

05

Особенности процесса перемагничивания обменно-связанной ферро-ферромагнитной пленочной структуры NiFe/CoP

© Г.И. Фролов, С.Я. Кипарисов, В.А. Середкин, К.П. Полякова,
Г.С. Патрин, В.С. Жигалов, А.Д. Балаев

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск
Сибирский федеральный университет, Красноярск
Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. М.В. Решетнева, Красноярск
E-mail: pkr@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 25 октября 2013 г.

Исследовано влияние толщины слоев на магнитные свойства и механизм перемагничивания обменно-связанной пленочной структуры NiFe/CoP. Процесс перемагничивания образцов изучался через анализ индукционных и магнитооптических петель гистерезиса. Установлено, что при увеличении толщины слоев наблюдается переход от однородного перемагничивания пленочной структуры к процессу формирования спиновой пружины в магнитомягком слое.

Обменно-связанные магнитопленочные структуры, содержащие магнитомягкие и магнитожесткие слои, имеют большой научный и прикладной интерес [1–4]. В последнее время наряду с исследованием свойств ферро-антиферромагнитных и ферро-ферромагнитных структур привлекают внимание ферро-ферромагнитные обменно-связанные пленочные структуры. Это связано с тем фактом, что в них обнаружены иные процессы перемагничивания [5,6].

Модель перемагничивания такой структуры предложена еще в 1965 г. [7]. В предположении, что магнитожесткий слой имеет большую анизотропию, а магнитомягкий слой изотропен, в исходном состоянии намагниченности слоев параллельны. Это состояние в структуре сохраняется в перемагничивающих полях, меньших величины обменного

поля H_{ex} , определяемого выражением [1]

$$H_{ex} = \pi^2 A / 2M_s t_s^n, \quad (1)$$

где A — параметр обмена, M_s — намагниченность насыщения и t_s — толщина магнитного слоя, а $n = 2$.

При $H > H_{ex}$ в магнитомягком слое возникает спиновая спираль, в которой угол закручивания спинов увеличивается с увеличением расстояния от интерфейса. Многоступенчатый механизм перемагничивания включает в себя процессы образования и распространения доменной стенки по толщине магнитомягкого слоя, при этом перемагничивание этого слоя реверсивно в полях $H < H_{ch}$ (H_{ch} — коэрцитивность магнито жесткого слоя).

Экспериментальные исследования подтвердили справедливость этой модели, но был также обнаружен ряд отличий. Во-первых, для структур с толщиной магнитомягкого слоя $t_s > 50$ nm величина $n < 2$, а во-вторых, в структурах с толщиной $t_s < \pi\delta_h$ ($\pi\delta_h$ — ширина доменной стенки магнито жесткого слоя) оба слоя перемагничиваются одновременно в полях $H < H_{ch}$. При этом величина поля перемагничивания структуры является функцией толщины слоев, т.е. эффекты межслоевого обменного взаимодействия в этих структурах приводят к изменению свойств обоих слоев.

Таким образом, расчеты, использующие модель формирования спиновой пружины, лишь качественно объясняют особенности перемагничивания ферро-ферромагнитных пленочных структур. Поэтому для адекватного описания свойств таких материалов требуются дальнейшие исследования, включающие в себя расширение как используемых методов контроля свойств, так и круга изучаемых материалов.

С точки зрения расширения методов анализа таких структур представляет интерес изучение механизмов перемагничивания отдельно каждого слоя, например, с использованием магнитооптических эффектов, а также детальное исследование эффектов сдвига частной петли гистерезиса при перемагничивании только магнитомягкого слоя.

Нами проведены исследования механизмов перемагничивания двухслойной ферро-ферромагнитной структуры, содержащей магнито жесткий слой (CoP) и магнитомягкий слой (NiFe) различной толщины. Слои CoP получались методом химического осаждения, а пермаллоевые слои — вакуумным напылением. Пленки CoP с содержанием

$P \sim 2.5 \text{ wt.}\%$ при толщинах $< 50 \text{ nm}$ имеют мелкокристаллическую структуру с преимущественной ориентацией гексагональной c -оси кристаллитов перпендикулярно плоскости пленки [8]. Намагниченность насыщения $M_s \sim 1400 \text{ G}$. Образцы изотропны в плоскости и имеют коэрцитивность $H_C > 1000 \text{ Oe}$. Петли гистерезиса снимались с использованием индукционных и магнитооптических методик. При этом с помощью магнитооптического эффекта Керра петли снимались с каждого слоя структуры, что позволяет получить дополнительную информацию о механизмах их перемагничивания. Все измерения проводились при комнатной температуре. Диапазон вариации толщины слоев CoP составлял $2.5\text{--}40 \text{ nm}$, NiFe — $20\text{--}150 \text{ nm}$.

