

**СТРУКТУРНЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА CoPt(111) ПЛЕНОК,
ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТВЕРДОФАЗНЫХ РЕАКЦИЙ**В. С. Жигалов^{1*}, В. Г. Мягков¹, А. Н. Рыбакова², И. А. Турпанов¹, Г. Н. Бондаренко³¹Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31³Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

*E-mail: zhigalov@iph.krasn.ru

Исходные Co(001)/Pt(111) плёночные структуры получены последовательным термическим осаждением слоя Co с кубической кристаллической решеткой и Pt(111) из мишени, распыляемой с использованием методики магнетронного распыления на монокристаллическую подложку MgO(001) в вакууме 10^{-6} торр. В экспериментах использовались образцы с 1Co:3Pt и 1Co:1Pt атомным отношением общей толщиной порядка 300 нм. Исходные образцы отжигались в диапазоне температур от 250 до 850 °C с шагом 50 °C в течение 40 мин. Рентгеноструктурные исследования показали, что в двухслойных структурах с атомным соотношением реагентов 1/3, при температурах отжига $T = 500$ и 850 °C в результате межслойного химического взаимодействия формируются фазы эпитаксиального кубического соединения CoPt₃ (L1₂) с ГЦК-решеткой ($a = 3,856$ Å). Отжиги этих же структур с соотношением 1/1 приводят к формированию второй фазы CoPt (L1₀) с тетрагональным искажением, которая способствует получению высоких значений константы одноосной магнитокристаллографической анизотропии K_1 и определяет легкое направление намагничивания (ось c). Синтезированный образец, состоящий из двух магнитных фаз, имеет намагниченность насыщения, сопоставимую со значением M_S для пленки L1₂-CoPt₃, плоскостную анизотропию с $K_1 = 5,6 \cdot 10^5$ эрг/см³ и $H_C \sim 10^3$ Э. Вновь сформированная L1₀-CoPt-фаза растет эпитаксиально на базе предварительно синтезированной L1₂-CoPt₃-фазы с тем же ориентационным соотношением. Особенности пленки с атомным соотношением Co/Pt = 1/1 при $T = 850$ °C является наличие «вращательной» анизотропии, обусловленное обменным взаимодействием двух сформированных упорядоченных фаз CoPt(111) и CoPt₃(111) с ферромагнитным порядком, и легкую ось, которую можно переориентировать наложением магнитного поля. Меняя соотношение реагентов в системе, существует возможность изменять последовательность фазообразования.

Ключевые слова: твердофазный синтез, плёночные образцы, твёрдые растворы, магнитные свойства, кристаллическая структура.

**STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF CoPt(111) FILMS OBTAINED
BY USING SOLID-PHASE REACTIONS**V. S. Zhigalov^{1*}, V. G. Myagkov¹, A. N. Rybakova², I. A. Turpanov¹, G. N. Bondarenko³¹Kirensky Institute of Physics SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation³Institute of chemistry and chemical technology SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

*E-mail: zhigalov@iph.krasn.ru

The original Co(001)/Pt(111) film structures are obtained by consequent thermal deposition layer with a cubic crystal lattice and Pt(111) from the target, sprayed using a magnetron sputtering technique on a single crystal substrate of MgO(001) in a vacuum of 10^{-6} Torr. In the experiments, samples 1Co:3Pt and 1Co:1Pt atomic ratio of the total thickness of about 300 nm are used. Initial samples were annealed in the temperature range from to 250 °C to 850 °C in

increments of 50 for 40 minutes. X-ray diffraction analysis showed that in two-layer structures with the atomic ratio of reagents 1/3, at temperatures of annealing at $T = 500$ and 850 °C in the interlayer chemical interaction to form phase epitaxial cubic compounds CoPt_3 ($L1_2$) c FCC-lattice ($a = 3.856$ Å). Annealing of these same structures with 1/1 lead to the formation of the second phase CoPt ($L1_0$) with tetragonal distortion, which helps to ensure a high value of the uniaxial magnetocrystalline anisotropy constant K_1 and determines easy magnetization direction (axis c). Synthesized sample consisting of two magnetic phases is the saturation magnetization, comparable with the value of M_S for the film $L1_2$ - CoPt_3 , planar anisotropy with $K_1 = 5.6 \cdot 10^5$ erg / sm^3 and $H_c \sim 10^3$ E. Newly formed $L1_0$ - CoPt phase grows epitaxially on the basis of pre-synthesized $L1_2$ - CoPt_3 phase with the same orientation relationship. The newly formed $L1_0$ - CoPt phase grows epitaxially on the basis of pre-synthesized $L1_2$ - CoPt_3 phase with the same orientation relationship. Features films with atomic ratio of $\text{Co} / \text{Pt} = 1/1$ at $T = 850$ °C is the presence of "rotational" anisotropy due to the exchange interaction of two ordered phases formed CoPt (111) and CoPt_3 (111) with a ferromagnetic order and an easy axis, which can be applied a magnetic field to refocus. By changing the ratio of the reactants in the system, it is possible to change the sequence of phase formation.

