

TĂNG CƯỜNG TRƯỜNG TRAO ĐỔI DỊCH THEO PHƯƠNG VUÔNG GÓC TRONG HỆ VẬT LIỆU [Co/Pd]/IrMn VỚI LỚP XEN GIỮA CoFe SIÊU MỎNG

Nguyễn Thị Thanh Thủy¹, Cao Thị Thanh Hải¹, Nguyễn Thị Huệ¹, Đinh Hùng Mạnh¹,
Vũ Hồng Kỳ², Đỗ Khánh Tùng², Nguyễn Thanh Hương², 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

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của lớp xen giữa CoFe mỏng tới hiệu ứng trao đổi hiệu dịch theo phương vuông góc trong hệ vật liệu [Co/Pd]/IrMn. Các màng mỏng đa lớp được chế tạo bằng phương pháp phún xạ magnetron. Các đặc trưng cấu trúc và tính chất từ của các màng đa lớp được khảo sát bằng hệ đo nhiễu xạ tia X và hệ đo từ kế mẫu rung. Kết quả nghiên cứu cho thấy giá trị trường trao đổi dịch H_{EB} theo phương vuông góc ở nhiệt độ phòng trong màng mỏng đa lớp [Co/Pd]/IrMn là tương đối cao ($H_{EB} \sim 98$ Oe). Tuy nhiên giá trị H_{EB} được tăng cường đáng kể khi có thêm một lớp CoFe mỏng ($t_{CoFe} = 0,3 - 1,2$ nm) xen giữa lớp sắt từ [Co/Pd] và lớp phân sắt từ IrMn. Giá trị H_{EB} đạt được cao nhất là 205 Oe với $t_{CoFe} = 0,8$ nm, gấp hơn 2 lần so với hệ không có lớp CoFe xen giữa.

Từ khóa: Vật liệu từ; màng mỏng từ đa lớp; dị hướng từ vuông góc; hiệu ứng trao đổi dịch; trao đổi sắt từ/phân sắt từ.

Ngày nhận bài: 11/5/2020; Ngày hoàn thiện: 30/5/2020; Ngày đăng: 31/5/2020

ENHANCEMENT OF PERPENDICULAR EXCHANGE BIAS IN [Co/Pd]/IrMn SYSTEM BY ULTRATHIN CoFe INSERTION LAYER

Nguyen Thi Thanh Thuy¹, Cao Thi Thanh Hai¹, Nguyen Thi Hue¹, Dinh Hung Manh¹,
Vu Hong Ky², Do Khanh Tung², Nguyen Thanh Huong², Nguyen Thi Ngoc Anh^{2,3*}

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

³Graduate University of Science and Technology - VAST

ABSTRACT

In this study, we investigated the effect of an ultrathin CoFe insertion layer on perpendicular exchange bias in the [Co/Pd]/IrMn systems. These multilayers were deposited by magnetron sputtering. The structural and magnetic properties of the deposited multilayers were examined by X-ray diffractometer and Vibration sample magnetometer. The experimental results showed that the value of the perpendicular exchange bias field (H_{EB}) of [Co/Pd]/IrMn multilayers at room temperature is relatively high ($H_{EB} \sim 98$ Oe). However, H_{EB} is significantly enhanced when an ultrathin layer of CoFe ($t_{CoFe} = 0.3 - 1.2$ nm) is inserted between the [Co/Pd] ferromagnetic multilayers and the IrMn antiferromagnetic layer. The highest value of H_{EB} is 205 Oe with $t_{CoFe} = 0.8$ nm which is more than twice higher than that of the system without CoFe insertion layer.

