

05;06;11;12

Перпендикулярная магнитная анизотропия в монокристаллических пленках $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}(100)$

© П.Д. Ким,¹ И.А. Турпанов,¹ С.В. Столяр,² Р.С. Исаков,¹ В.И. Юшков,³ А.Я. Бетенькова,¹
Л.А. Ли,¹ Е.В. Бондарева,¹ Т.Н. Исаева,¹ М.М. Карпенко¹

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН,
660036 Красноярск, Россия

e-mail: kim@iph.krasn.ru

² Красноярский государственный университет,
660041 Красноярск, Россия

³ Красноярский государственный технический университет,
660074 Красноярск, Россия

(Поступило в Редакцию 4 августа 2003 г.)

Исследованы кристаллическая структура и гистерезисные магнитные характеристики экваторных монокристаллических пленок CoPt/MgO , полученных методом магнетронного напыления, а также их модификация после термообработки этих пленок. Обнаружена перпендикулярная магнитная анизотропия в термообработанных пленках при условии их изготовления в диапазоне толщин $2 < d \leq 16$ nm. Установлена корреляция между величиной константы кристаллографической анизотропии пленки CoPt и степенью порядка упорядоченной по типу Ll_0 сверхструктуры этих сплавов. Выяснено влияние монокристаллической подложки MgO на формирование структуры и магнитных свойств пленок экваторных сплавов CoPt .

Сплавы CoPt с составами, близкими к экваторному, при упорядочении вида $\text{Al} \rightarrow \text{Ll}_0$ образуют тетрагональную магнитоодноосную сверхструктуру Ll_0 . В этом кристаллогеометрическом состоянии сплавы характеризуются следующими магнитными характеристиками: намагниченность насыщения $M_s = 800$ Gs, поле кристаллографической анизотропии $H_a = 125$ kOe [1]. Указанные магнитные характеристики удовлетворяют неравенству $H_a \gg 4\pi M_s$, что обеспечивает возможность реализации перпендикулярной магнитной анизотропии в тонких пленках данных экваторных сплавов при условии их изготовления с текстурой вида (001). Поэтому сплавы $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$ (наряду с $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$, $\text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50}$) в настоящее время рассматриваются как потенциальные системы для создания планарных сред магнитного хранения информации высокой плотности.

Магнитные характеристики, такие как величины поля анизотропии H_a , коэрцитивного поля H_c , степень прямоугольности петли гистерезиса $S = M_r/M_s$ (где M_r — остаточная намагниченность) упорядоченных экваторных сплавов CoPt определяются особенностями микроструктуры в данных сплавах, а именно размером зерна, дефектностью, степенью порядка η упорядоченной сверхструктуры Ll_0 и т.д. При упорядочении $\text{Al} \rightarrow \text{Ll}_0$ за тетрагональную ось может быть выбрана любая из трех осей $\langle 010 \rangle$ кубической ГЦК матрицы. Поэтому при отсутствии каких-либо внешних воздействий существует три типа зародышей C_i (C_1, C_2, C_3) упорядоченной сверхструктуры Ll_0 . Наличие трех типов зародышей C_i приводит к упругим напряжениям, в результате чего в сплаве происходит структурная самоорганизация, приводящая к сложному иерархическому строению микроструктуры [2]. Таким образом, при создании пленочных сред с необходимыми магнитными характеристиками

актуальным становится исследование способов (методов) целенаправленного формирования микроструктуры упорядоченных (или частично упорядоченных) сплавов $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}(\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}, \text{Fe}_{50}\text{Pd}_{50})$.

Наша работа посвящена исследованию гистерезисных магнитных свойств монокристаллических пленок экваторных сплавов CoPt , полученных на монокристаллических подложках $\text{MgO}(100)$ и выявлению ее роли в формировании магнитных характеристик данных ферромагнитных пленок.

Образцы и методика исследования

Исследуемые образцы были получены методом магнетронного напыления в атмосфере Ar. Рабочее давление составляло $2 \cdot 10^{-4}$ Торр. Во избежание химических неоднородностей образцов синтез осуществлялся попеременным напылением слоев металлов Co, Pt. Продолжительность напыления слоя металла τ_i была выбрана таким образом, что за каждый τ_i напылялся один мономолекулярный слой [3]. Диапазон толщин исследуемых пленок составлял $2 < d < 100$ nm. Толщина и химический состав пленок контролировались методом рентгенофлуоресцентного анализа. Изотермический отжиг осуществлялся в вакуумной камере с давлением не хуже $5 \cdot 10^{-6}$ Торр.

