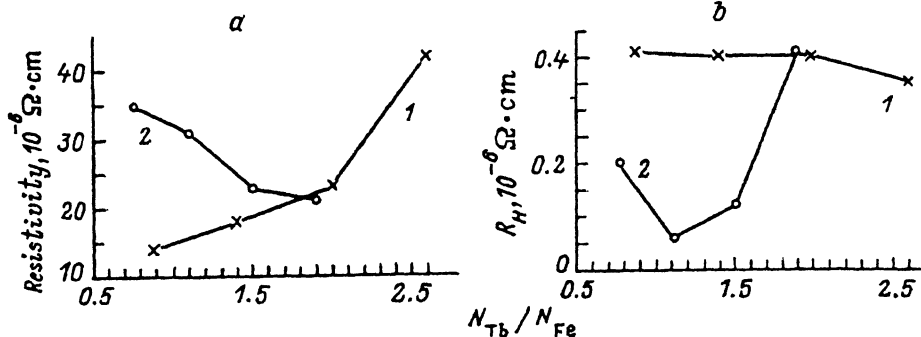


Рис. 3. Зависимости омического сопротивления (а) и сопротивления Холла (б) от соотношения монослоев N_{Tb}/N_{Fe} для двух многослойных серий. d_{Fe} (Å): 1 — 8, 2 — 15.

кой [6]. Величина k_u положительна в диапазоне составов $12 < x < 30$. Максимальное значение $k_u = 9 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$ достигается недалеко от точки компенсации ($x = 23$). А в непосредственной близости к ней ($x = 20$) k_u падает до нуля, что отражает стремление намагниченности к нулю в точке компенсации. При составах $x < 10$ и $x > 30$ k_u отрицательна. При низких концентрациях тербия (менее 10 at.%) в АПС и соответственно малых толщинах слоев тербия МСС обе зависимости k_u резко различаются: экспериментальные значения имеют противоположные знаки, а сами кривые отличаются характером (в аморфной серии k_u растет, тогда как в многослойной серии падает). В диапазоне составов $x = 10-25$ зависимости k_u также ведут себя по-разному. В многослойной серии k_u , достигнув минимума при $x = 10$, начинает расти до значений, соизмеримых со значениями в аморфной серии, однако, не превышая их, выходит на некоторое постоянное значение $k_u = 5 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$, которое сохраняется примерно до 20 at.% Tb. При составах с $x > 25$ k_u многослойной серии начинает расти, достигая при этом значений, превышающих максимальные в аморфной серии.

На рис. 3,а приведены зависимости омического сопротивления от соотношения монослоев N_{Tb}/N_{Fe} для двух многослойных серий: $d_{Fe} = 8$ и 15 Å . Для тех же многослойных серий на рис. 3,б показаны зависимости сопротивления Холла от N_{Tb}/N_{Fe} . Приведенные зависимости омического сопротивления ведут себя по-разному. Там, где межслойная граница формируется в условиях первоначального избытка железа ($d_{Fe} = 15 \text{ Å}$), с добавлением толщины слоев тербия сопротивление падает. Когда формирование межслойной границы происходит в условиях первоначального избытка тербия ($d_{Fe} = 8 \text{ Å}$), сопротивление возрастает. Зависимости пересекаются при $N_{Tb}/N_{Fe} \approx 1.8$. Нечто аналогичное наблюдается на зависимостях сопротивления Холла. И здесь экспериментальные кривые для $d_{Fe} = 15$ и 8 Å пересекаются вблизи $N_{Tb}/N_{Fe} \approx 2.0$.

Можно отметить, что атомы тербия определяют сопротивление многослойной пленки, тогда как рассеяние Холла происходит на атомах железа. Основной же вывод заключается в том, что в МСС Tb/Fe с малыми толщинами при росте толщин от нуля происходит постепенное

формирования «магнитного интерфейса», который расширяется до тех пор, пока все атомы со стороны слоев Tb и со стороны слоев Fe не будут вовлечены во взаимодействие через межслойную границу — структурный интерфейс. Процесс формирования «магнитного интерфейса» происходит по-разному в зависимости от того, какие из атомов доминируют, однако, когда значение N_{Tb}/N_{Fe} приближается к двум, в обоих случаях формирование «магнитного интерфейса» завершается. На зависимости $k_u(N_{Tb}/N_{Fe})$ (рис. 1, *b*) в этой области ($1 < N_{Tb}/N_{Fe} < 2$) наблюдается «полочка», которая соответствует значениям концентраций $x = 12-23$ (рис. 1, *a*). Иначе говоря, до завершения формирования «магнитного интерфейса» константа перпендикулярной анизотропии неизменна и принимает значение $k_u \approx 5 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$. Затем с увеличением толщины слоев тербия k_u резко возрастает. Так, увеличение толщины слоя Tb до 40 \AA почти вдвое усиливает значение k_u , достигнутое в завершеном интерфейсе. В АПС при том же соотношении компонентов k_u уменьшается.

Приведенные экспериментальные результаты позволяют сделать некоторые предположения. В МСС Tb/Fe само чередование слоев задает «вертикальное взаимодействие» между атомами Tb и Fe в отличие от АПС Tb_xFe_{100-x} , где эти атомы распределены хаотично. Поэтому в МСС не может быть отрицательных значений k_u .

