

ĐIỀU BIẾN TRƯỜNG TRAO ĐỔI DỊCH VÀ LỰC KHÁNG TỪ THEO PHƯƠNG VUÔNG GÓC TRONG MÀNG ĐA LỚP [Co/Pd]/IrMn

Nguyễn Thị Huệ¹, Nguyễn Thị Thanh Thủy¹, Cao Thị Thanh Hải¹, Đinh Hùng Mạnh¹, Đỗ Hùng Mạnh², Vũ Đình Lâm^{2,3}, Nguyễn Văn Đăng⁴, Nguyễn Thị Ngọc Anh^{2,3*}

¹Trường Đại học Sư phạm Hà Nội, ²Viện Khoa học vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,

³Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,

⁴Trường Đại học Khoa học - ĐH Thái Nguyên

TÓM TẮT

Hiệu ứng trao đổi dịch (EB) đã được khảo sát trong các vật liệu từ có lớp tiếp xúc sắt từ/phản sắt từ (FM/AFM) hơn nửa thập kỷ qua. Hầu hết các nghiên cứu đều được thực hiện trên các vật liệu từ truyền thống có dị hướng từ nằm trong mặt phẳng mẫu (dị hướng từ song song). Trong nghiên cứu này các hệ vật liệu có lớp tiếp xúc FM/AFM dựa trên màng đa lớp [Co/Pd]/IrMn có dị hướng từ vuông góc được chế tạo bằng phương pháp phun xạ magnetron. Đặc trưng cấu trúc và tính chất từ của các màng đa lớp đã chế tạo được khảo sát lần lượt với phép đo nhiễu xạ tia X (XRD) và phép đo từ kế mẫu rung (VSM). Sự phụ thuộc của trường trao đổi dịch (H_{EB}) và lực kháng từ (H_C) theo phương vuông góc trong màng đa lớp [Co/Pd]/IrMn vào số lớp, vào chiều dày của lớp Co và lớp Pd được tiến hành khảo sát một cách hệ thống. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng các màng đã chế tạo có dị hướng từ vuông góc tốt, có hiệu ứng trao đổi dịch theo phương vuông góc cao ở nhiệt độ phòng. Thú vị hơn nữa, giá trị H_{EB} và H_C của màng đa lớp [Co/Pd]/IrMn có thể điều biến được một cách dễ dàng thông qua sự thay đổi về *i*) số lớp N ; *ii*) chiều dày của lớp Co (t_{Co}); và *iii*) chiều dày của lớp Pd (t_{Pd}) trong màng đa lớp [Co/Pd].

Từ khóa: Màng mỏng từ đa lớp; dị hướng từ vuông góc; hiệu ứng trao đổi dịch; tương tác trao đổi sắt từ; trao đổi sắt từ/phản sắt từ

Ngày nhận bài: 11/4/2019; Ngày hoàn thiện: 04/5/2019; Ngày duyệt đăng: 07/5/2019

TUNABLE PERPENDICULAR EXCHANGE BIAS AND COERCIVITY IN [Co/Pd]/IrMn MULTILAYERS

Nguyen Thi Hue¹, Nguyen Thi Thanh Thuy¹, Cao Thi Thanh Hai¹, Dinh Hung Manh¹, Do Hung Manh², Vu Dinh Lam^{2,3}, Nguyen Van Dang⁴, Nguyen Thi Ngọc Anh^{2,3*}

¹Hanoi National University of Education, ²Institute of Materials Science - VAST,

³Graduate University of Science and Technology - VAST, ⁴University of Sciences - TNU

ABSTRACT

The effect of exchange bias (EB) has been investigated in ferromagnet/antiferromagnet (FM/AFM) bilayers for more than fifty years. Up to now, most studies have focused on conventional in-plane magnetic anisotropy materials. In this study, the FM/AFM systems with perpendicular magnetic anisotropy were fabricated using a magnetron sputtering system. Structural and magnetic properties of the fabricated multilayers (MLs) were carried out by using X-Ray Diffraction (XRD) and Vibrating Sample Magnetometer (VSM) systems, respectively. The dependence of the exchange bias field and coercivity of [Co/Pd]/IrMn MLs on the multilayer repetition number, thickness of Co layer and Pd layer have been investigated systematically. The experimental results showed that the developed MLs have a strong perpendicular magnetic anisotropy and a large perpendicular exchange bias at room temperature. Interestingly, the perpendicular exchange bias field (H_{EB}) and coercivity (H_C) of [Co/Pd]/IrMn MLs can be easily tuned by tuning *i*) multilayer repetition number N , *ii*) Co thickness (t_{Co}); and *iii*) Pd thickness (t_{Pd}).

Keywords: Magnetic multilayers; perpendicular magnetic anisotropy; exchange bias effect; ferromagnetic exchange interaction; ferromagnetic/antiferromagnetic exchange interaction

