

# Магнитное последствие в трехслойных пленках на основе Co—P

© Г.С. Патрин<sup>\*,\*\*</sup>, А.В. Чжан<sup>\*,\*\*</sup>, С.Я. Кипарисов<sup>\*</sup>, В.А. Середкин<sup>\*</sup>, М.Г. Пальчик<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН,  
Красноярск, Россия

<sup>\*\*</sup> Сибирский федеральный университет,  
Красноярск, Россия

E-mail: avchz@mail.ru

(Поступила в Редакцию 13 августа 2009 г.)

Приведены результаты экспериментальных исследований магнитных свойств трехслойной системы, состоящей из высококоэрцитивного поликристаллического, низкокоэрцитивного аморфного магнитных слоев Co—P и немагнитной прослойки аморфного Ni—P. Установлено, что коэрцитивная сила и поле смещения петли гистерезиса низкокоэрцитивного слоя претерпевают аномальные изменения в области малых толщин магнитомягкого слоя. В этой же области толщин обнаружено наличие магнитного последствия, которое является необычным для подобного вида магнитных структур. Наблюдаемые особенности связываются в основном с кинетикой формирования кристаллической структуры высококоэрцитивного слоя.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-02-00397-А.

## 1. Введение

Интерес к мультислойным магнитным структурам, которые содержат магнитные слои и промежуточный немагнитный слой, вызван их практическим применением в устройствах спинтроники. Управляющими слоями в таких устройствах являются магнитные слои, которые создаются из магнитных материалов с разной коэрцитивной силой. Физические свойства подобных структур во многом зависят от состояния высококоэрцитивного слоя. К настоящему времени магнитные свойства многослойных пленок в области нанотолщин и, в частности, влияние на них высококоэрцитивного слоя являются недостаточно изученными. Такая задача представляется актуальной с фундаментальной и практической точек зрения, ее решение позволит прогнозировать и создавать магнитные многослойные системы с заданными свойствами.

В настоящей работе сообщается об исследовании необычного магнитного последствия, которое наблюдается в трехслойных магнитных пленках при малой толщине высококоэрцитивного слоя.

## 2. Исследуемые образцы и экспериментальные методы

Исследуемые образцы представляли собой трехслойные пленки, которые были получены методом химического осаждения. Первый магнитный изотропный высококоэрцитивный слой выполнен из соединения Co—P в поликристаллическом состоянии [1], осажденного из раствора на стеклянную подложку.

Верхний низкокоэрцитивный слой состоял из аморфного соединения Co—P. Он осаждался в постоянном магнитном поле, что приводило к появлению оси легкого намагничивания, параллельной полю [2].

Промежуточный слой представлял собой аморфный немагнитный сплав Ni и P, что достигалось соответствующим содержанием фосфора [3].

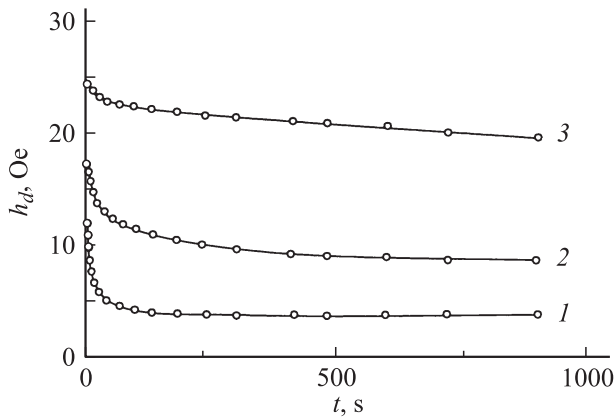
Исследовались образцы двух типов. В образцах первого типа фиксировались толщины низкокоэрцитивного  $d_2$  и немагнитного  $d_3$  слоев, а толщина высококоэрцитивного слоя  $d_1$  варьировалась в пределах 1–25 nm. В образцах второго типа фиксировались толщины высококоэрцитивного и промежуточного слоев, и в пределах 0.5–120 nm менялась толщина низкокоэрцитивного слоя. Получение образцов без промежуточного слоя с резкой границей перехода между слоями в настоящей технологии затруднительно. Это обусловлено тем, что на начальной стадии осаждения из-за эпитаксиального характера роста пленок первые слои будут копировать структуру подслоя.

Химический состав пленок и их толщина контролировались с помощью фотокалориметрического и рентгено-спектрального анализов.