Keywords: solid-phase synthesis, film samples, solid solutions, magnetic properties, crystal structure.

1. Введение

Структурные и магнитные свойства тонких плёнок FePd , FePt и CoPt , упорядоченных по типу $L1_0$, широко исследуются в связи с потенциальным использованием их для высокоплотной магнитной записи информации, а также в качестве специальных магнитных сред [1; 2]. Для получения кубических соединений, упорядоченных по типу $L1_2$, или высокоанизотропных фаз $L1_0$ с тетрагональным искажением необходимы продолжительные высокотемпературные отжиги либо высокие температуры синтеза [2; 3]. В результате тетрагонального искажения $L1_0$ -фаза обладает большой константой одноосной магнитокристаллографической анизотропии K_1 с легким направлением намагничивания, совпадающим с осью c . В последние годы интенсивно исследуются плёночные сплавы $\text{Co}_x\text{Pt}_{1-x}$, так как имеют уникальные магнитные и структурные свойства, необходимые для различных практических приложений [4–6]. В CoPt образцах $L1_0$ -фаза была обнаружена при отжиге во многих системах, в частности, в пленках интерметаллических сплавов [6], мультислоях [7], подробно исследуются фазовые превращения типа $A1$ (разупорядоченный) $\rightarrow L1_1 \rightarrow A1 \rightarrow L1_0$ [8; 9] и в пленках с текстурой $\text{CoPt}(111)$, приготовленных с использованием подслоя $\text{Pt}(111)$ [10].

Исходные пленочные образцы для последующего отжига чаще всего изготавливаются методами соосаждения элементов с помощью магнетронного распыления либо изготавливаются в виде мультислойных систем на монокристаллических подложках из $\text{MgO}(001)$, $\text{MgO}(111)$, Al_2O_3 и др. [8; 9; 11; 12]. Одним из предлагаемых нами способов является использование межслойных химических взаимодействий в двухслойных структурах под воздействием термической обработки [13]. Однако публикаций, связанных с изучением твёрдофазных реакций между элементными Co - и Pt -реагентами, в литературе недостаточно [14]. Кроме того, крайне мало публикаций об условиях формирования и упорядочения CoPt - и CoPt_3 -фаз, и полностью отсутствуют данные о магнитных свойствах тонких плёнок этих фаз, синтезированных с помощью твёрдофазных реакций. Полагаем, что важную информацию об условиях формирования и упорядочения CoPt -, CoPt_3 -фаз в течение роста исходных структур и постростовых отжигов может дать изучение

твёрдофазных реакций между элементными Co - и Pt -реагентами.

В данной работе исследуется твёрдофазный синтез различных фаз, изготавливаемых путем последовательного отжига двухслойной структуры $\beta\text{-Co}(001)/\text{Pt}(111)$ с различным атомным соотношением элементов, осажденных на монокристаллическую подложку MgO . Исследуются процессы формирования фаз в процессе твёрдофазного синтеза под воздействием термообработки, структурные, магнитные и анизотропные свойства синтезируемых фаз.

2. Образцы и методика эксперимента

Исходные $\text{Co}(001)/\text{Pt}(111)$ плёночные структуры получены последовательным термическим осаждением слоя Co с кубической кристаллической решеткой и Pt из мишени, распыляемой с использованием методики магнетронного распыления на монокристаллическую подложку $\text{MgO}(001)$ в вакууме 10^{-6} торр. В экспериментах использовались образцы с $1\text{Co}:3\text{Pt}$ и $1\text{Co}:1\text{Pt}$ атомным отношением общей толщиной порядка 300 нм. Осаждение слоёв велось при температуре $250\text{--}280$ °C, при которой происходил эпитаксиальный рост $\text{Co}(002)$ и $\text{Pt}(111)$ на $\text{MgO}(001)$ -поверхности без протекания твёрдофазной реакции между слоями.

Намагниченность насыщения M_S , константы магнитокристаллической анизотропии и кривые крутящих моментов измерялись в анизометре с максимальным магнитным полем 18 кЭ. Крутящие моменты в плоскости пленки $L_{||}(\varphi)$ приведены на единицу объёма плёнки в относительных единицах. Рентгенофлуоресцентный анализ был использован для определения толщин Co - и Pt -слоев. Идентификация образующихся фаз была проведена на дифрактометре ДРОН-4-07 (CuK_α -излучение). Рентгенографические исследования эпитаксиальной ориентации фаз проведены на дифрактометре PANalytical X'Pert PRO с матричным твердотельным детектором PIXcel. Степень упорядочения (η) фазы $L1_0$ - CoPt определялась путем уточнения заполняемости соответствующих атомных позиций Co и Pt в структуре методом полнопрофильного рентгеноструктурного анализа. Все исходные $\text{Pt}(111)/\beta\text{-Co}(001)/\text{MgO}(001)$ образцы подвергались термическому отжигу в температурном диапазоне от 250 до 850 °C с шагом 50 °C и выдержкой при каждой температуре 40 мин.