Received: 11/4/2019; Revised: 04/5/2019; Approved: 07/5/2019

* Corresponding author: Tel: 0847 907676 ; Email: ngocanhnt.vn@gmail.com

1. Giới thiệu

Tương tác trao đổi trong các màng có lớp tiếp giáp sắt từ/phân sắt từ (FM/AFM) được biết tới từ những giữa những năm 50 của thế kỷ trước [1,2] và thường biểu hiện thông qua hiện tượng dịch đường cong từ hóa dọc theo trục của từ trường (còn gọi là hiệu ứng trao đổi dịch, H_{EB}) và/hoặc tăng cường lực kháng từ H_C (còn gọi là hiệu ứng ghim từ) khi: *i*) mẫu được làm lạnh (trong từ trường) từ nhiệt độ khóa T_B (Blocking temperature) của vật liệu AFM hoặc *ii*) các màng mỏng được mọc/hình thành trong một từ trường đẳng hướng; hoặc *iii*) mẫu được ủ trong từ trường [1-4]. Trong một vài thập kỷ qua các hệ vật liệu FM/AFM có hiệu ứng trao đổi dịch được nghiên cứu rộng rãi do khả năng ứng dụng của chúng trong các linh kiện lưu trữ thông tin, các cảm biến từ [5-8]. Hiệu ứng trao đổi dịch trước đây thường quan sát được trong các hệ vật liệu FM/AFM có dị hướng từ nằm trong mặt phẳng mẫu (dị hướng từ song song) như hệ IrMn/NiFe, IrMn/CoFe [5-8]. Gần đây, hiệu ứng này quan sát cũng quan sát được trên một số hệ vật liệu FM/AFM có dị hướng từ vuông góc với mặt phẳng màng [9-12]. Việc quan sát được hiệu ứng này trên các hệ vật liệu có dị hướng từ vuông góc mở ra khả năng ứng dụng to lớn cho các linh kiện từ thế hệ mới bởi khả năng giảm kích thước linh kiện cũng như độ ổn định nhiệt cao [9-12].

Trong các vật liệu sắt từ (FM) có dị hướng từ vuông góc (các hợp kim chứa nhóm kim loại chuyển tiếp như CoPt, CoPd, FePt, TbFeCo... hay các màng mỏng đa lớp [Co/Ni], [Co/Pd], [Co/Pt]...), các màng đa lớp [Co/Pd] và [Co/Pt] được coi là các ứng cử viên tiềm năng cho các ứng dụng thực tế do dễ chế tạo (chế tạo ở nhiệt độ phòng), có tính dị hướng vuông góc tốt, từ độ bão hòa cao, lực kháng từ cao và dễ dàng điều khiển được dị hướng từ thông qua điều khiển các thông số cấu trúc của các lớp vật liệu [13,14]. Trong các vật liệu phân sắt từ (AFM) (CoO, NiO, FeMn, FeRh, IrMn...), vật liệu được dùng phổ biến nhất

trong các thiết bị từ tính thương mại là IrMn do nhiệt độ chuyển pha T_C cao và thường có trường trao đổi dịch lớn ở nhiệt độ phòng [15-17]. Vì thế, trong nghiên cứu này, chúng tôi lựa chọn hệ vật liệu gồm màng đa lớp FM [Co/Pd] có dị hướng từ vuông góc gắn với lớp AFM IrMn làm đối tượng nghiên cứu. Trong một số báo cáo [18,19], dị hướng vuông góc trong các màng mỏng đa lớp [Co/M] được nghiên cứu một cách tương đối hệ thống và được chỉ ra rằng tính dị hướng trong các màng đa lớp có mối liên hệ mật thiết với các thông số cấu trúc của màng như chiều dày lớp Co, chiều dày lớp kim loại Pd, hay số lớp kép Co/Pd. Nói cách khác, hoàn toàn có thể điều khiển được tính dị hướng (hằng số dị hướng hiệu dụng K_{eff} , lực kháng từ H_C) trong các màng đa lớp loại này thông qua sự thay đổi các thông số cấu trúc của các lớp trong các màng đa lớp. Tuy nhiên, tính cho tới nay, chưa có một nghiên cứu có tính hệ thống nào về vai trò của các thông số cấu trúc này đối với trường trao đổi dịch trong hệ [Co/Pd]/IrMn được báo cáo. Trong nghiên cứu này, chúng tôi khảo sát sự thay đổi của lực kháng từ cũng như hiệu ứng trao đổi dịch theo phương vuông góc trong màng đa lớp [Co/Pd]/IrMn với các thông số cấu trúc t_{Co} , t_{Pd} , hoặc số lớp N khác nhau.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1 Chế tạo màng mỏng đa lớp

Ba hệ mẫu được nghiên cứu, chế tạo và khảo sát có cấu trúc và độ dày danh định như sau:

Hệ mẫu 1:

Si/SiO₂/Ta_{5 nm}/Pd_{3 nm}/[Co_{0.5 nm}/Pd_{1 nm}]_N/Co_{0.5 nm}/IrMn_{6 nm}/Pd_{3 nm}/Ta_{5 nm} ($N=1, 2, 3, \dots, 10$) (ký hiệu [Co/Pd]_N/IrMn)

Hệ mẫu 2:

Si/SiO₂/Ta_{5 nm}/Pd_{3 nm}/[Co(t_{Co})/Pd_{1 nm}]₅/Co_{0.5 nm}/IrMn_{6 nm}/Pd_{3 nm}/Ta_{5 nm} ($t_{Co}=0.3-1.0$ nm) (ký hiệu [Co(t_{Co})/Pd]/IrMn)

Hệ mẫu 3:

Si/SiO₂/Ta_{5 nm}/Pd_{3 nm}/[Co_{0.5 nm}/Pd(t_{Pd})]₅/Co_{0.5 nm}/IrMn_{6 nm}/Pd_{3 nm}/Ta_{5 nm} ($t_{Pd}=0.6-2.0$ nm) (ký hiệu [Co/Pd(t_{Pd})]/IrMn)

Một mẫu màng mỏng đa lớp không có lớp phân sắt từ IrMn: Si/SiO₂/Ta_{5 nm}/Pd_{3 nm}/[Co_{0.5 nm}/Pd_{1 nm}]₅/Co_{0.5 nm}/Pd_{3 nm}/Ta_{5 nm} (ký hiệu [Co/Pd]) được chế tạo và sử dụng như mẫu đối chứng. Các mẫu được phún xạ trên đế Si có phủ một lớp SiO₂ dày 1000 nm bằng hệ phún xạ DC magnetron với chân không cơ sở cao ($\sim 3 \times 10^{-8}$ Torr) và áp suất khí Ar khi phún xạ là 5 mTorr. Lớp kép Ta/Pd được dùng làm lớp đệm để tăng cường hướng mọc (111) trong khi lớp kép Pd/Ta được dùng làm lớp phủ chống ô xi hóa cho màng đa lớp [20,21]. Tốc độ lắng đọng chậm được áp dụng cho cả Co (0,18 Å/s) và Pd (0,46 Å/s) tương ứng với công suất phún xạ lần lượt là 37,5 W và 87,5 W cho tất cả các mẫu để đảm bảo sự lắng đọng là đồng đều, lớp tiếp xúc giữa các lớp là sắc nét và mức độ xen kẽ của Co-Pd là thấp [22].