В МСС с толщинами слоев $d_{Tb} = 5 \text{ \AA}$ и $d_{Fe} = 8 \text{ \AA}$ наблюдается $k_u = 1.7 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$. Вероятно, в этом случае МСС следует представлять в виде тонких слоев Fe, разделенных еще более тонкими (один монослой) немагнитными прослойками Tb. Магнитного взаимодействия между слоями Tb и Fe еще нет. В такой структуре наблюдается перпендикулярная анизотропия, что близко к результатам, полученным в ультратонких пленках Fe [14]. Увеличение d_{Tb} до 10 \AA ($\sim 2-3$ монослоя) приводит к существенному уменьшению значения k_u . Можно предположить, что магнитное взаимодействие между слоями начинает формироваться после того, как толщина слоя тербия достигнет не менее трех монослоев. Грубо говоря, при наличии трех монослоев Fe и трех монослоев Tb начинается формирование «магнитного интерфейса», которое происходит в широкой области концентраций (от 8 до 22 at.% Tb). По мере построения интерфейса его эффективный состав изменяется, и вместе с этим изменяются значения k_u , что вначале проявляется в виде роста значений, а затем, когда процесс построения «магнитного интерфейса» завершается, на кривой отражается насыщение: k_u приобретает постоянное значение $\approx 5 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$.

Увеличение d_{Tb} свыше 23 \AA приводит к резкому возрастанию k_u . Так, в МСС с $d_{Tb} = 40 \text{ \AA}$ k_u почти вдвое превышает значение, достигнутое в завершеном «магнитном интерфейсе». В этом диапазоне составов $23 < x < 40$ k_u в аморфных пленках резко падает вплоть до отрицательных значений (рис. 2).

Возрастание k_u в МСС после завершения построения «магнитного интерфейса» может быть связано с взаимодействием «объемных» атомов тербия с результирующим моментом «магнитного интерфейса», при этом атомы Tb, обладая одноионной анизотропией, выполняют роль усилителя.

В МСС с более толстыми слоями Fe ($d_{\text{Fe}} = 15$ и 25 \AA) завершённый «магнитный интерфейс» включает в себя несколько больше слоев как Fe, так и Tb, чем при $d_{\text{Fe}} = 8 \text{ \AA}$, что видно из рис. 1.

Таким образом, проведенные в работе эксперименты позволяют сделать следующие выводы.

1) В многослойных пленках Tb/Fe при росте толщин от нуля происходит постепенное формирование «магнитного интерфейса», который расширяется до тех пор, пока все атомы со стороны слоев Tb и со стороны слоев Fe не будут вовлечены во взаимодействие через межслойную границу — структурный интерфейс.

2) Состав «магнитного интерфейса» зависит от соотношения толщин слоев в МСС. Процесс формирования «магнитного интерфейса» зависит от того, какие из атомов в МСС доминируют. Соотношение монослоев, участвующих в сформированном «магнитном интерфейсе», зависит от толщины слоя Fe в МСС и составляет обычно $1 < N_{\text{Tb}}/N_{\text{Fe}} < 2$, что соответствует составу $12 < x < 23$ в аморфных пленках.

3) Константа перпендикулярной анизотропии в сформированном «магнитном интерфейсе» достигает значения $k_u \simeq 5 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$.

4) Объемные атомы Tb, обладая одноионной анизотропией, взаимодействуют со сформированным «магнитным интерфейсом», усиливая при этом его k_u почти вдвое, что характерно только для МСС.

Список литературы

- [1] Hellman F., van Dover R.B., Nakahara S., Gyorgy E.M. Phys. Rev. B **39**, 15, 10591 (1989).
- [2] Hellman F., Gyorgy E.M. Phys. Rev. Lett. **68**, 9, 1391 (1992).
- [3] Krishnan R., Porte M., Tessier M., Vitton J.P., Le Cars Y. IEEE Trans. Magn. **24**, 2, 1773 (1988).
- [4] Cheng Shin-Cheng N., Kryder Mark H. J. Appl. Phys. **69**, 10, 7202 (1991).
- [5] Egami T., Graham C.D., Jr., Dmowski W., Zhou P., Flandars P.J. IEEE Trans. Magn. **23**, 5, 2269 (1987).
- [6] Van Dover R.B., Hong M., Gyorgy E.M., Dillon J.F., Jr., Abiston S.D. J. Appl. Phys. **57**, 1, 3897 (1985).
- [7] Pierre F., Boher P., Houdy Ph., Ferre J., Pennissard G., Grolier V., Teillet J. J. Magn. Mater. **104–107**, 1033 (1992).
- [8] Wang Y.J., Kleemann W. Phys. Rev. B **44**, 10, 5132 (1991).
- [9] Shan Z.S., Sellmyer D.J., Jaswal S.S., Wang Y.J., Shen J.X. Phys. Rev. Lett. **63**, 4, 449 (1989).
- [10] Wang Y.J., Luo C.P., Kleemann W., Scholz B., Brand R.A., Keune W. Appl. Phys. **73**, 10, 6907 (1993).
- [11] Pommier J., Jamet J.P., Ferre J., Houdy P., Boher P., Pierre F. J. Magn. Mater. **136**, 251 (1994).
- [12] Шипиль Е.В., Погорелый А.Н., Уба Л., Уба С. УФЖ **39**, 5, 34 (1994).
- [13] Shipil' E.V., Pogorily A.N., Uba L., Uba S. Functional materials **2**, 2 208 (1995).
- [14] Lugert G., Robl W., Plau L., Brockmann M., Bayreuther G. J. Magn. Mater. **121**, 498 (1993).