3. Результаты эксперимента

Атомное соотношение Co/Pt \approx 1/3. На рис. 1 представлены дифрактограммы исходного двухслойного образца Co/Pt и дифрактограммы с этого же образца после отжига при $T = 500$ и 850 °C. Исходный образец содержал только рефлексы β -Co(001) и Pt(111) (рис. 1, *a*), что указывает на Pt(111)/Co(001)/MgO(001) эпитаксиальный рост. Анализ рентгеновских измерений показывает, что слои Co и Pt растут в соответствии с ориентационными соотношениями Pt(111)[-110] \parallel β -Co(001)[110] \parallel MgO(001)[001]. Кривая крутящих моментов для исходного образца показала (рис. 2, *a*), что в структуре

слой кубического кобальта имеет двухосную анизотропию $K_1(\beta\text{-Co})$ с лёгкими осями, направленными вдоль [110] и [1-10] подложки MgO(001) и константой $\sim 5,0 \cdot 10^5$ erg/cm³, совпадающей с первой константой магнитокристаллографической анизотропии массивного кобальта. Значения коэрцитивной силы $H_C \sim 100$ Oe, константы K_4 и ориентационные соотношения $\beta\text{-Co}[001] \parallel \text{MgO}(001)[001]$ были типичными для Co(002)-плёнок на MgO(001), полученных различными способами [14]. Последующее осаждение Pt-слоя не меняло магнитных характеристик первоначальной кобальтовой плёнки.

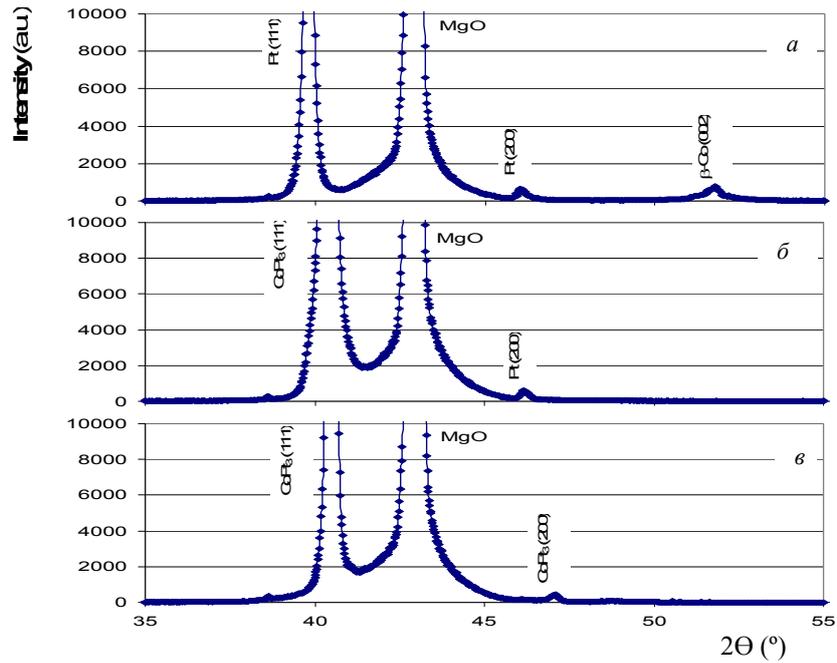


Рис. 1. Формирование кубической фазы CoPt_3 при термообработке в двухслойной системе Co/Pt с атомным соотношением элементов 24/76, осажденной на монокристаллическую подложку MgO: слоистая структура MgO(001)/ β -Co(001)/Pt(111), изготовленная при температуре подложки (T_s) 250 °C (*a*); температура отжига слоистой структуры при T_{an} 500 °C (*b*); температура отжига структуры 850 °C (*c*)

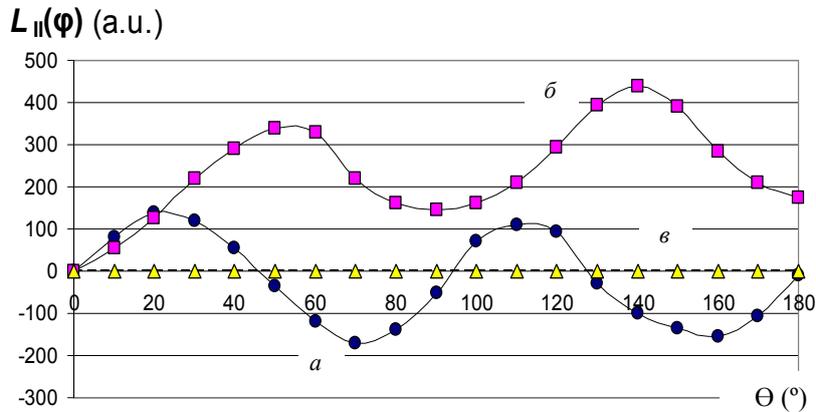


Рис. 2. Эволюция кривых крутящего момента $L_{||}(\varphi)$ в плоскости $\beta\text{-Co}(001)/\text{Pt}(111)/\text{MgO}(001)$ плёночной системы: исходный образец (*a*), после отжига при $T = 500$ °C (*b*) и 850 °C (*c*)