2.2 Các phương pháp khảo sát

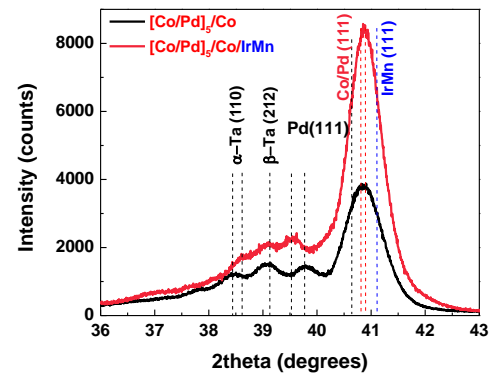
Sau khi lắng đọng, các mẫu được từ hóa trong từ trường song song và vuông góc với mặt phẳng mẫu bằng hệ từ kế mẫu rung (VSM) với từ trường lớn nhất đạt 14 kOe. Cấu trúc tinh thể của các mẫu được kiểm tra bằng phương pháp nhiễu xạ bột trên hệ nhiễu xạ tia X của X'pert Pro với điện áp 45 kV và dòng điện 40 mA sử dụng bức xạ Cu-K α ($\lambda=0,12518$ nm). Tất cả các phép đo được tiến hành ở nhiệt độ phòng.

3. Kết quả và bàn luận

3.1 Đặc trưng hình thái cấu trúc

Phổ nhiễu xạ tia X của hai mẫu màng đa lớp có và không có lớp AFM được so sánh để làm rõ vai trò của lớp AFM trong việc hình thành trường trao đổi dịch tự phát. Màng [Co/Pd] và [Co/Pd]/IrMn sau khi phún xạ được khảo sát qua phép đo nhiễu xạ tia X. Hình 1 biểu diễn phổ nhiễu xạ tia X của của hai mẫu màng đa lớp [Co/Pd] và [Co/Pd]/IrMn. Phổ nhiễu xạ tia X trên cả 2 mẫu đều chỉ ra sự tồn tại của lớp α -Ta có cấu trúc (110) với đỉnh nhiễu xạ đặc trưng ở góc $2\theta = 38,5^\circ$ và β -Ta có cấu trúc (212) với đỉnh nhiễu xạ đặc trưng xuất hiện ở góc $2\theta = 39^\circ$ [23] trong khi lớp Pd có cấu trúc (111) mọc trên lớp Ta với đỉnh nhiễu xạ trong khoảng $39,5^\circ$ - $40,6^\circ$. Gần với đỉnh nhiễu xạ Pd (111), một đỉnh có cường độ

nhiều xạ mạnh ở khoảng $40,8^\circ$ được quan sát với màng [Co/Pd], tương ứng với Co/Pd (111). Do Co (111) tinh khiết có đỉnh ở khoảng $44,4^\circ$, Pd (111) tinh khiết có đỉnh nhiễu xạ ở khoảng $40,8^\circ$, nên màng đa lớp Co/Pd có đỉnh nhiễu xạ (111) nằm giữa hai đỉnh này, vị trí đỉnh Co/Pd (111) tùy thuộc vào chiều dày của các lớp cũng như số lớp trong màng đa lớp. Điều này phù hợp với các kết quả nghiên cứu đã được công bố trước đó cho hệ Co/Pd [24,25]. Hướng (111) của CoPd cũng là hướng thể hiện tính dị hướng từ vuông góc mạnh hơn các hướng khác, hướng ưu tiên này thường được thể hiện đặc biệt mạnh khi màng đa lớp [Co/Pd] mọc trên lớp đệm Ta/Pd [26].



Hình 1. Phổ nhiễu xạ tia X của màng đa lớp [Co/Pd] (đường màu đen) và của màng kép [Co/Pd]/IrMn (đường màu đỏ)

So với phổ nhiễu xạ của mẫu màng [Co/Pd], ở mẫu [Co/Pd]/IrMn, khi có thêm lớp IrMn được lắng đọng lên trên màng đa lớp [Co/Pd], xuất hiện đỉnh nhiễu xạ rất mạnh (gấp hơn 2 lần so với trong màng [Co/Pd]) quan sát được ở góc 2θ khoảng $40,9^\circ$. Có một sự dịch đỉnh phổ Co/Pd(111) nhẹ về phía bên phải khoảng $0,1^\circ$ và đặc biệt là sự tăng cường cường độ nhiễu xạ ở vị trí góc $2\theta=40,9^\circ$ là do sự có mặt của đỉnh nhiễu xạ IrMn (111) (phổ tia X đặc trưng cho IrMn (111) tinh khiết có đỉnh nhiễu xạ ở khoảng $2\theta=41,2^\circ$) dẫn đến sự chồng phủ của hai đỉnh nhiễu xạ, Co/Pd(111) và IrMn (111). IrMn với hướng ưu tiên (111) cũng đã được chứng minh là thích hợp nhất cho sự phát triển ổn định cấu trúc phân sắt từ và vì vậy thể hiện hiệu ứng trao đổi dịch lớn đáng chú ý [27-30].