Петли гистерезиса снимались при комнатной температуре на вибрационном магнетометре в полях $H < 12$ kOe. Измерения проводились в двух геометриях: внешнее магнитное поле $H \parallel n$; $H \perp n$, где n — нормаль пленки. Структурные исследования образцов проводились на рентгеновском аппарате ДРОН-4 при комнатной температуре. Длина волны рентгеновского излучения составляла $\lambda = 0.154$ nm (CuK_α).

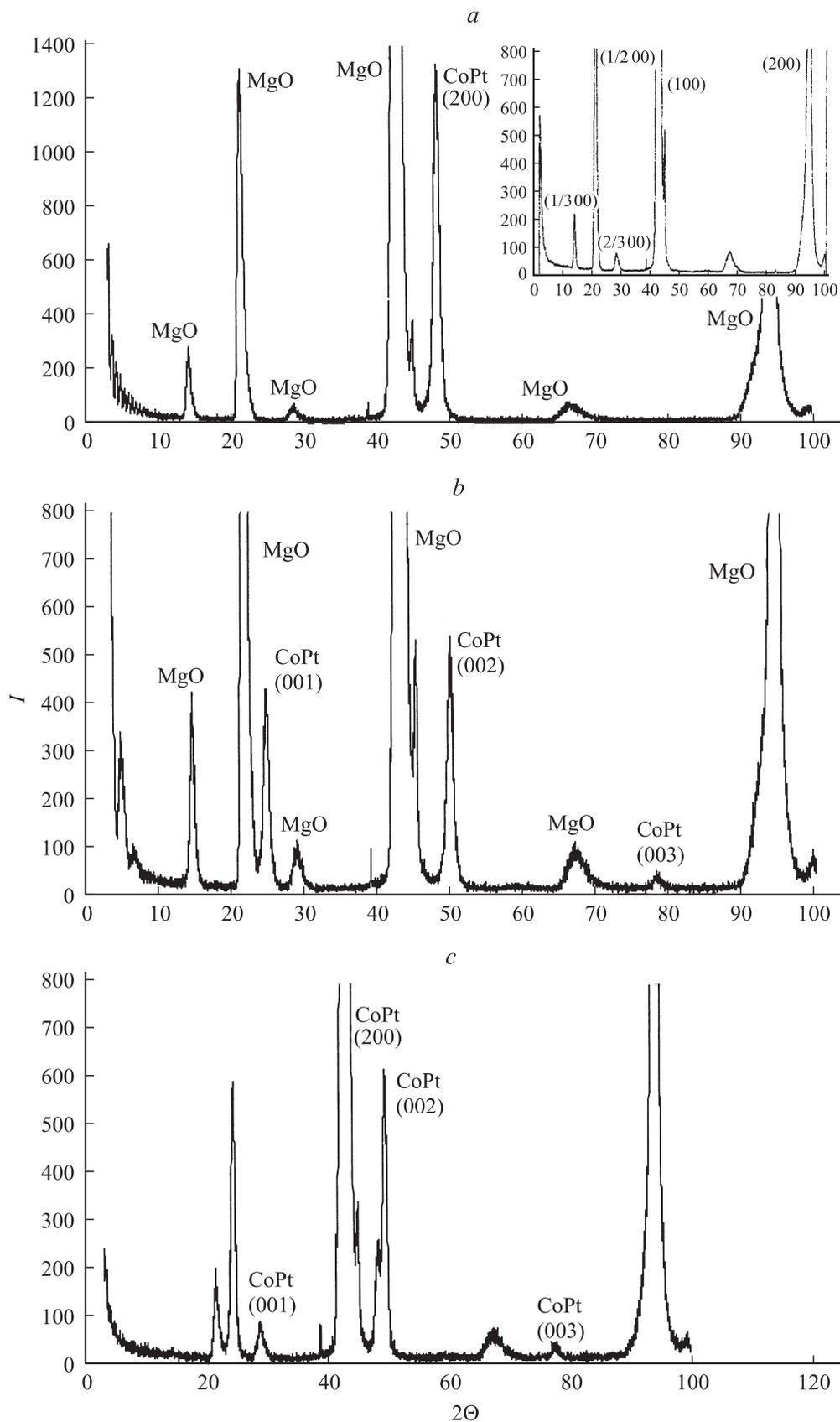


Рис. 1. Рентгенограммы пленок $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}$: *a* — свежеприготовленной пленки с $d = 19$ nm, *b* — термообработанной пленки с $d = 7$ nm, *c* — термообработанной пленки с $d = 15$ nm. На вставке — рентгенограмма от подложки MgO.