Отжиги при $T = 500$ и 850 °C способствуют формированию пленки эпитаксиального кубического соединения CoPt_3 с ГЦК ($Fm\bar{3}m$)-решеткой, параметр которой составлял величину $a = 3,856$ Å при отжиге 500 °C и $a = 3,852$ Å при отжиге 850 °C. Небольшая разница в значениях параметра решетки, тем не менее, приводит к значительному различию в магнитных и магнитоанизотропных параметрах синтезированной фазы CoPt_3 .

На рис. 2, б, в приведены кривые крутящего момента для двух температур отжига. Отжиг при $T = 500$ °C, не меняя характера кривой для исходной пленки, способствует наведению вращательной анизотропии. Это анизотропия, легкую ось которой можно повернуть наложением магнитного поля и которая носит обменный характер [15]. В результате этого кривая крутящих моментов располагается сверху при намагничивании в одном направлении и снизу при намагничивании в другом направлении.

Анализируя полученные данные по параметрам решетки, анизотропным свойствам и рентгеновские спектры (см. рис. 1), можно предположить, что появление вращающейся обменной анизотропии при температуре отжига 500 °C связано с обменной связью магнитной фазы CoPt_3 с непрореагировавшей частью $\text{Pt}(200)$, магнитно поляризованной [10]. Отжиг при $T = 850$ °C приводит к полному формированию эпитаксиально упорядоченной CoPt_3 -фазы, максимально ориентированной по направлению $[111]$ (см. рис. 1, в). Пленка $\text{CoPt}(111)$, отожженная при $T = 850$ °C, практически не характеризуется анизотропными свойствами (см. рис. 2, в) благодаря тому, что вторая константа магнитокристаллической анизотропии $K_2(\text{CoPt}(111))$ становится близкой к 0.

В пользу предположения о неполном формировании CoPt_3 -фазы (при $T = 500$ °C) свидетельствует зависимость намагниченности насыщения от температуры отжига (рис. 3). Температура отжига в 500 °C является началом твердофазной реакции, а сформированная при этом фаза имеет намагниченность примерно на 20 % меньше намагниченности исходной структуры.

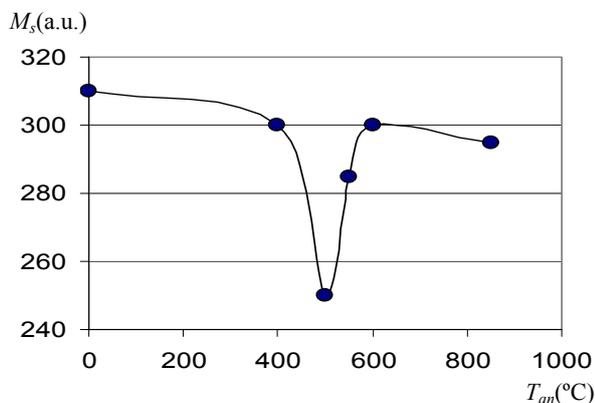


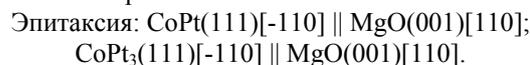
Рис. 3. Зависимость намагниченности насыщения в единицах относительной намагниченности исходной структуры от температуры отжига

Атомное соотношение $\text{Co/Pt} \approx 1/1$. Для получения кубического соединения CoPt , упорядоченного по типу $L1_0$ с тетрагональным искажением, необходим эквиатомный состав [2]. Упорядоченная $L1_0$ -фаза обладает высокими значениями константы одноосной магнитокристаллографической анизотропии K_1 , при этом легкое направление намагничивания совпадает с осью c . Необходимый химический элементный состав для формирования $L1_0$ -фазы согласно диаграмме состояний был получен путем дополнительного осаждения слоя Co на синтезированные пленки CoPt_3 (см. рис 1, в) и представлен в таблице. Полученная таким образом структура Co/CoPt_3 вновь отжигалась при $T = 850$ °C в течение 40 мин.