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

Received: 11/5/2020; Revised: 30/5/2020; Published: 31/5/2020

* Corresponding author. Email: ngocanhnt.vn@gmail.com

1. Giới thiệu

Hiệu ứng trao đổi dịch (Exchange bias, EB) lần đầu tiên được phát hiện bởi Meiklejohn và Bean vào năm 1956 trong hệ Co sắt từ được bọc bởi oxit CoO ở nhiệt độ 77 K [1], [2]. Hiệu ứng trao đổi dịch là hiện tượng đường cong từ hóa bị dịch khỏi gốc tọa độ theo phương của từ trường ngoài, thường xảy ra do tương tác trao đổi giữa một lớp sắt từ (ferromagnet, FM) và một lớp phản sắt từ (antiferromagnet, AFM) tại bề mặt tiếp giáp của chúng, và có thể đi kèm với sự gia tăng lực kháng từ H_C [3], [4]. Hiệu ứng này đã được ứng dụng rộng rãi trong các linh kiện từ tính như đầu đọc (HDD), ổ cứng, bộ nhớ truy cập ngẫu nhiên (MRAM), cảm biến từ và các linh kiện spintronic dựa trên các van spin (Spin valves, SVs), các tiếp xúc từ xuyên ngầm (Magnetic tunnel junctions, MTJs) [5], [6]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu đều được tiến hành trên các vật liệu từ truyền thống có dị hướng từ song song với mặt phẳng màng, do đó hiệu ứng trao đổi dịch quan sát được xảy ra theo phương song song, gọi là hiệu ứng trao đổi dịch theo phương song song [4]-[8]. Gần đây, các vật liệu từ có dị hướng từ vuông góc với mặt phẳng màng thu hút được sự quan tâm to lớn do các vật liệu này có độ ổn định nhiệt cao, đáp ứng được khả năng giảm kích thước linh kiện xuống thang nano mét [9], [10]. Các vật liệu từ có dị hướng vuông góc mở ra khả năng ứng dụng trong các linh kiện từ thể hệ mới như: thiết bị lưu trữ thông tin mật độ siêu cao [11], các cảm biến từ siêu nhạy [12] và các thiết bị siêu cao tần hoạt động trong vùng tần số GHz và THz [13]-[15]. Trường trao đổi dịch H_{EB} theo phương vuông góc có thể quan sát được khi một vật liệu FM có dị hướng từ vuông góc tiếp xúc với một vật liệu AFM. Hiệu ứng trao đổi dịch theo phương vuông góc gần đây đang dành được nhiều sự quan tâm của các nhóm nghiên cứu trên thế giới [16].

Nhằm hướng đến các ứng dụng thực tế, các hướng nghiên cứu gần đây tập trung vào khả

năng điều biến, cũng như tăng cường H_{EB} theo phương vuông góc ở nhiệt độ phòng. Một số phương pháp giúp tăng cường H_{EB} có thể kể đến như: quá trình lắng đọng màng trong từ trường định hướng, ủ mẫu trong từ trường, thêm một lớp vật liệu kim loại mỏng giữa hai lớp FM và AFM [17]-[20] hay sử dụng các cấu trúc nano dạng dot và antidot arrays [21].

Các nghiên cứu trước đây của nhóm tiến hành trên các hệ vật liệu [Co/Pd] và [Co/Pd]/IrMn cho thấy các hệ vật liệu này có dị hướng từ vuông góc và H_{EB} theo phương vuông góc tương đối cao ở nhiệt độ phòng. Ngoài ra, dị hướng từ và H_{EB} có thể điều biến được một cách dễ dàng thông qua thay đổi các thông số cấu trúc của hệ vật liệu. Tuy nhiên, mức độ thay đổi H_{EB} đạt được thông qua việc thay đổi các thông số cấu trúc là nhỏ [22]. Gần đây, kết quả nghiên cứu của Liu và cộng sự tiến hành trên hệ [Co/Pt]/IrMn với lớp xen giữa CoFe cho thấy H_{EB} có thể được tăng cường đáng kể thông qua sự thay đổi thành phần và chiều dày của lớp CoFe [23]. Bên cạnh khả năng cải thiện đáng kể H_{EB} [23], [24], bản thân vật liệu CoFe còn được coi là vật liệu từ lý tưởng dùng cho các linh kiện từ và spintronics bởi một số ưu điểm nổi trội như dễ chế tạo, khó bị oxi hóa, mô-men từ bão hòa và độ phân cực spin cao [23]-[25]. Với mục đích tăng cường hơn nữa giá trị H_{EB} trong hệ vật liệu [Co/Pd]/IrMn nhằm hướng tới các ứng dụng spintronics, chúng tôi tiến hành khảo sát sự ảnh hưởng của lớp xen giữa CoFe mỏng (với chiều dày thay đổi từ 0,3 nm đến 1,2 nm) lên H_{EB} theo phương vuông góc.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Chế tạo màng mỏng

Trong nghiên cứu này các mẫu màng đa lớp [Co/Pd]₅, IrMn, [Co/Pd]₅/Co/IrMn và [Co/Pd]₅/CoFe/IrMn, ký hiệu lần lượt là [Co/Pd], IrMn, [Co/Pd]/Co/IrMn và [Co/Pd]/CoFe/IrMn, được lắng đọng trên đế Si có phủ lớp SiO₂ dày 1000 nm. Chiều dày của các lớp vật liệu và cấu trúc tối ưu được

lựa chọn dựa trên các khảo sát trước đó của nhóm [22], trong đó độ dày của lớp Co là 0,5 nm, Pd là 1 nm, IrMn là 6 nm, riêng lớp CoFe có chiều dày thay đổi từ 0,3 nm đến 1,2 nm. Lớp tạo mầm Ta (5 nm)/Pd (3 nm) và lớp phủ Pd (3 nm)/Ta (5 nm) được dùng cho tất cả các màng đa lớp [26], [27].

Các mẫu được chế tạo ở nhiệt độ phòng bằng hệ phun xạ DC magnetron (AJA International, Inc., USA) với chân không cao ($\sim 3 \times 10^{-8}$ Torr), áp suất khí Ar khi phun xạ là 5 mT cho lớp Co, Pd và 2,5 mT cho các lớp tạo mầm và lớp phủ. Tốc độ lắng đọng chậm cho Co (0,18 Å/s) và Pd (0,46 Å/s) tương ứng với công suất phun xạ lần lượt là 37,5 W và 87,5 W để đảm bảo sự lắng đọng là đồng đều, lớp tiếp xúc giữa các lớp vật liệu là sắc nét và mức độ xen kẽ của Co/Pd là thấp [28].