Структурные исследования

На рис. 1 приведены спектры рентгеновской дифракции исследуемых пленок. Рентгенограмма исходной пленки $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}(100)$ толщиной $d = 19$ nm, представленная на рис. 1, *a*, свидетельствует о монокристалличности исходного ГЦК состояния сплава $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$. Здесь регистрируется единственное отражение (200). Постоянная решетки сплава, рассчитанная из межплоскостного расстояния d_{200} , оказалась равной $a = 0.377$ nm. Дополнительные пики на этой рентгенограмме обусловлены дифракцией рентгеновского излучения на плоскостях подложки MgO. На вставке к рис. 1, *a* представлен спектр, полученный с подложки. Наблюдаемые отражения (1/200), (1/300), (2/300) и т.д. свидетельствуют, на наш взгляд, о наличии упорядоченно расположенных в MgO атомов примесей и о блочной структуре используемой нами подложки MgO. На рис. 1, *b* приведена рентгенограмма отожженной в течение 3 h при $T = 600^\circ\text{C}$ монокристаллической пленки $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}(100)$, изготовленной с толщиной $d = 7$ nm. Регистрируемые здесь отражения (001), (003) свидетельствуют об образовании в сплаве $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$ тетрагональной сверхструктуры Ll_0 в результате термоотжига. Ось тетрагональности оказалась параллельна нормали пленки n . Отношение интенсивностей рентгеновских отражений $I_{(001)}/I_{(002)}$ может быть использовано для оценки величины параметра порядка η сверхструктуры Ll_0 , ось тетрагональности которой параллельна нормали пленок [4]. Как оказалось, величина η увеличивалась при увеличении толщины подвергаемых термообработке пленок $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}(100)$. Полученная зависимость η от толщины пленки представлена на рис. 2. На рис. 1, *c* также приведена рентгенограмма пленки $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}(100)$ с $d = 15$ nm. Видно, что здесь наблюдается отражение (200) с интенсивностью, меньшей, чем интенсивность отражения (002). Для данного образца рассчитанное отношение $c/a = 0.978$. Регистрация отражения (200) свидетельствует о возникновении в пленке изучаемого сплава $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$ таких областей Ll_0 , в которых ось тетрагональности уже расположена в плоскости пленки. Действительно, с увеличением тол-

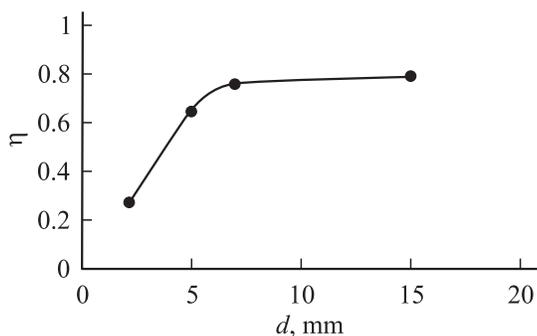


Рис. 2. Зависимость величины степени порядка η термообработанных пленок $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}$ от толщины d .

щины пленки $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$ выше 150 nm и при сохранении режима термоотжига наблюдалось увеличение интенсивности отражения (200), указывающее на увеличение доли областей Ll_0 фазы с планарным расположением оси тетрагональности в пленках.