Химический состав исходных пленок Co/Pt до и после дополнительного нанесения слоя Co

	Было	Стало
Pt	76 at. %	45,3 at. %
Co	24 at. %	54,7 at. %

На рис. 4 показаны рентгеновские спектры синтезированных таким образом образцов. Из рисунка видно, что в исследуемой системе формируются две эпитаксиальные кубические фазы: $L1_2\text{-CoPt}_3(111) - Fm\bar{3}m$ с параметром решетки $a = 3,856$ Å и $L1_0\text{-CoPt}(111) - Pm\bar{3}m$ с параметром $a = 3,755$ Å. Ориентационные соотношения относительно граней подложки MgO составляют выражения:



Вновь сформированная $L1_0\text{-CoPt}$ фаза растет эпитаксиально на базе предварительно синтезированной $L1_2\text{-CoPt}_3$ фазы с тем же ориентационным соотношением. Этот факт характеризует технологическую возможность влияния на рост и формирование нужных соединений с необходимой кристаллографией в данной системе элементов. Синтезированный образец, состоящий из двух магнитных фаз, имел намагниченность насыщения, сопоставимую со значением M_s для пленки $L1_2\text{-CoPt}_3$ (рис. 3), плоскостную анизотропию с $K_1 = 5,6 \cdot 10^5$ эрг/см³ и $H_C \sim 10^3$ Ое.

На рис. 5 приведены кривые крутящего момента для синтезированной пленки, имеющей состав, близкий к эквиатомному и отожженной при температуре 850 °C. Кривая крутящих моментов располагается сверху при намагничивании в одном направлении и снизу при намагничивании в другом направлении, однако в отличие от пленки состава $\text{Co/Pt} = 1/3$ состоит из 12 пиков для обоих направлений намагничивания. Логично предположить, что количество максимумов определяется специфической ориентацией образующихся кристаллов (111) относительно кристаллических плоскостей подложки MgO .

Эпитаксиальные ориентации кристаллитов $\text{CoPt}(111)$ и $\text{CoPt}_3(111)$ были определены с помощью рентгенографических исследований с использованием ϕ -сканирования. На рис. 6 приведены результаты асимметричного ϕ -сканирования отражений (113)

от подложки MgO и отражений {311} и {211} от синтезированных фаз CoPt, CoPt₃ после отжига при $T = 850$ °C. Темные пятна на рис. 6 соответствуют дифракционным отражениям, зарегистрированным при соответствующем угле φ поворота образца вокруг оси, перпендикулярной подложке. При повороте образца на 180° регистрируются 6 затенений, что соответствует числу максимумов на кривой крутящих моментов при намагничивании в одну сторону (рис. 5). Исходя из кристаллографической ориентации сформированных фаз CoPt(111) и CoPt₃(111), можно предположить, что рост кристаллитов происходит на базе Pt(111) по диагоналям подложки MgO, как это схематично показано на рис 7.

Отметим, что отжиг пленки с атомным соотношением Co/Pt = 1/1 при $T = 850$ °C также способствует наведению вращательной анизотропии, носящей обменный характер, легкую ось которой можно переориентировать наложением магнитного поля. В результате этого кривая крутящих моментов располагается сверху при намагничивании в одном направлении и снизу – при намагничивании в другом. Анализируя полученные рентгеновские спектры (рис. 4) и особенности анизотропных свойств, можно предположить, что появление вращательной анизотропии при температуре отжига 850 °C обусловлено обменным взаимодействием двух сформированных упорядоченных фаз CoPt(111) и CoPt₃(111) с ферромагнитным порядком [15].

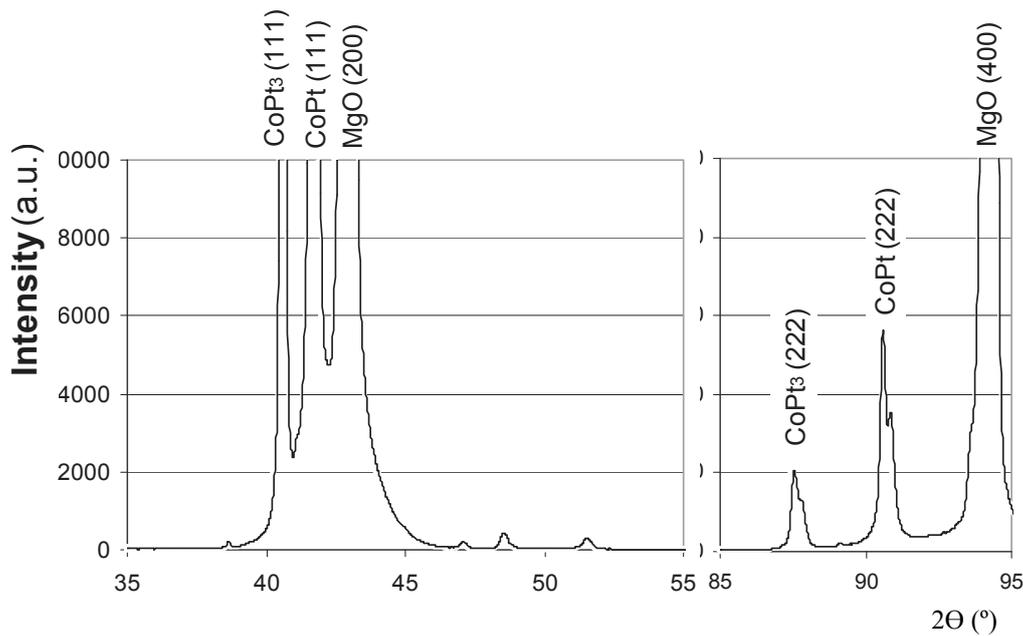


Рис. 4. Формирование кубических фаз в системе Co/CoPt₃(111)/MgO с атомным отношением элементов Pt/Co = 45,3/54,7 после отжига при $T = 850$ °C

