

УДК 537.62

МЁССБАУЭРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПЛЕНКАХ Tb_xFe_{1-x} -СПЛАВОВ С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

© 2013 г. Р. С. Исхаков^{1,2}, О. А. Баюков^{1,2}, В. А. Середкин^{1,2}, С. В. Столяр^{1,2},
В. Ю. Яковчук^{1,2}, Г. И. Фролов¹, Г. В. Бондаренко¹

E-mail: rauf@iph.krasn.ru

Получены аморфные ферромагнитные пленки Tb_xFe_{1-x} с перпендикулярной магнитной анизотропией и обменно-связанные структуры $Tb_xFe_{1-x}/NiFe$, характеризующиеся однонаправленной анизотропией. На основе мёссбауэровских исследований этих систем установлена магнитная и химическая неоднородность сплавов Tb_xFe_{1-x} компенсационных составов.

DOI: 10.7868/S0367676513030150

В пленочных структурах $Tb_xFe_{1-x}/NiFe$, $Dy_xCo_{1-x}/NiFe$ [1], в которых слои аморфных ферромагнитных сплавов Tb_xFe_{1-x} , Dy_xCo_{1-x} изготовлены в области компенсационных составов и характеризуются интегральной перпендикулярной магнитной анизотропией, а в слое $NiFe$ анизотропия типа легкая ось расположена в плоскости пленки, обнаружена однонаправленная анизотропия. Проведенные исследования магнитных свойств однослойных аморфных пленок $DyCo$, а также обменно-связанных структур $DyCo/NiFe$ позволили выдвинуть гипотезу о наногетерофазности аморфных ферромагнитных сплавов компенсационных составов. На основе анализа результатов многочисленных экспериментов для этих систем было введено понятие двух магнитных фаз [2, 3]: нанофаза Φ_1 (для которой $M_{Co} > M_{Dy}$) и нанофаза Φ_2 (для которой $M_{Co} < M_{Dy}$). В зависимости от состава пленки сплава Dy_xCo_{1-x} одна из нанофаз в спиновой системе сплава выступает как основная (матричная), в то время как другая — в виде примесной. Намагниченность основной фазы в компенсационной области ориентирована ортогонально плоскости пленки из-за существующей здесь перпендикулярной анизотропии. В примесной фазе намагниченность подрешетки $3d$ -металла из-за обменного взаимодействия с намагниченностью подрешетки $3d$ -металла основной фазы имеет плоскостную составляющую, которая участвует в обменном взаимодействии с намагниченностью слоя сплава $NiFe$ [4]. Несмотря на то что компенсационным составом (намагниченность насыщения при комнатной температуре равна нулю) пленок ферромагнитных сплавов Tb_xFe_{1-x} и Dy_xCo_{1-x} является состав $x \approx 22$ ат. %, аморфные сплавы

Tb_xFe_{1-x} отличаются от аморфных сплавов Dy_xCo_{1-x} рядом особенностей. Температура Кюри, среднее значение сверхтонкого поля на ядре Fe аморфных ферромагнитных сплавов Tb_xFe_{1-x} при увеличении содержания Fe в широком интервале концентраций уменьшается (для аморфных сплавов Dy_xCo_{1-x} , как известно, увеличение концентрации $3d$ -металла повышает температуру Кюри [5]).

Данная работа посвящена синтезу, исследованию магнитных характеристик однослойных аморфных сплавов Tb_xFe_{1-x} , а также двухслойных обменно-связанных структур $Tb_xFe_{1-x}/NiFe$ методом мёссбауэровской спектроскопии. Использование методики ЯГР для изучения гетерофазных пленок аморфных сплавов Tb_xFe_{1-x} обусловлено чувствительностью спектра ЯГР к локальной ориентации вектора намагниченности в пленке относительно направления пучка γ -квантов [6].

ПОЛУЧЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемые пленки Tb_xFe_{1-x} , $Tb_xFe_{1-x}/NiFe$ ($10 < x < 35$ ат. %) были получены методом термического испарения [1–3]. В качестве экспериментальных методик использованы магнитооптический эффект Керра в полях до 15 кЭ и петлескоп с полями до 250 Э (прикладываемыми в плоскости пленки) на частоте $f = 50$ Гц. Термообработка при $T = 250^\circ C$ в течение 10 мин осуществлялась в вакуумной камере, давление остаточных газов в которой не превышало $p = 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Спектры ЯГР исследуемых пленок Tb_xFe_{1-x} были получены при комнатной температуре. При напылении пленок сплава проводилось обогащение по изотопу Fe^{57} на 95%.

¹ Учреждение Российской академии наук Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск.

² Сибирский федеральный университет, Красноярск.

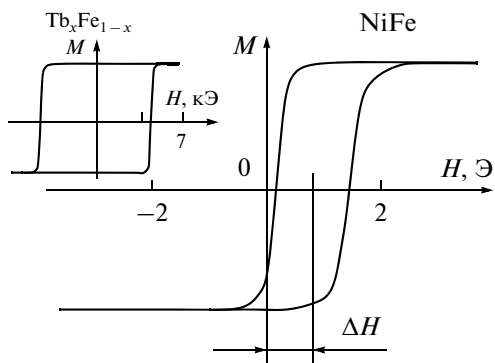


Рис. 1. Петля гистерезиса слоя NiFe в обменно-связанной структуре $Tb_xFe_{1-x}/NiFe$. На вставке приведена магнитооптическая петля гистерезиса слоя Tb_xFe_{1-x} , $x = 20$ ат. %.

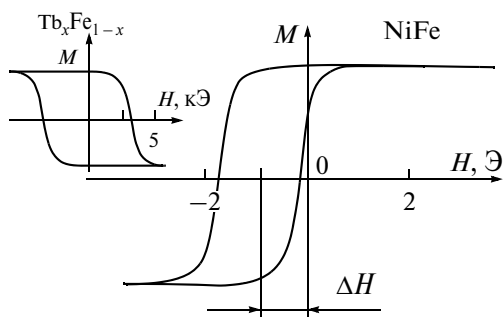


Рис. 2. Петля гистерезиса слоя NiFe в обменно-связанной структуре $Tb_xFe_{1-x}/NiFe$. На вставке приведена магнитооптическая петля гистерезиса слоя Tb_xFe_{1-x} , $x = 23$ ат. %.

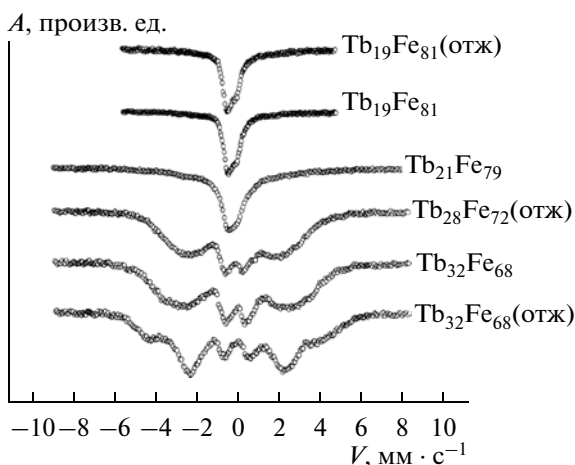


Рис. 3. Мёссбауэровские спектры пленок аморфных сплавов Tb_xFe_{1-x} , измеренные при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вид магнитооптической петли гистерезиса, измеренной методом полярного эффекта Керра, для аморфных пленок сплавов РЗМ-ПМ с перпендикулярной магнитной анизотропией позволяет здесь выявить доминирующую подрешетку. В случае $M_{Fe} > M_{Tb}$ петля гистерезиса будет “правой”. На вставке рис. 1 представлен данный вид петли гистерезиса для аморфного сплава докомпенсационного состава $Tb_{20}Fe_{80}$. При условии $M_{Fe} < M_{Tb}$ магнитооптическая петля гистерезиса будет “левой”. Данный вид петли характеризует пленку аморфного сплава послекомпенсационного состава $Tb_{23}Fe_{77}$ (вставка рис. 2). В дальнейшем нами были синтезированы двухслойные обменно-связанные пленки $Tb_xFe_{1-x}/NiFe$. На рис. 1, 2 приведены петли гистерезиса магнитомягкого слоя NiFe, измеренные на данных обменно-связанных структурах $Tb_xFe_{1-x}/NiFe$. Вид этих петель свидетельствует об однонаправленной анизотропии в планарных структурах.