3.2 Tính chất từ

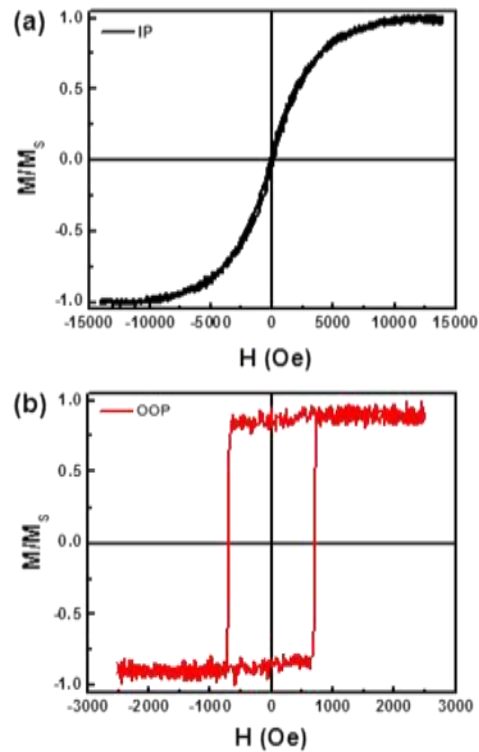
Hình 2a và 2b biểu diễn đường cong từ hóa của mẫu [Co/Pd] (mẫu đối chứng) theo hai phương song song (IP, đường màu đen) và vuông góc (OOP, đường màu đỏ) với mặt phẳng mẫu và với từ trường đặt vào lên tới 14 kOe. Kết quả đo đạc bằng VSM chỉ ra rằng với mẫu màng đa lớp [Co/Pd] đã chế tạo, phương từ hóa song song với mặt phẳng là phương khó, và từ trường cần thiết để từ hóa mẫu theo phương song song lên tới 12 kOe, trong khi phương từ hóa vuông góc với mặt phẳng mẫu là phương dễ. Đường cong từ hóa theo phương vuông góc cho thấy quá trình đảo từ xảy ra đột ngột (độ vuông của đường từ hóa gần như bằng 1) nói cách khác giá trị của trường đảo từ bằng với giá trị của lực kháng từ, $H_a = H_c = 690$ Oe. Kết quả này phù hợp với một số nghiên cứu trước đây rằng với các màng đa lớp Co/Pd có dị hướng từ vuông góc cao quá trình đảo từ theo phương vuông góc sẽ diễn ra rất đột ngột [31]. Nói cách khác, các đo đạc, tính toán dựa trên kết quả đo VSM hoàn toàn phù hợp với phổ nhiễu xạ tia X, chứng tỏ rằng, màng mỏng đa lớp [Co/Pd] đã chế tạo có hướng ưu tiên (111), có tính dị hướng vuông góc cao.

Từ các đường cong từ hóa theo hai phương song song và vuông góc, chúng ta có thể thu được hai thông số từ quan trọng gồm có từ độ bão hòa M_S và dị hướng từ hiệu dụng K_{eff} . Bằng cách vẽ chồng các đường từ trễ đo theo hai hướng (song song và vuông góc với mặt phẳng mẫu) (Hình 2), từ trường bão hòa, H_S , được xác định là điểm giao nhau giữa hai đường. Trường dị hướng, H_k , và dị hướng từ hiệu dụng K_{eff} được tính theo công thức:

$$H_k = H_S + 4\pi M_S \quad (1)$$

$$K_{eff} = H_k \times M_S / 2 \quad (2)$$

trong đó M_S là từ độ bão hòa của mẫu trên một đơn vị thể tích, được tính bằng từ độ của mẫu đo được từ thực nghiệm chia cho thể tích của mẫu [32-34]. Trong mẫu [Co/Pd] đã chế tạo, giá trị của $M_S = 385 \times 10^{-6}$ emu/cm³ và $K_{eff} = 6.5 \times 10^6$ erg/cm³, giá trị này hoàn toàn phù hợp với nghiên cứu trước đó của nhóm [35].



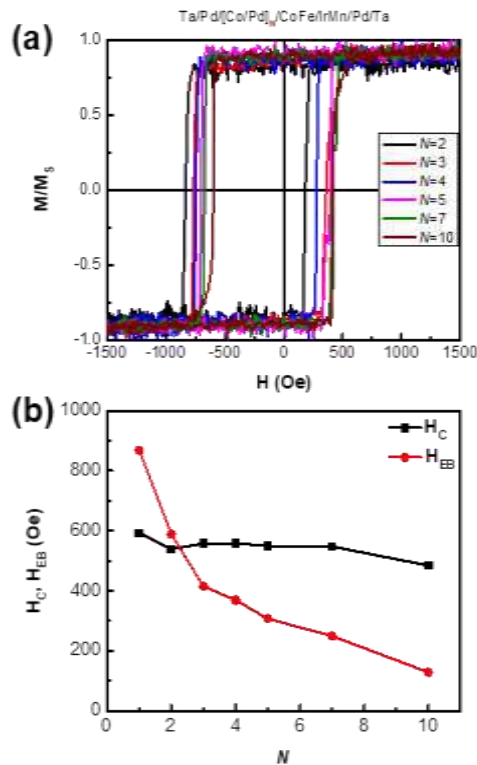
Hình 2. Đường cong từ hóa trong mẫu đối chứng [Co/Pd] theo hai phương: (a) song song (IP) với bề mặt mẫu (đường màu đen) và (b) vuông góc (OOP) với bề mặt mẫu (đường màu đỏ)

Để đánh giá vai trò của các thông số cấu trúc trong màng đa lớp [Co/Pd]/IrMn ảnh hưởng tới trường trao đổi dịch, lực kháng từ, các mẫu với thông số cấu trúc (chiều dày lớp Co, chiều dày lớp Pd, số lớp N) khác nhau đã được chế tạo và khảo sát.