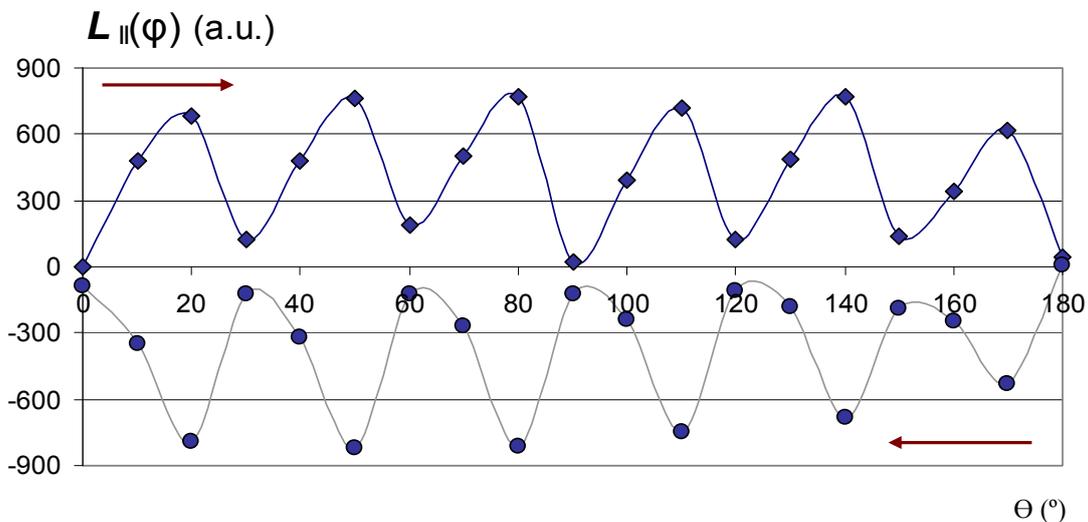


Рис. 5. Кривые крутящих моментов для пленки эквипотного состава, отожженной при 850 °C