Температурный отжиг приводил к уменьшению (или полному исчезновению) как величины перпендикулярной анизотропии в пленках сплавов Tb_xFe_{1-x} , (о чем свидетельствует уменьшение величины коэрцитивного поля и прямоугольности магнитооптической петли гистерезиса однослойных пленок Tb_xFe_{1-x}), так и величины однонаправленной анизотропии обменно-связанных пленок $Tb_xFe_{1-x}/NiFe$, о чем свидетельствует уменьшение (или исчезновение) величины поля смещения ΔH .

Спектры мёссбауэровской спектроскопии однослойных ферромагнитных пленок Tb_xFe_{1-x} характеризующихся перпендикулярной анизотропией, представлены на рис. 3. Линии спектра оказались широкими, что характерно для аморфных систем.

Для пленок Tb_xFe_{1-x} с содержанием железа более $x > 25$ ат. % спектры представляют собой зеемановские секстеты с небольшой примесью квадрупольного дублета. Увеличение содержания Fe в исследуемых образцах приводило к увеличению объемной доли парамагнитного дублета. Для пленок Tb_xFe_{1-x} ($x < 19$ ат. % Tb) спектры представляют парамагнитные дублеты с малой примесью секстета, что затрудняло обработку данных спектров. Обнаруженные концентрационные особенности спектров ЯГР исследуемых пленок согласуются с ранее выполненными исследованиями аморфных сплавов Tb_xFe_{1-x} [6].

В работе использована двухэтапная расшифровка мёссбауэровских спектров. На первом этапе определяется функция $P(H)$. На втором этапе по положениям максимумов определяются число и параметры сверхтонкой структуры (СТС) неэквивалентных позиций и состояний железа в спла-

ве. На основе этой информации строили модельный спектр, который подгоняли к экспериментальному спектру при варьировании всего набора сверхтонких параметров. При этой подгонке “ложные” составляющие спектра задуляются.

Задача определения углов θ (угол между направлением пучка γ -квантов и локальным вектором намагниченности) для нескольких фаз неоднородного ферромагнитного сплава при подгонке всех остальных параметров СТС в общем случае не имеет однозначного решения. Необходимо или вводить ограничения на углы θ , или их фиксировать. В данной работе, согласно развиваемому нами подходу о магнитной гетерофазности аморфных ферромагнитных сплавов компенсационных составов, мы ввели предположение о том, что в пленке существуют две магнитные фазы железа: магнитный момент одной фазы ориентирован параллельно ($\theta = 90^\circ$, \leftrightarrow), а другой – перпендикулярно ($\theta = 0^\circ$, \updownarrow) плоскости пленки. В этом случае для определения функций $P(H)$ использована сумма двух групп секстетов с $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 90^\circ$. Определенные функции $P(H)$ для двух составов $x = 28$ и 32 ат. % Tb, а также термообработанного сплава $Tb_{32}Fe_{68}$ показаны на рис. 4. Здесь проявляется структура на зависимостях $P(H)$, свидетельствующая о четко оформленном химическом и топологическом ближнем порядке обнаруженных магнитных фаз. На рис. 4 видно, что независимо от составов изучаемых пленок, области сплава с $\theta = 0^\circ$ (магнитный момент перпендикулярен плоскости пленки) характеризуются меньшими величинами сверхтонких полей, чем области с $\theta = 90^\circ$. Анализируемые нами составы сплавов являются послекомпенсационными, поэтому области $\theta = 0^\circ$ обогащены редкоземельным элементом относительно интегрального состава пленки. Примесные области, у которых вектор намагниченности расположен в плоскости пленки ($\theta = 90^\circ$), неоднородного сплава обогащены Fe, а следовательно, характеризуются большими величинами сверхтонкого поля.