На рис. 1 показаны типичные магнитооптические и индукционные петли гистерезиса, измеренные при перемагничивании вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН) пленочных структур NiFe/CoP с различной толщиной слоев. В данном случае направление ОЛН пленки задается направлением намагниченности магнито жесткого слоя. На рис. 1, *a, b* приведены петли гистерезиса для пленки с толщиной слоев (NiFe — 20 nm , CoP — 20 nm). Магнитооптические петли с каждого слоя (рис. 1, *a*) и индукционная петля всей структуры идентичны. Это указывает, что магнитные моменты тонких слоев NiFe и CoP жестко связаны и перемагничиваются как единое целое. Коэрцитивная сила пленки $H_c \sim 830 \text{ Oe}$, в то время как коэрцитивность контрольной пленки CoP толщиной 20 nm $H_c \sim 1300 \text{ Oe}$.

В пленке с толщинами слоев NiFe — 50 nm и CoP — 25 nm в магнитомягком слое обнаружена однонаправленная анизотропия ($H_E \sim 90 \text{ Oe}$) при перемагничивании в поле $H = 300 \text{ Oe}$ (рис. 1, *c*), но уже в поле $H = 1500 \text{ Oe}$ петля становится симметричной (рис. 1, *d*). В этом же поле наблюдается и перемагничивание магнито жесткого слоя (рис. 1, *d, e*). Таким образом, в этой пленке перемагничивание слоев происходит в разных полях и в поле $H < H_{ch}$ петля гистерезиса магнитомягкого слоя сдвинута по оси полей. Данные рис. 1 показывают, что наблюдается изменение механизма перемагничивания пленок при увеличении толщины слоев — переход от однородного перемагничивания образца к перемагничиванию слоев в разных полях.

Для детализации особенностей этого перехода рассмотрим влияние толщины каждого из слоев на магнитные свойства структуры. На рис. 2 показано изменение магнитных свойств слоя NiFe толщиной 100 nm при вариации толщины магнито жесткого слоя в диапазоне $2.5\text{--}30 \text{ nm}$.