Hình 3(a) là kết quả đo đường cong từ hóa theo phương vuông góc của các mẫu trong hệ mẫu 1 [Co/Pd] _{N} /IrMn, với số lớp N trong màng đa lớp [Co/Pd] thay đổi từ 1 đến 10. Đường cong từ hóa theo phương vuông góc cho thấy trường trao đổi dịch H_{EB} cao (~ 600 Oe) và đạt được ở tất cả các mẫu ở nhiệt độ phòng. H_{EB} và H_C đều giảm khi số lớp N tăng, tuy nhiên H_C giảm nhanh, từ 900 Oe đến 180 Oe trong khi H_{EB} giảm không đáng kể (từ 870 Oe đến 150 Oe) khi N tăng từ 1 đến 10.

Ở các mẫu có N từ 1 tới 5, H_C xấp xỉ bằng trường đảo từ H_a và vì vậy H_C được coi là một thông số quan trọng để có thể xác định được giá trị trường đảo từ trong các màng đa lớp này một cách gián tiếp. Tuy nhiên khi $N \geq 7$,

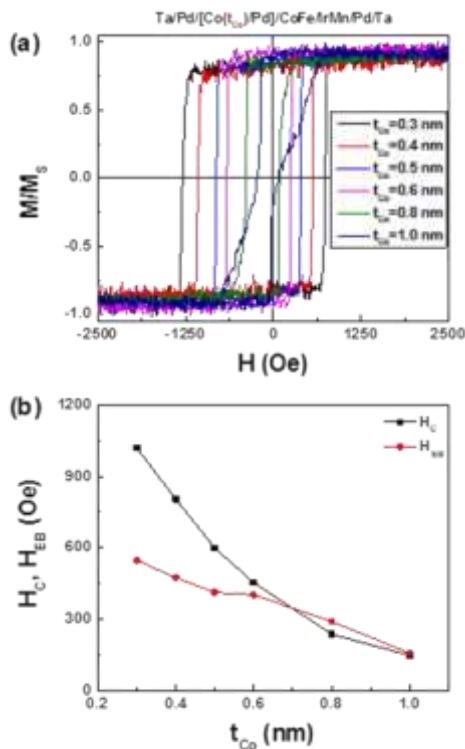
có thể thấy một cách rõ ràng rằng độ vuông của đường cong từ hóa giảm, từ trường bão hòa H_S tăng, hình thành vùng đuôi nhọn ở cuối các đường cong từ hóa, cho thấy sự hình thành cấu trúc domain từ có dạng vòng/sọc gấp khúc (labyrinth/stripe domain) có moment từ vuông góc với mặt phẳng màng, và cơ chế đảo từ trong các màng có $N \geq 7$ trở lên phức tạp, quá trình đảo từ khi đó gồm cả quá trình dịch chuyển và quay vách domain [35]. Cấu trúc domain loại này đã được biết đến và nghiên cứu rộng rãi trước đây ở các hệ vật liệu tương tự [35-37]. Nói cách khác, H_C giảm chậm theo số lớp N trong khi H_{EB} giảm rất nhanh từ 900 Oe xuống còn 150 Oe khi N tăng từ 1 đến 10, nguyên nhân là do khi N tăng, chiều dày tổng cộng của màng Co/Pd tăng dẫn đến chiều dài tương tác trao đổi giữa các lớp sắt từ Co/Pd và phản sắt từ IrMn tăng, khiến cho tương tác trao đổi FM/AFM giữa chúng giảm, vì vậy H_{EB} giảm.



Hình 3. (a) Đường cong từ hóa theo phương vuông góc của các mẫu trong hệ mẫu 1 và (b) Sự phụ thuộc của lực kháng từ H_C (ô vuông đen), và trường trao đổi dịch H_{EB} (hình tròn đỏ) vào số lớp N của màng đa lớp [Co/Pd]

Hình 4(a) là các đường từ hóa theo phương vuông góc của các màng đa lớp [Co(t_{Co})/Pd]/IrMn trong hệ mẫu 2. Chiều dày của lớp Co thay đổi từ 0.3 nm tới 1.0 nm. Lớp Pd có chiều dày cố định là 1 nm và số lớp N trong các mẫu là 5. Khi chiều dày lớp Co trong khoảng $t_{Co} = 0.3-0.5$ nm, các đường từ hóa có dạng vuông và quá trình đảo từ xảy ra đột ngột khi từ trường ngoài $H_{ex}=H_C$. H_C giảm gần như tuyến tính khi t_{Co} tăng từ 0.3-0.5 nm. Màng đa lớp Co/Pd thể hiện tính dị hướng vuông góc khi lớp Co đủ mỏng (vài lớp nguyên tử) bởi khi đó dị hướng từ bề mặt là lớn hơn dị hướng từ hình dạng, cũng như dị hướng từ tinh thể [38]. Nói cách khác khi chiều dày lớp Co tăng, dị hướng từ bề mặt có thể coi là không đổi trong khi dị hướng từ tinh thể tăng, dẫn đến sự suy giảm tính dị hướng theo phương vuông góc. Với các màng đa lớp có $t_{Co} \geq 0.6$ nm, có một sự suy giảm rõ rệt về độ vuông trong các đường từ hóa, điều này cho thấy dị hướng từ thể tích (theo phương song song với mặt phẳng mẫu) của các lớp Co dần trở nên trội hơn so với dị hướng từ bề mặt (dị hướng từ theo phương vuông góc với mặt phẳng mẫu) của các lớp tiếp giáp Co/Pd. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với một số kết quả nghiên cứu đã được công bố trên hệ vật liệu này. Sự thay đổi hình dạng của đường cong từ hóa trong các mẫu có $t_{Co} \geq 0.6$ nm tương ứng với sự hình thành cấu trúc *stripe domain* có moment từ vuông góc với mặt phẳng màng, chỉ ra cơ chế đảo từ trong các màng có $t_{Co} \geq 0.6$ nm là phức tạp, bao gồm cả quá trình dịch chuyển và quay vách domain [35-37]. Giá trị H_{EB} trong các mẫu này cũng giảm nhẹ theo chiều dày của lớp Co, thể hiện sự giảm tương tác trao đổi FM/AFM giữa màng đa lớp Co/Pd và lớp IrMn khi chiều dày màng tăng.