Отличные от нулевого значения функции $P(H)$ для малых полей соответствуют парамагнитной составляющей спектра. Термообработка приводит к значительному уменьшению объемной доли магнитной фазы с перпендикулярной ориентацией вектора намагничивания относительно плоскости пленки и исчезновению перпендикулярной анизотропии. Данный результат согласуется с выполненными нами магнитооптическими измерениями термообработанных пленок Tb_xFe_{1-x} . На втором этапе расшифровки спектров были получены параметры парциальных секстетов, которые сведены в таблицу (см. табл.).

Из данных, приведенных в таблице, видно, что величины сверхтонких полей обнаруженных локальных нанодоменов, сплава $Tb_{28}Fe_{72}$ характе-

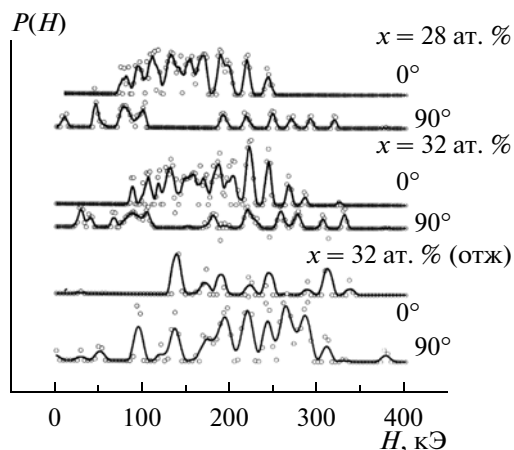


Рис. 4. Распределение сверхтонких полей $P(H)$ для случая двух ориентаций векторов намагничивания: $\theta = 0^\circ$ – магнитный момент перпендикулярен плоскости пленки; $\theta = 90^\circ$ – магнитный момент лежит в плоскости пленки.

ризуются меньшими величинами, по сравнению с величинами H нанодоменов сплава $Tb_{32}Fe_{68}$. Данные особенности согласуются с имеющимися на сегодняшний день представлениями о концентрационных зависимостях температуры Кюри и среднего значения сверхтонкого поля для аморфных ферромагнитных сплавов Tb_xFe_{1-x} . Необходимо отметить, что в пленках изучаемых составов, характеризующихся перпендикулярной анизотропией, регистрируются нанодомены с $IS = 0$ и $W/34 = W/16$, составляющие около 20% объема материала. По установленным значениям сверхтонких полей $H = 170$ кЭ ($Tb_{28}Fe_{72}$) и $H = 196$ кЭ ($Tb_{32}Fe_{68}$) их разумно отнести к матричной магнитной фазе Φ_2 , для которой должно выполняться неравенство $M_{Fe} < M_{Tb}$. Вектор намагниченности данных областей, следовательно, должен быть ориентирован перпендикулярно плоскости пленки. В эксперименте же наблюдается обратная ситуация. Данные области характеризуются $\theta = 90^\circ$. Обнаруженные особенности, возможно, обусловлены особым магнитным упорядочением данных нанодоменов и требуют дополнительных исследований.

По данным таблицы можно определить объемные доли (долевую заселенность позиции S) магнитных фаз Φ_1 и Φ_2 . Для пленок состава $Tb_{28}Fe_{72}$ $S(\Phi_1) = 23\%$, $S(\Phi_2) = 48\%$. Для пленок состава $Tb_{32}Fe_{68}$ $S(\Phi_1) = 24\%$, $S(\Phi_2) = 42\%$. Широкое распределение сверхтонких полей, в фазах Φ_1 и Φ_2 указывает на локальную химическую неоднородность как фазы Φ_1 , так и фазы Φ_2 . Заселенность парамагнитных областей составляет около 10%. Термообработка приводит к изменению фазового состава сплава: повышается сверхтонкое поле и исчезает перпендикулярная анизотропия.