CoPt(111){311} CoPt(111){211} CoPt₃(111){311} CoPt₃(111){211}

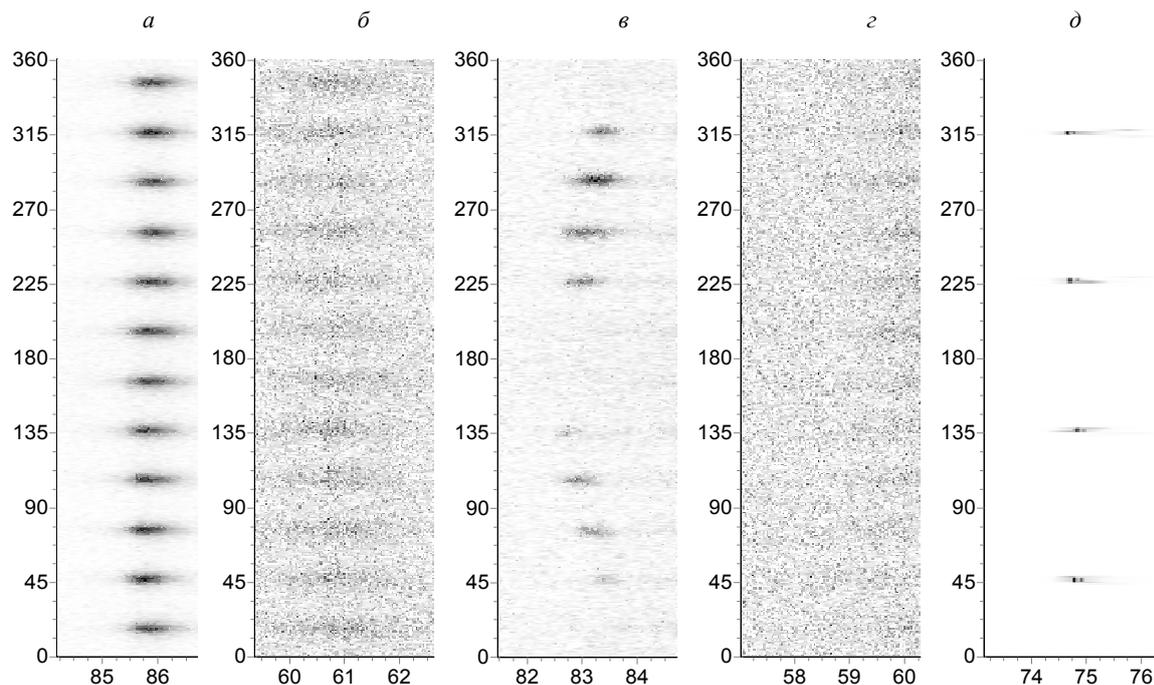


Рис. 6. Результаты асимметричного ϕ -сканирования отражений $\{311\}$ $\{211\}$ от пленки $\text{CoPt}(111)$ – (*a, б*) и тех же отражений от пленки $\text{CoPt}_3(111)$ (*в, г*), отражения $\{113\}$ от подложки MgO (*д*). Температура отжига $T_{\text{отж}} \sim 850$ °С. Темные пятна соответствуют дифракционным отражениям, зарегистрированным при соответствующем угле ϕ поворота образца вокруг оси, перпендикулярной подложке

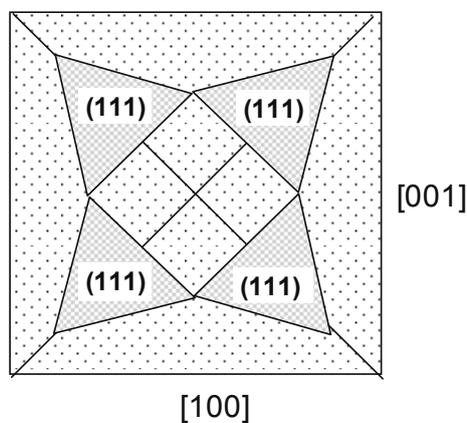


Рис. 7. Схема ориентаций кристаллитов $\text{CoPt}(111)$ и $\text{CoPt}_3(111)$ относительно граней подложки $\text{MgO}(100)$

4. Заключение

По итогам проведенных исследований показано, следующее:

1. В двухслойных пленке $\beta\text{-Co/Pt}(111)$ с атомным соотношением элементов 1/3, осажденной на монокристаллической подложке $\text{MgO}(001)$, в результате твердофазной химической реакции при термообработке формируется кубическая фаза CoPt_3 с плоскостью (111). Это позволяет предположить, что кобальт диффундирует в платину, кристаллографическая ориентация которой становится определяющей.

2. Добавление к синтезированному образцу $\text{CoPt}_3(111)$ кобальта до атомного состава $\text{Co/Pt} = 1/1$

способствует формированию высокоанизотропной фазы CoPt при термообработке. При этом ориентация вновь образованной фазы (111) повторяет ориентацию предыдущей. Технологически установлено, что с помощью твердофазного синтеза существует возможность влиять на формирование необходимой фазы с помощью регулирования нужного соотношения атомного состава реагентов и температуры.

3. Анизотропия синтезированных фаз обладает свойствами вращающейся анизотропии, легкая ось которой переключается при смене направления приложенного магнитного поля. Природа эффекта, на наш взгляд, заключается в обменном взаимодействии сформированных магнитных фаз.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №15-02-00948. Авторы статьи выражают благодарность Леониду Александровичу Соловьеву за проведение ϕ -сканирования.

Acknowledgment. This work was financially supported by RFFI grant No. 15-02-00948. The authors are grateful to Solovyov Leonid Aldeksandrovich for conducting ϕ -scan.

Библиографические ссылки

1. Interplay between structural and magnetic properties of $L1(0)$ -FePt(001) thin films directly grown on MgO(001) / F. M. Almeida [et al.] // *J. of Applied Physics*. 2009. P. 105.
2. Size and shape effects on the order–disorder phase transition in CoPt nanoparticles / D. Alloyeau [et al.] // *Nature Mater*. 2009. P. 940.
3. Influence of cristal structure on the perpendicular magnetic anisotropy of an epitaxial CoPt alloy / J. C. A. Huang [et al.] // *J. of Applied Physics*. 1999. P. 85–90.
4. Initial preorder as condition for $L1_0$ ordering in ultrathin CoPt films / L. Reichel [et al.] // *J. of Applied Physics*. 2013. P. 114.
5. Electric-field control of surface magnetic anisotropy: a density functional approach / H. Zhang [et al.] // *New J. Physics*. 2009. Vol. 11. P. 51–57.
6. On the relationship of magnetocrystalline anisotropy and stoichiometry in epitaxial $L1_0$ CoPt (001) and FePt (001) thin films / K. Barmak [et al.] // *J. of Applied Physics*. 2005. P. 98.
7. Enhancement of perpendicular magnetic anisotropy through reduction of Co-Pt interdiffusion in (Co/Pt) multilayers / S. Bandiera [et al.] // *J. of Applied Physics*. 2012. Vol. 100. P. 42–47.
8. Evolution of structure and magnetic properties of sputter-deposited CoPt thin films on MgO(111) substrates / A.-Ch. Sun [et al.] // *Scripta Materials*. 2009. P. 61–73.
9. Structural studies of high-Ku metastable CoPt thin films with long-range order / Fu-Te Yuan [et al.] // *J. of Applied Physics*. 2012. P. 111–116.
10. Lin C.-J., Gorman G. L. Evaporated CoPt Alloy films with strong perpendicular magnetic anisotropy // *J. of Applied Physics*, 1992. P. 1600.
11. Low temperature growth of FePt and CoPt films on MgO(111) substrate / F.-T. Yuan [et al.] // *J. of Applied Physics*. 2011. P. 109.
12. MBE-Growth of Chemically-Ordered Co-Pt and Fe-Pt Alloy Phases / R. F. C. Farrow [et al.] // *The epitaxial growth process*. 1994. P.106.
13. Magnetic and Structural Properties of Granular Films Al_2O_3 -FePd₃ Synthesized by Aluminothermy / В. С. Жигалов [и др.] // *Solid State Phenomenon*. 2014. P. 215–218.
14. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в эпитаксиальных Pt/Co/MgO(001) тонких пленках / В. Г. Мягков [и др.] // *Физика твердого тела*. 2000. Т. 42. С. 937.
15. Суху Р. Магнитные тонкие пленки. М. : Мир, 1967. 175 с.