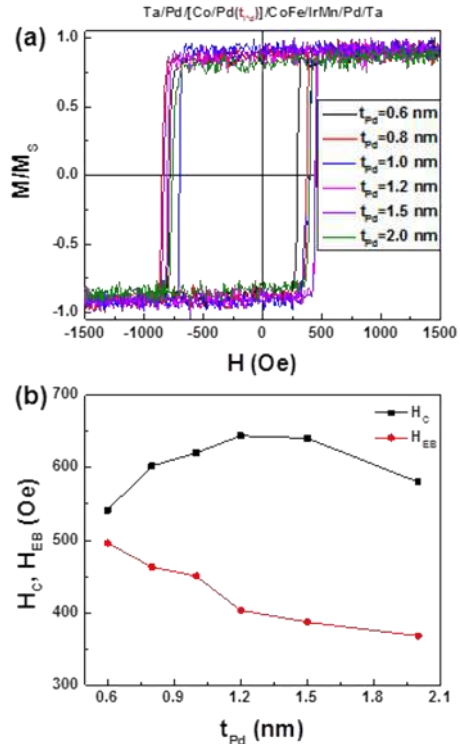
Hệ mẫu 3 với lớp Co có chiều dày cố định 0.5 nm trong khi lớp Pd có chiều dày thay đổi từ 0.6 nm đến 2.0 nm. Các phép đo chỉ ra rằng lớp Pd dày 1.2 nm có H_C cao nhất và H_{EB} giảm khi chiều dày lớp Pd tăng, như trong Hình 5.



Hình 4. (a) Đường cong từ hóa theo phương vuông góc của các mẫu trong hệ mẫu 2 và (b) Sự phụ thuộc của lực kháng từ H_C (ô vuông đen), và trường trao đổi dịch H_{EB} (hình tròn đỏ) vào chiều dày của lớp Co trong màng đa lớp [Co/Pd]

Hình 5 là kết quả đo đường cong từ hóa theo phương vuông góc của các mẫu trong hệ mẫu 3, với chiều dày của lớp Pd trong màng đa lớp [Co/Pd] thay đổi từ 0.6 đến 2 nm. Kết quả đo trên hình 5 chỉ ra rằng đường cong từ hóa của các mẫu theo phương vuông góc có dạng vuông, tương ứng với dị hướng từ vuông góc cao. Các mẫu với lớp Pd mỏng $t_{Pd} \leq 1.2$ nm, H_C tăng theo chiều dày của lớp Pd, điều này cũng phù hợp với các báo cáo trước đây, rằng với lớp Pd mỏng hơn lớp Co, dị hướng từ vuông góc là yếu, dị hướng từ vuông góc trong các màng đa lớp dạng này đạt giá trị lớn nhất khi chiều dày lớp kim loại lớn gấp 2 đến 3 lần chiều dày lớp từ tính [39], tương ứng với chiều dày lớp Pd là trong khoảng từ 1.2-1.5 nm trong nghiên cứu này. Khi lớp Pd tiếp tục tăng, tương tác trao đổi sắt từ giữa các lớp Co trở nên yếu đi, dẫn đến H_C giảm. Trong hệ mẫu này, H_{EB} giảm khi chiều dày lớp Pd tăng,

điều này là do tương tác trao đổi FM/AFM từ trong mẫu giảm khi chiều dày tổng cộng của mẫu tăng.



Hình 5. (a) Đường cong từ hóa theo phương vuông góc của các mẫu trong hệ mẫu 3 và (b) Sự phụ thuộc của lực kháng từ H_C (ô vuông đen), và trường trao đổi dịch H_{EB} (hình tròn đỏ) vào chiều dày của lớp Pd trong màng đa lớp [Co/Pd]

4. Kết luận

Các mẫu đã chế tạo có dị hướng từ vuông góc cao $K_{eff}=6.5 \times 10^6$ erg/cm³, có H_{EB} lớn ở nhiệt độ phòng (H_{EB} lớn nhất đạt được là 1040 Oe). Độ lớn của trường trao đổi dịch H_{EB} và lực kháng từ H_C trong màng đa lớp [Co/Pd] gắn với lớp phân sắt từ IrMn, hoàn toàn có thể điều chỉnh được thông qua sự điều khiển các thông số cấu trúc trong màng đa lớp [Co/Pd]/IrMn như: i) số lớp N ; ii) chiều dày của lớp Co (t_{Co}); và iii) chiều dày của lớp Pd (t_{Pd}) trong màng đa lớp [Co/Pd]. Tính linh hoạt, dễ điều khiển dị hướng từ, trường trao đổi dịch trong các cấu trúc loại này mở ra khả năng ứng dụng to lớn cho các linh kiện Spintronics thế hệ mới.