Исследования магнитных свойств

Монокристаллические пленки в исходном состоянии независимо от толщины пленки CoPt характеризовались двумя легкими осями намагничивания, расположенными перпендикулярно друг к другу в плоскости исследуемых пленок. Степень прямоугольности петли гистерезиса S исходных пленок составляла 0.6–0.8 для всего изучаемого диапазона толщин $2 < d < 100$ nm. Величина коэрцитивного поля этих пленок также не зависела от толщины изучаемого образца d и составляла ~ 500 Oe. Термическая обработка исходных пленок при $T = 600^\circ\text{C}$ в течение 3 h привела к кардинальным изменениям гистерезисных магнитных характеристик. Установлено, что данный режим термообработки для пленок с толщиной $d \leq 16$ nm приводил к формированию легкой оси намагничивания, параллельной нормали пленки n . В случае же пленок с $d > 16$ nm легкая ось намагничивания по-прежнему располагалась в плоскости пленки. Степень прямоугольности петли гистерезиса S , измеренной в легком направлении, составляла 0.9–1. На рис. 3 приведены нормированные зависимости $M(H)$ ($H \parallel n$, $H \perp n$) термообработанной пленки толщиной $d = 10$ nm, свидетельствующие о наличии перпендикулярной анизотропии. Видно, что изотермический отжиг привел к формированию магнито жесткого состояния в исследуемых пленках. Величина коэрцитивного поля H_c для пленок толщиной, превосходящей 16 nm, менялась в пределах 6–10 kOe. Оказалось, что величина H_c термообработанных пленок с $d < 16$ nm зависит от толщины образца: $H_c(d)$. На рис. 4 приведена полученная экспериментальная зависимость $H_c(d)$ для этих пленок. Отметим, что петли гистерезиса этих пленок характеризовались величиной параметра $S = 1$.

Измеренные величины коэрцитивного поля H_c монокристаллических термообработанных пленок $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}(100)$ с $d < 16$ nm, $S = 1$ представляют собой разность между полем кристаллографической магнитной анизотропии H_a и размагничивающим полем формы пленки $H_c = H_a - 4\pi M$ [5]. Поэтому обнаруженная нами экспериментальная зависимость $H_c(d)$ может быть использована для расчета величины H_a , и, следовательно, фундаментальной характеристики ферромагнетика K — константы кристаллографической анизотропии $K = H_a M / 2$ ($M = 800$ Gs) от толщины изучаемой пленки. Таким образом, установлено, что в монокристаллических упорядоченных (частично упорядоченных) пленках $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}(100)$ с Ll_0 структурой, характеризующихся перпендикулярной магнитной анизотропией в интервале толщин

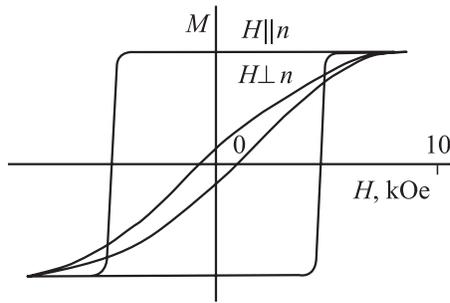


Рис. 3. Нормированные зависимости $M(H)$, полученные в двух геометриях $H \parallel n$, $H \perp n$, термообработанной пленки $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}$ с $d = 10$ nm.

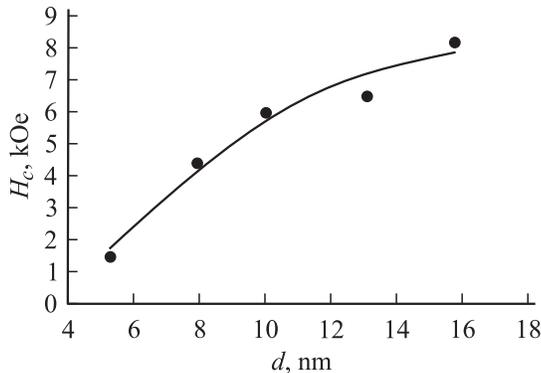


Рис. 4. Толщинная зависимость величины коэрцитивного поля $H_c(d)$, измеренная в легком направлении намагничивания, термообработанных пленок $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}$.

$2 < d \leq 16$ nm, константа этой кристаллографической анизотропии K изменяется в диапазоне значений $4 \cdot 10^6 < K < 8 \cdot 10^6$ erg/sm³ в зависимости от толщины пленки.

Обсуждение результатов

В результате термообработки исходных неупорядоченных твердых растворов $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$, изготовленных в виде тонких пленок на монокристаллических подложках $\text{MgO}(100)$, в них формируется упорядоченная сверхструктура типа Ll_0 . Анализ гистерезисных магнитных свойств этих сплавов показывает следующее: 1) термообработанные пленки с толщинами $d \leq 16$ nm обладают перпендикулярной магнитной анизотропией; 2) величина коэрцитивного поля H_c , измеренная вдоль легкого направления намагничивания, зависит от толщины пленки (рис. 4).

Известно, что пленочное состояние сплава существенно отличается от массивного аналога по ряду причин. Во-первых, тонкие пленки характеризуются повышенной концентрацией дефектов. Во-вторых, пленочная система является по сути дела двумерным объектом. В-третьих,

на состояние сплава, изготовленного в виде тонкой пленки, огромное значение оказывает подложка.