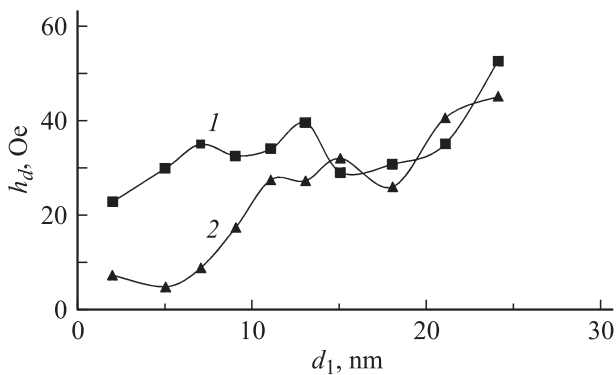
Измерение петель гистерезиса осуществлялось с помощью меридионального и полярного эффектов Керра с частотой изменения магнитного поля 0.01 Hz, а также индукционным методом с частотой 50 Hz. Динамические изменения петель гистерезиса регистрировались с экрана осциллографа WEB-камерой и записывались в видео-файл. Структурные исследования поверхности пленок проводились с помощью атомного силового микроскопа.

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Предварительно пленки насыщались в постоянном поле величиной, превышающей коэрцитивную силу высококоэрцитивного слоя, направленном вдоль легкой оси намагничивания низкокоэрцитивного слоя. После такого намагничивания петли гистерезиса низкокоэрцитивного слоя смещались на величину  $h_d$  относительно нулевого



**Рис. 1.** Зависимость поля смещения низкокоэрцитивного слоя от времени перемагничивания при толщине высококоэрцитивного слоя 4 (1), 10 (2) и 15 nm (3).



**Рис. 2.** Зависимость поля смещения от толщины высококоэрцитивного слоя при магнитооптическом (1) и индукционном (2) способах измерения.

значения внешнего магнитного поля в направлении, противоположном направлению намагниченности высококоэрцитивного слоя (в положительном направлении). При перемагничивании пленки величина  $h_d$  уменьшалась во времени, и по истечении некоторого времени петли гистерезиса приобрели вид, свойственный однослойной пленке. Такие изменения  $h_d$  зависят от амплитуды перемагничивающего поля  $h$  — с увеличением  $h$  скорость изменения  $h_d$  увеличивается. Если амплитуду магнитного поля подбирать таким образом, чтобы она немного превышала коэрцитивную силу низкокоэрцитивного слоя, то можно установить, что изменение  $h_d$  во времени зависит от толщины высококоэрцитивного слоя. Время изменения  $h_d$  с повышением толщины магнито жесткого слоя увеличивается, как показано на рис. 1.

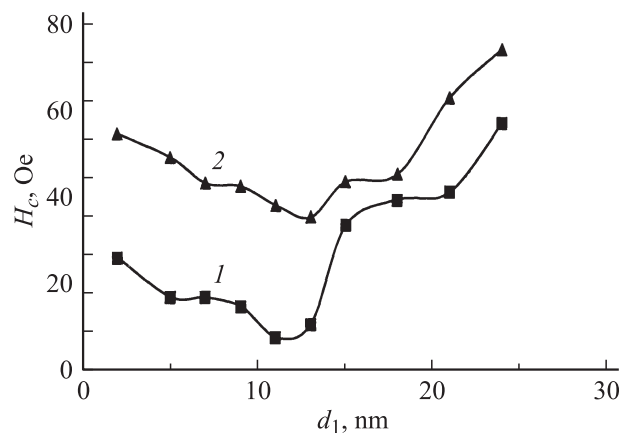
На рис. 2 приведен график зависимости поля смещения от толщины магнито жесткого слоя на частотах перемагничивания 0.01 Hz (измерено с помощью меридионального эффекта Керра) и 50 Hz (измерено индукционным способом). Наибольшие различия в значениях  $h_d$ , определяемых этими методами, наблюдаются при толщинах магнито жесткого слоя менее 10 nm.

В области больших толщин не наблюдается различий в значениях  $h_d$ , измеряемых двумя указанными методами.

Как установлено ранее [4], изменение толщины высококоэрцитивного слоя оказывает существенное влияние на величину коэрцитивной силы  $H_c$  низкокоэрцитивного слоя. С повышением толщины до  $\sim 10$  nm  $H_c$  уменьшается, достигает минимальных значений и увеличивается при дальнейшем увеличении  $d_1$ . Такие изменения коэрцитивной силы особенно отчетливо проявляются при повышении частоты изменения магнитного поля, что приводит к наибольшим различиям в значениях коэрцитивной силы, измеренных с помощью магнитооптического и индукционного способов, при толщине магнито жесткого слоя менее 10 nm (рис. 3).

Согласно Неелю [5], магнитное последствие при квазистатическом перемагничивании может обуславливаться двумя физическими механизмами: диффузией частиц и термическими флуктуациями спинов. При внешней схожести эти явления имеют принципиальные различия. При диффузионном последствии происходит стабилизация мгновенных направлений магнитного момента диффузией частиц, и при уменьшении скорости изменения магнитного поля коэрцитивная сила должна увеличиться. При флуктуационном механизме с понижением скорости изменения магнитного поля коэрцитивная сила уменьшается, так как флуктуации спинов вызывают дополнительное внутреннее магнитное поле.