5. Lời cảm ơn

Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn sự trợ giúp kinh phí của Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia NAFOSTED thông qua đề tài nghiên cứu cơ bản mã số 103.99-2015.83 và của Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam thông qua đề tài HTQT với Nhật Bản mã số VAST.HTQT.NHATBAN.01/17-19.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. W.H. Meiklejohn and C.P. Bean, “New Magnetic Anisotropy”, *Phys. Rev.* T. 102, S. 5, pp. 1413, 1956.
- [2]. W.H. Meiklejohn and C.P. Bean, “New Magnetic Anisotropy”, *Phys. Rev.* T. 105, S. 3, pp. 904, 1957.
- [3]. J. Nogués, & I.K. Schuller, “Exchange bias”, *J. Magn. Magn. Mater.* T. 192, tr. 203–232, 1999.
- [4]. A.E. Berkowitz, & K. Takano, “Exchange anisotropy — a review”, *J. Magn. Magn. Mater.* T. 200, S. 1-3, pp. 552–570, 1999.
- [5]. S.S.P. Parkin, K.P. Roche, M.G. Samant, P.M. Rice, R.B. Beyers, R.E. Scheuerlein, E.J. O’Sullivan, S.L. Brown, J. Bucchigano, D.W. Abraham, Y. Lu, M. Rooks, P.L. Trouilloud, R.A. Wanner, and W.J. Gallagher, “Exchange-biased magnetic tunnel junctions and application to nonvolatile magnetic random access memory (invited)”, *J. Appl. Phys.* T. 85, S. 8, pp. 5828–5833, 1999.
- [6]. P.P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso, and F. Cardoso, “Magnetoresistive sensors”, *J. Phys.: Condens. Matter.* T.19, S. 16, pp.165221, 2007.
- [7]. B. Tudu, A. Tiwari, “Recent Developments in Perpendicular Magnetic Anisotropy Thin Films for Data Storage Applications”, *Vacuum*, No.146, pp. 329–341, 2017.
- [8]. R. Sbiaa, H. Meng, S.N. Piramanayagam, “Materials with perpendicular magnetic anisotropy for magnetic random access memory”, *Phys. Status Solidi RRL—Rapid Res. Lett.* T. 5, S. 12, pp. 413–419, 2011.
- [9]. S. Maat, K. Takano, S.S.P. Parkin, and E.E. Fullerton, “Perpendicular Exchange Bias of Co/Pt Multilayers”, *Phys. Rev. Lett.* T. 87, S. 8, pp. 087202, 2001.
- [10]. O. Hellwig, S. Maat, J.B. Kortright, and E.E. Fullerton, “Magnetic reversal of perpendicularly-biased Co/Pt multilayers”, *Phys. Rev. B* T. 65, S.14, pp. 144418, 2002.
- [11]. Y. Liu and S. Adenwalla, “Closely linear temperature dependence of exchange bias and coercivity in out-of-plane exchange-biased [Pt/Co]₃/NiO (11 Å) multilayer”, *J. Appl. Phys.* T. 94, S. 2, pp. 1105, 2003.
- [12]. J. Sort, B. Dieny, M. Fraune, C. Koenig, F. Lunnebach, B. Beschoten, G. Güntherodt, “Perpendicular exchange bias in antiferromagnetic-ferromagnetic nanostructures”, *Appl. Phys. Lett.* T. 84, S. 18, pp.3696-3698, 2004.
- [13]. T. Onoue, J. Kawaji, K. Kuramochi, T. Asahi, and T. Osaka, “Effect of underlayer on magnetic properties of Co/Pd multilayer perpendicular magnetic recording media”, *J. Magn. Magn. Mater.* T. 235, S.1-3, pp. 82-86, 2001.
- [14]. J.-B. Lee, G.-G. An, S.-M. Yang, H.-S. Park, W.-S. Chung & J.-P. Hong, “Thermally robust perpendicular Co/Pd-based synthetic antiferromagnetic coupling enabled by a W capping or buffer layer”, *Sci. Rep.* T. 6, pp. 21324, 2016.
- [15]. Sort, V. Baltz, F. Garcia, B. Rodmacq, and B. Dieny, “Tailoring perpendicular exchange bias in [Pt/Co]-IrMn multilayers”, *Phys. Rev. B* T. 71, S. 5, pp. 054411, 2005.
- [16]. F. Garcia, J. Sort, B. Rodmacq, S. Auffret, and B. Dieny, “Large anomalous enhancement of perpendicular exchange bias by introduction of a nonmagnetic spacer between the ferromagnetic and antiferromagnetic layers”, *Appl. Phys. Lett.* T. 83, S. 17, pp. 3537, 2003.
- [17]. S. van Dijken, J. Moritz, and J.M.D. Coey, “Correlation between perpendicular exchange bias and magnetic anisotropy in IrMn/[CoPt]_n and [PtCo]_n/IrMn multilayers”, *J. Appl. Phys.* T. 97, S. 6, pp. 063907, 2005.
- [18]. P. F. Carcia, “Perpendicular magnetic anisotropy in Pd/Co and Pt/Co thin-film layered structures”, *J. Appl. Phys.* T. 63, S. 10, pp. 5066, 1988.
- [19]. C. W. Barton and T. Thomson, “Magnetisation reversal in anisotropy graded Co/Pd multilayers”, *J. Appl. Phys.* T. 118, S. 6, pp. 063901, 2015.
- [20]. R. Law, R. Sbiaa, T. Liew, T.C. Chong, “Effects of Ta seed layer and annealing on magnetoresistance in CoFePd -based pseudo-spin-valves with perpendicular anisotropy”, *Appl. Phys. Lett.* T. 91, S. 24, pp. 242504, 2007.
- [21]. T.Tahmasebi, S.N. Piramanayagam, R. Sbiaa, R. Law, T.C. Chong, “Effect of different seed layers on magnetic and transport properties of perpendicular anisotropic spin valves”, *IEEE Trans. Magn.* T. 46, S. 6, pp. 1933, 2010.
- [22]. H. Nemoto, H. Nakagawa, Y. Hosoe, “Dependence of Co/Pd Superlattice Properties on Pd Layer Thickness”, *IEEE Trans. Magn.* T. 39, S. 5, pp. 2714-2716, 2003.