Перпендикулярная анизотропия, обнаруженная в отожженных тонких пленках $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}(100)$ с $d \leq 16$ nm, обусловлена наличием эпитаксиальной связи ферромагнитного сплава с монокристаллической подложкой. Формирование тетрагональной оси вдоль кристаллографических направлений $\langle 100 \rangle$ и $\langle 010 \rangle$ затруднено, поскольку приводит к повышению энергии упругих напряжений в тонкой ферромагнитной пленке. Зарождение единственного зародыша $\langle 001 \rangle$ упорядоченной Ll_0 фазы (рис. 1, b) является самоорганизующимся процессом, при котором происходит минимизация энергии упругих напряжений. Увеличение толщины ферромагнитного сплава $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$ приводит к ослаблению роли монокристаллической подложки MgO , поэтому в более толстых пленках, подвергнутых термообработке, появляется возможность формирования всех трех типов упорядоченных доменов C_i (C_1, C_2, C_3) (рис. 1, c). Последнее приводит к установлению оси легкого намагничивания параллельно плоскости магнитной пленки и к ее изотропии в плоскости пленки.

Обсудим установленную зависимость $H_c(d)$ (рис. 4). Увеличение коэрцитивного поля с ростом толщины ферромагнитного сплава $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$ отражает факт роста константы кристаллографической анизотропии K . Данный результат, по нашему мнению, связан с изменением величины степени порядка η упорядоченной сверхструктуры Ll_0 (рис. 3). Действительно, экспериментально полученные зависимости $H_c(d)$ (рис. 4) и $\eta(d)$ (рис. 2) коррелируют между собой для этих пленок с толщинами $2 < d \leq 16$ nm. При увеличении параметра η сплава CoPt величина H_c , следовательно и величина K , возрастает. Зависимость параметра порядка η частично упорядоченной сверхструктуры Ll_0 CoPt от толщины пленок, по-нашему мнению, также является следствием наличия жесткой эпитаксиальной связи монокристаллического ферромагнитного сплава $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$ с монокристаллической подложкой $\text{MgO}(100)$. Покажем это: при упорядочении ГЦК $\rightarrow \text{Ll}_0$ объем сплава должен остаться неизменным: $V_{\text{ГЦК}} \approx V_{\text{Ll}_0}$ или $a^3 = a'^2 c$, где a' и c — параметры тетрагональной кристаллической решетки Ll_0 фазы; при упорядочении величина c уменьшается. Для полностью упорядоченной сверхструктуры Ll_0 ($\eta = 1$) $c/a = 0.972$ [2]. Следовательно, величина a' в этих пленках должна возрастать. В то же время в исследуемых нами тонких монокристаллических пленках изменению величины a' препятствует жесткая связь с подложкой, или, другими словами, в тонких монокристаллических пленках $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}(100)$ подложка препятствует процессу упорядочения в обсуждаемом интервале малых толщин d . При увеличении толщины пленки сплава $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$ влияние монокристаллической подложки $\text{MgO}(100)$ уменьшается, так как упругие напряжения спадают как $1/d$, и степень порядка η сплава растет.

Таким образом, в данной работе исследованы гистерезисные магнитные характеристики монокристаллических пленок $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{MgO}(100)$. Показано, что наличие и величина перпендикулярной магнитной анизотропии в упорядоченных пленках с L_0 структурой в диапазоне толщин $2 < d \leq 16$ nm полностью определяются монокристаллической подложкой MgO. Эта подложка влияет на формирование кристаллической решетки упорядоченного ферромагнитного сплава двояко: во-первых, она приводит к формированию оси тетрагональности сплава CoPt вдоль нормали пленки; во-вторых, она препятствует процессу упорядочения в этом сплаве.

Список литературы

- [1] Ермаков А.Е., Майков В.В. // ФММ. 1990. № 5. С. 201–203.
- [2] Власова Н.И., Кандаурова Г.С., Щеголева Н.Н. // ФММ. 2000. Т. 90. № 3. С. 31–50.
- [3] Ким П.Д. // НМММ сборник тр. XVII Международной школы-семинара. М., 2000. С. 537–539.
- [4] Уманский М.М., Золина З.К. Сборник задач по рентгеноструктурному анализу. МГУ, 1975. 232 с.
- [5] Саланский Н.М., Ерухимов М.Ш. Физические свойства и применение магнитных пленок. Новосибирск, 1975. 322 с.