Наблюдаемые изменения коэрцитивной силы при изменении частоты перемагничивающего поля указывают на то, что в исследуемых структурах магнитное последствие обусловлено флуктуационными процессами. Дополнительным свидетельством этого могут служить характерные особенности петли гистерезиса, которые проявляются при амплитудах магнитного поля, немного превышающих коэрцитивную силу магнитомягкого слоя. Если предварительно насытить магнито жесткий слой пленки в некотором направлении, совпадающем с осью



**Рис. 3.** Зависимость коэрцитивной силы низкокоэрцитивного слоя от толщины высококоэрцитивного при магнитооптическом (1) и индукционном (2) способах измерения.

легкого намагничивания низкокоэрцитивного слоя, и условно принять, что намагниченность высококоэрцитивного слоя будет направлена влево, то при последующем перемагничивании правая спинка (восходящая ветвь) петли будет испытывать динамические изменения. Форма спинки и ее положение испытывают случайные колебания около положений квазиустойчивого равновесия. В результате таких колебаний исходное магнитное состояние пленки оказывается неустойчивым, и при дальнейшем перемагничивании петля гистерезиса смещается от первоначального положения. Ранее такой эффект наблюдался в однослойных пленках и был связан термическими флуктуациями внутреннего магнитного поля, которое возникает в результате температурных колебаний спиновых моментов около среднего направления. Такие флуктуации вызывают дополнительные магнитные поля, которые позволяют доменным границам преодолевать потенциальные барьеры, препятствующие их движению.

Особенность наблюдаемого магнитного последствия состоит в том, что этот эффект проявляется при перемагничивании магнитомягкого слоя, в то время как его причиной являются флуктуационные процессы, которые имеют место в высококоэрцитивном слое.

В простейшем случае энергию взаимодействия между магнитными слоями в трехслойной структуре на единицу площади можно выразить в виде [6]

$$\begin{aligned} E &= -m_1 h_1 d_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ &= -m_2 h_2 d_2 \cos(\theta_1 - \theta_2), \end{aligned}$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — намагниченности,  $d_1$  и  $d_2$  — толщины соответственно магнито жесткого и магнитомягкого слоев;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  — углы между внешним магнитным полем и намагниченностями соответственно высококоэрцитивного и низкокоэрцитивного слоев,  $h_1$  равно эффективному полю, действующему на магнито жесткий слой со стороны магнитомягкого,  $h_2$  — на магнитомягкий со стороны магнито жесткого.

Как установлено в [7], при малой толщине поликристаллические пленки соединения Co–P, полученные химическим осаждением, представляют собой неоднородную среду, которая состоит из отдельных участков или зародышей кристаллитов. При наложении магнитного поля величиной, большей коэрцитивной силы магнито жесткого слоя, магнитные моменты всех таких участков ориентируются по направлению этого поля. Так как с уменьшением толщины слоя размеры зародышей и магнитное взаимодействие между ними уменьшаются, однородное намагниченное состояние является неустойчивым и может быть нарушено необратимым поворотом намагниченности отдельных кристаллитов под действием тепловых флуктуаций. В трехслойной системе такие процессы в магнито жестком слое будут стимулироваться эффективным магнитным полем  $h_1$ . Величина этого поля, согласно (1), зависит от состояния низкокоэрцитивного слоя, которое может привести к уменьшению

энергии активации тепловых флуктуаций [8]. Такой механизм объясняет тот факт, что в однослойной поликристаллической пленке Co–P тепловые флуктуации не приводят к ее спонтанному размагничиванию.

## Список литературы

- [1] В.В. Вершинин, С.Я. Кипарисов, Г.С. Патрин, С.М. Жарков, К.П. Полякова. ФММ **103**, 493 (2007).
- [2] С.Я. Кипарисов. А. с. СССР № 1157132. Б.И. № 19 от 23.05 (1985).
- [3] В.В. Бондарь. В сб.: Электрохимия. Сер. Итоги науки. М. (1968). 146 с.
- [4] А.В. Чжан, С.Я. Кипарисов, В.А. Середкин, Г.С. Патрин, М.Г. Пальчик. Изв. РАН. Сер. физ. **73**, 1223 (2009).
- [5] L.J. Neel. Phys. Rad. **12**, 339 (1951).
- [6] А. Йелон. В сб.: Физика тонких пленок / Под ред. М.Х. Франкомба, Р.У. Гофмана. Мир, М. (1973). Т. 6. 392 с.
- [7] А.В. Чжан, Г.С. Патрин, С.Я. Кипарисов, В.А. Середкин, М.Г. Пальчик, Д.А. Марущенко. Сб. тр. XXI Междунар. школы-семинара „Новые магнитные материалы микроэлектроники“. М. (2009). С. 633.
- [8] С. Тикадзуми. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и их применения. Мир, М. (1987). 420 с.