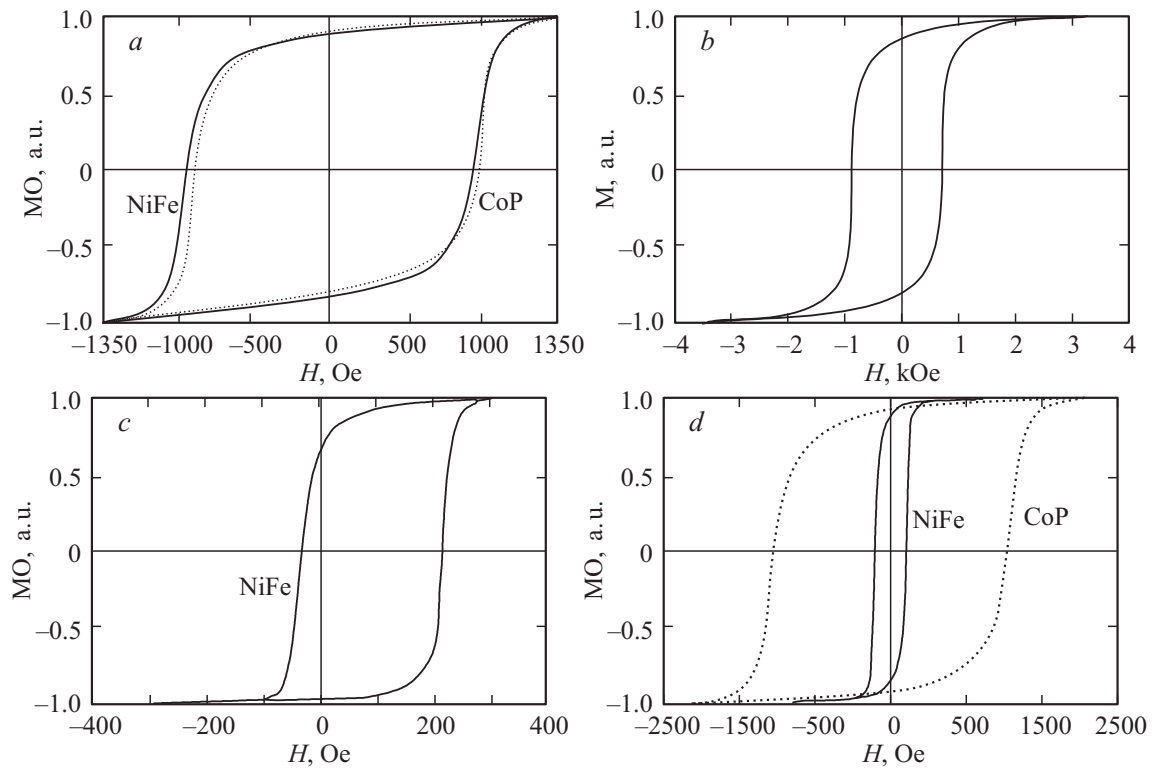


Рис. 1. Магнитооптические (МО) и индукционные (M) петли гистерезиса с пленочной структуры NiFe/CoP с толщинами слоев: *a, b* — NiFe — 20 nm, CoP — 20 nm; *c, d, e* — NiFe — 50 nm, CoP — 25 nm.

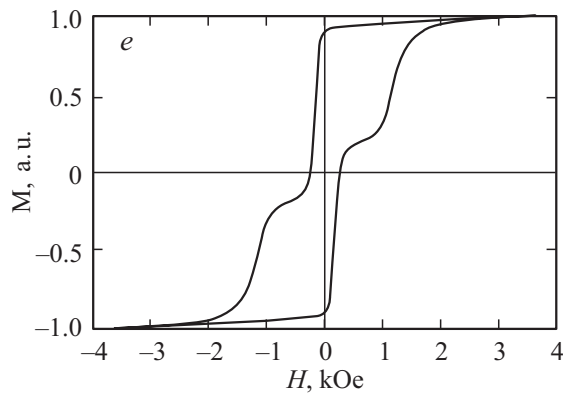


Рис. 1 (продолжение).

Когда толщина слоя CoP становится меньше 10 nm, наблюдается резкое уменьшение H_E и однонаправленная анизотропия исчезает при $t_{\text{CoP}} = 2.5$ nm. В то же время коэрцитивность пермаллового слоя увеличивается практически линейно в диапазоне $t_{\text{CoP}} = 2.5-10$ nm. Эти результаты аналогичны данным для обменно-связанных ферро-антиферромагнитных структур [2,9].

Данные об изменении H_E и H_C магнитомягкого слоя в пленках, где толщина слоя CoP постоянна (20 nm), а t_{NiFe} увеличивается от 20 до 150 nm, представлены в таблице. Эти результаты показывают, что в пленках с $t_{\text{NiFe}} < 50$ nm отсутствует однонаправленная анизотропия и наблюдается большая коэрцитивность. При $t_{\text{NiFe}} \geq 50$ nm появляется

Зависимость поля смещения H_E и коэрцитивной силы слоя NiFe от его толщины в структуре NiFe/CoP ($t_{\text{CoP}} = 20$ nm)

№ образца	t_{NiFe} , Å	H_E , Oe	H_C , Oe
1	200	—	830
2	400	—	400
3	600	110	90
4	1000	47	23
5	1500	23	13