- [23]. H. J. Zhang, S. Yamamoto, Y. Fukaya, M. Maekawa, H. Li, A. Kawasuso, T. Seki, E. Saitoh & K. Takanashi, "Current-induced spin polarization on metal surfaces probed by spin-polarized positron beam", *Sci. Rep.* T. 4, pp. 4844, 2014.
- [24]. M. Albert, M. Franchin, T. Fischbacher, G. Meier, H. Fangohr, "Domain wall motion in perpendicular anisotropy nanowires with edge roughness", *J. Phys.: Condens. Matter.* T. 24, S. 2, pp. 024219, 2012.
- [25]. M. Y. Im, L. Bocklage, P. Fischer, G. Meier, "Direct observation of stochastic domain-wall depinning in magnetic nanowires", *Phys. Rev. Lett.* T. 102, S. 14, pp. 147204, 2009
- [26]. M. T. Johnson, P. J. H. Bloemen, F. J. A. den Broeder, and J.J. de Vries, "Magnetic anisotropy in metallic multilayers", *Rep. Prog. Phys.* T. 59, S. 11, pp. 1409, 1996.
- [27]. G. Anderson, Y. Huai, and L. Miloslawsky, "CoFe/IrMn Exchange Biased Top, Bottom, and Dual Spin Valves", *J. Appl. Phys.* T. 87, pp. 6989-6991, 2000.
- [28]. M. Fecioru-Morariu, G. Guntherodt, M. Ruhrig, A. Lamperti, and B. Tanner, "Exchange coupling between an amorphous ferromagnet and a crystalline antiferromagnet", *J. Appl. Phys.* T. 102, S. 5, pp. 053911, 2007.
- [29]. Y. T. Chen, S. U. Jen, Y. D. Yao, J. M. Wu, J.H. Liao, and T.B. Wu, "Exchange biasing observed in the Co/Ir₂₀Mn₈₀ system", *J. Alloys Compd.* T. 448, pp. 59, 2008.
- [30]. I. L. Castro, V. P. Nascimento, E. C. Passamani, A.Y. Takeuchi, C. Larica, M. Tafur, and F. Pelegrini, "The role of the (111) texture on the exchange bias and interlayer coupling effects observed in sputtered NiFe/IrMn/Co trilayers", *J. Appl. Phys.* T. 113, S. 20, pp. 203903, 2013.
- [31]. C.W. Barton, T.J.A. Slater, R.M. Rowan-Robinson, S.J. Haigh, D. Atkinson, and T. Thomson, *J. Appl. Phys.*, 116, pp. 203903, 2014.
- [32]. M. Endo, S. Kanai, S. Ikeda, F. Matsukura, and H. Ohno, "Electric-field effects on thickness dependent magnetic anisotropy of sputtered MgO/Co₄₀Fe₄₀B₂₀/Ta structures", *Appl. Phys. Lett.* T. 96, S. 21, pp. 212503, 2010.
- [33]. D.-T. Ngo, Z.L. Meng, T. Tahmasebi, X. Yu, E. Thoeng, L.H. Yeo, A. Rusydi, G.C. Han, K.-L. Teo, "Interfacial tuning of perpendicular magnetic anisotropy and spin magnetic moment in CoFe/Pd multilayers", *J. Magn. Magn. Mater.* T. 350, pp. 42-46, 2014.
- [34]. W. S. Chung, S. M. Yang, T. W. Kim, J. P. Hong, "Ultrathin Co-O oxide layer-driven perpendicular magnetic anisotropy in a CoO/[Co/Pd]_m multilayer matrix upon annealing", *Sci. Rep.* T. 6, pp. 37503, 2016.
- [35]. T. N. Anh Nguyen, Y. Fang, V. Fallahi, N. Benatmane, S. M. Mohseni, R. K. Dumas, and Johan Åkerman, "[Co/Pd]-NiFe exchange springs with tunable magnetization tilt angle", *Appl. Phys. Lett.* T. 98, S. 17, pp. 172502, 2011.
- [36]. O. Hellwig, T. Hauet, T. Thomson, E. Dobisz, J. D. Risner, Jamtgaard, D. Yaney, B.D. Terris, and E.E. Fullerton, "Coercivity tuning in Co/Pd multilayer based bit patterned media", *Appl. Phys. Lett.* T. 95, S. 23, pp. 232505, 2009.
- [37]. L. Tryputen, F. Guo, F. Liu, T. N. A. Nguyen, M. S. Mohseni, S. Chung, Y. Fang, J. Åkerman, R. D. McMichael, and C. A. Ross, "Magnetic structure and anisotropy of [Co/Pd]₅/NiFe multilayers", *Phys. Rev. B*, T. 91, pp. 014407, 2015.
- [38]. P. S. Carcia, A. D. Meinhaldt and A. Suna, "Perpendicular magnetic anisotropy in Pd/Co thin film layered structures", *Appl. Phys. Lett.*, T. 47, S. 2, pp. 178, 1985.
- [39]. M. Robinson, Y. Au, J. W. Knepper, F. Y. Yang, R. Sooryakumar, "Magnetic imaging of layer-by-layer reversal in CoPt multilayers with perpendicular anisotropy", *Phys. Rev. B* T. 73, S. 22, pp. 224422, 2006.