References

1. Almeida F. M., Planckaert N. et al. Interplay between structural and magnetic properties of $L1(0)$ -FePt(001) thin films directly grown on MgO(001). *Journal of Applied Physics*. 2009, p.105–110.
2. Alloyeau D., Ricolleau C., Mottet C. et al. Size and shape effects on the order–disorder phase transition in CoPt nanoparticles. *Nature Mater*. 2009, p. 940.
3. Huang J. C. A., Hsu A. C., Lee Y. H., Wu T. H., Lee C. H. Influence of cristal structure on the perpendicular magnetic anisotropy of an epitaxial CoPt alloy. *Journal of Applied Physics*. 1999, p. 85–90.
4. Reichel L., Fahler S., Schultz L., Leistner K. Initial preorder as condition for $L1_0$ ordering in ultrathin CoPt films. *Journal of Applied Physics*. 2013, p. 114.
5. Zhang H., Richter M., Koepernic, Opahle I., et al. Electric-field control of surface magnetic anisotropy: a density functional approach. *New Journal Physics*. 2009, vol. 11, p. 51–57.
6. Barmak K., Kim J., Lewis L.H., Coffey K.R. et al. On the relationship of magnetocrystalline anisotropy and stoichiometry in epitaxial $L1_0$ CoPt (001) and FePt (001) thin films. *Journal of Applied Physics*. 2005, p. 98.
7. Bandiera S., Sousa R. S., Rodmacg B., Diény B. Enhancement of perpendicular magnetic anisotropy through reduction of Co-Pt interdiffusion in (Co/Pt) multilayers. *Journal of Applied Physics*. 2012, vol. 100, p. 42–47.
8. Sun A.-Ch., Yuan Fu-Te., Hsu J.-H., Lee H. Y. Evolution of structure and magnetic properties of sputter-deposited CoPt thin films on MgO(111) substrates. *Scripta Materials*. 2009, p. 61–73.
9. Yuan Fu-Te., Hsu J.-H., Lin Y.-H., Hsiao S. N., Lee H. Y. Structural studies of high-Ku metastable CoPt thin films with long-range order. *Journal of Applied Physics*. 2012, p. 111–116.
10. Lin C.-J., Gorman G. L. Evaporated CoPt Alloy films with strong perpendicular magnetic anisotropy. *Journal of Applied Physics*. 1992, p. 61.
11. Yuan F.-T., Sun A. C., Mei J.-K., Liao W. M. et al. Low temperature growth of FePt and CoPt films on MgO(111) substrate. *Journal of Applied Physics*. 2011, p. 109.
12. Farrow R. F. C., Harp G., Weller D., Marks R. F., Toney M. F., Gebollada A. MBE-Growth of Chemically-Ordered Co-Pt and Fe-Pt Alloy Phases. *The epitaxial growth process*. 1994, p. 106.
13. Zhigalov V. S., Myagkov V. G., Semyachkov V. A. Magnetic and Structural Properties of Granular Films Al_2O_3 -FePd₃ Synthesized by Aluminothermy. *Solid State Phenomenon*. 2014, p. 215–218.
14. Myagkov V. G., Lee L. A., Bykova L. E., Turpanov I. A. [Self-propagating high temperature synthesis in epitaxial Pt / Co / MgO (001) thin films]. *Fizika tverdogo tela*. 2000, vol. 42, p. 937 (In Russ.).
15. Sukhu R. *Magnitnye tonkie plenki* [Magnetic thin film]. Moscow, Mir, 1967, 175 p.

© Жигалов В. С., Мягков В. Г., Рыбакова А. Н., Турпанов И. А., Бондаренко Г. Н., 2015