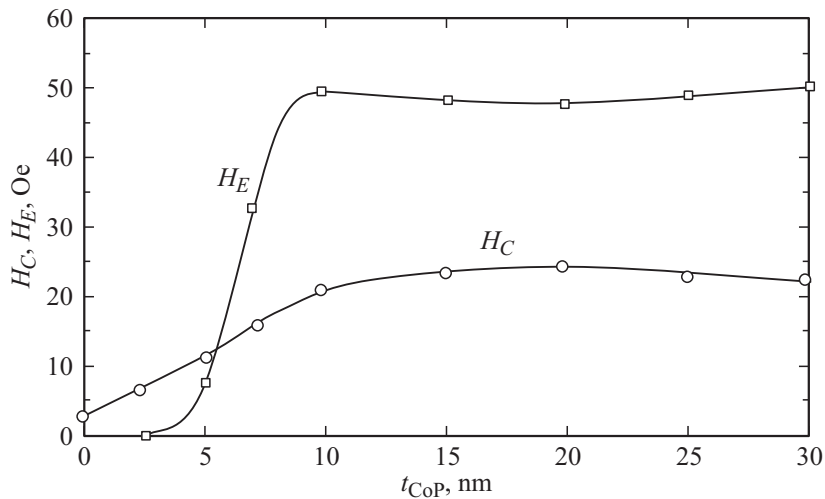


Рис. 2. Зависимость поля смещения (H_E) и коэрцитивной силы (H_C) от толщины слоя CoP в пленочной структуре NiFe/CoP ($t_{\text{NiFe}} = 100$ nm).

смещение петли гистерезиса, величина которого адекватна полю зарождения спиновой пружины, а толщинная зависимость этого смещения определяется уравнением [6]

$$H_E = H_{N0}/(t_{\text{NiFe}})^n, \quad (2)$$

где $1 < n < 2$, а $N_{N0} = \pi^2 A/2M_s$ для слоя NiFe.

Для расчета коэрцитивной силы ферро-ферромагнитной пленочной структуры, в которой оба слоя перемангничиваются одновременно, в работе [6] предложено использовать уравнение

$$H_C = H_{\text{Co}} t_{eh}/(t_{eh} + \alpha t_{es}), \quad (3)$$

где H_{Co} — коэрцитивная сила свободного магнито жесткого слоя толщиной t_h и $\alpha = M_s/M_h$ (M_s и M_h — намагниченность магнитомягкого и магнито жесткого слоев), t_{eh} и t_{es} — эффективная толщина слоев. При этом величины t_{eh} и t_{es} равны реальной толщине слоев t_h и t_s , когда выполняется условие t_h и $t_s < l_{ex}$ (l_{ex} — длина обменного взаимодействия слоев). В нашем случае это условие выполняется только

для пленки № 1 (см. таблицу), ее измеренное значение H_C совпадает с расчетным. Для пленки № 2 расчетная величина $H_C \approx 600$ Ое и превышает экспериментальные данные.

Таким образом, проведенные исследования по влиянию толщины слоев обменно-связанной пленочной структуры на ее магнитные свойства и механизм перемагничивания качественно совпадают с результатами, полученными на пленках SmFe/NiFe, SmCo/Fe [1,6], т.е. наблюдается переход при увеличении толщины слоев от процесса однородного перемагничивания образца к процессу перемагничивания слоев в разных полях.

Однако для детального описания механизмов перемагничивания подобных пленочных структур требуются дополнительные исследования по изучению промежуточной области толщин слоев $\pi\delta_h < t_s < 2\pi\delta_h$, где $\pi\delta_h$ — ширина доменной стенки магнито жесткого слоя, что позволит более точно определить величину параметра n в уравнении (2), а также условие использования уравнения (3).

Список литературы

- [1] Fullerton E.E., Jiang J.S., Grimsditch M. et al. // Phys. Rev. B. 1998. V. 58. P. 12193.
- [2] Xi H., White R.M. // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. P. 80.
- [3] Кабанов Ю.П., Горнаков В.С. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. С. 8.
- [4] Фролов Г.И., Середкин В.А., Яковчук В.Ю. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. С. 17.
- [5] Leineweber T., Kronmüller H. // J. Magn. Magn. Mater. 1997. V. 176. P. 145.
- [6] Yan S., Barnard J.A., Xu F. et al. // Phys. Rev. B. 2001. V. 64. P. 184403.
- [7] Goto E., Hayashi N., Miyashita T., Nakagawa K. // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. P. 2951.
- [8] Вершинин В.В., Кипарисов С.Я., Патрин Г.С. и др. // ФММ. 2007. Т. 103. С. 493.
- [9] Mauri D., Siegman H.C., Vagues P.S., Kay E. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. P. 3047.