Параметры позиций, обнаруженных в пленках Tb_xFe_{1-x}

| | Позиция | IS | H | QS | $W34$ | $W16$ | S |
|---|--------------------------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| $Tb_{28}Fe_{72}$ | $\updownarrow \Phi_2$ | 0.12 | 84 | 0 | 0.58 | 2.64 | 0.28 |
| | $\updownarrow \Phi_2$ | -0.02 | 152 | -0.03 | 0.51 | 1.15 | 0.14 |
| | \leftrightarrow | 0 | 170 | 0.04 | 0.82 | 0.82 | 0.20 |
| | $\updownarrow \Phi_2$ | 0.01 | 194 | 0 | 0.37 | 0.58 | 0.06 |
| | $\leftrightarrow \Phi_1$ | -0.02 | 218 | 0.05 | 0.76 | 0.81 | 0.13 |
| | $\leftrightarrow \Phi_1$ | 0.06 | 239 | 0.21 | 0.71 | 0.93 | 0.05 |
| | $\leftrightarrow \Phi_1$ | 0.06 | 257 | 0.21 | 0.77 | 1.01 | 0.05 |
| $Tb_{32}Fe_{68}$ | | 0.21 | 0 | 1.39 | 0.65 | — | 0.09 |
| | $\updownarrow \Phi_2$ | 0.15 | 95 | 0 | 0.39 | 1.8 | 0.16 |
| | $\updownarrow \Phi_2$ | -0.01 | 174 | -0.01 | 0.50 | 1.01 | 0.14 |
| | \leftrightarrow | 0 | 196 | 0.01 | 0.91 | 0.91 | 0.22 |
| | $\updownarrow \Phi_2$ | 0.04 | 221 | -0.01 | 0.46 | 0.88 | 0.12 |
| | $\leftrightarrow \Phi_1$ | -0.01 | 241 | 0.02 | 0.54 | 0.55 | 0.06 |
| | $\leftrightarrow \Phi_1$ | 0.08 | 260 | 0.08 | 0.81 | 1.73 | 0.10 |
| $Tb_{32}Fe_{68}$ Отжиг 250°C, 10 мин | $\leftrightarrow \Phi_1$ | 0.09 | 271 | 0.07 | 0.59 | 0.95 | 0.08 |
| | | 0.25 | 0 | 1.27 | 0.86 | — | 0.12 |
| | \updownarrow | 0.39 | 112 | -0.12 | 0.77 | 0.88 | 0.08 |
| | \leftrightarrow | -0.01 | 197 | 0.33 | 0.42 | 1.42 | 0.15 |
| | \leftrightarrow | 0.18 | 219 | 0.10 | 0.45 | 1.78 | 0.21 |
| | \leftrightarrow | 0.03 | 244 | 0.52 | 0.27 | 1.26 | 0.13 |
| | \leftrightarrow | 0.02 | 256 | -0.36 | 0.61 | 0.65 | 0.09 |
| \leftrightarrow | 0.18 | 267 | 0 | 0.79 | 0.79 | 0.10 | |
| | 0.17 | 301 | 0.02 | 0.72 | 1.05 | 0.15 | |
| | 0.37 | 0 | 1.38 | 1.13 | — | 0.09 | |

Примечание. IS – изомерный химический сдвиг относительно α -Fe, ± 0.02 мм/с; H – сверхтонкое поле на ядре, ± 3 кЭ; QS – квадрупольное расщепление, ± 0.02 мм/с; $W34$ и $W16$ – ширины внутренних и внешних линий секстета, соответственно, ± 0.02 мм/с; S – долевая заселенность позиции, ± 0.03 .

Работа выполнена Сибирским федеральным университетом (проект “Многослойные обменно-связанные пленочные структуры и наночастицы. Структура, магнитные свойства, приложения”) в рамках Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. № 23. С. 1446.
2. Исхаков Р.С., Столяр С.В., Чеканова Л.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 76. Вып. 11. С. 779.
3. Исхаков Р.С., Середкин В.А., Столяр С.В., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80. Вып. 10. С. 743.
4. Фролов Г.И., Яковчук В.Ю., Середкин В.А., Исхаков Р.С. и др. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 12. С. 69.
5. Хандрик К., Кобе С. Аморфные ферро-ферритмагнетики. М.: Мир, 1982. 296 с.
6. Русаков В.С., Введенский Б.С., Воропаева Е.Т., Николаева Е.Н. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 8. С. 2438.