2.2. Phương pháp khảo sát

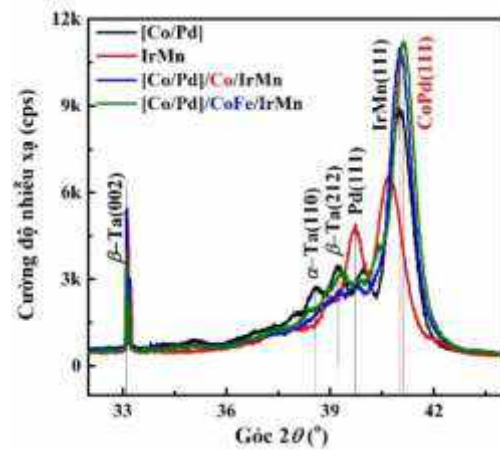
Sau khi lắng đọng, các mẫu được từ hóa trong từ trường vuông góc với mặt phẳng mẫu bằng hệ từ kế mẫu rung (Vibration sample magnetometer, VSM) với giá trị từ trường lớn nhất đạt được là 14 kOe, bước quét nhỏ 1 Oe/điểm, tốc độ quét chậm 5 điểm/giây. Cấu trúc tinh thể của các mẫu được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ bột trên hệ nhiễu xạ tia X (X-ray diffractometer, XRD) D8-ADVANCE của hãng Bruker (Đức) với điện áp 45 kV và dòng điện 40 mA sử dụng bức xạ Cu-K α ($\lambda=0,12518$ nm). Góc quét 2θ trong khoảng từ 25° đến 50° , tốc độ quét chậm với bước đo $0,005^\circ$ /giây. 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 các mẫu [Co/Pd], IrMn, [Co/Pd]/Co/IrMn và [Co/Pd]/CoFe/IrMn được chỉ ra trên hình 1. Phổ nhiễu xạ tia X trên cả bốn mẫu đều chỉ ra sự tồn tại của cả 2 pha α - và β -Ta, trong đó pha chính là pha β -Ta. Đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của β (002) và β (212) ở góc 2θ lần lượt là $33,1^\circ$, và $39,2^\circ$ và α -Ta (110) là ở góc $38,5^\circ$ [29]. Lớp Pd mọc

trên lớp Ta có cấu trúc (111) với đỉnh nhiễu xạ trong khoảng $39,5^\circ$ - $40,6^\circ$ giúp tăng sự định hướng theo hướng (111) cho màng [Co/Pd] [26], [27]. Với mẫu màng [Co/Pd], đỉnh nhiễu xạ chính là Co/Pd (111) quan sát được ở góc $2\theta=41^\circ$ [20]. Với mẫu màng IrMn, đỉnh nhiễu xạ chính của Pd (111) và IrMn (111) quan sát được ở góc $2\theta=39,7^\circ$ và $40,7^\circ$ [20], [30], [31].

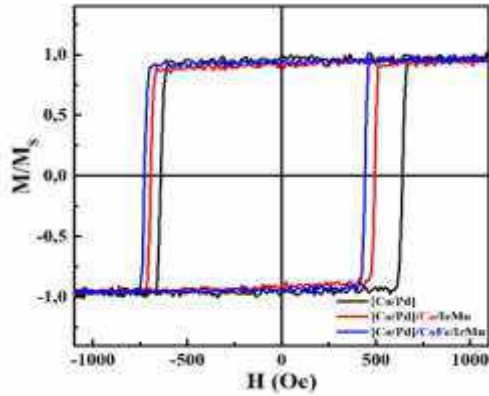


Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của các màng đa lớp [Co/Pd], IrMn, [Co/Pd]/Co/IrMn và [Co/Pd]/CoFe/IrMn

Trong hai màng đa lớp [Co/Pd]/Co/IrMn và [Co/Pd]/CoFe/IrMn, một đỉnh nhiễu xạ chính có cường độ mạnh (gấp $\sim 1,2$ lần cường độ của đỉnh [Co/Pd] (111), và $\sim 1,7$ lần cường độ đỉnh IrMn (111)) quan sát được ở góc 2θ vào khoảng 41° và $41,1^\circ$, là do sự chồng phủ của hai đỉnh Co/Pd (111) và IrMn (111) [22]. Lớp IrMn với hướng ưu tiên (111) cũng đã được chứng minh là thích hợp nhất cho sự phát triển ổn định cấu trúc phản sắt từ. Điểm đáng lưu ý là, so với phổ nhiễu xạ của mẫu màng [Co/Pd]/Co/IrMn, đỉnh nhiễu xạ chính trong mẫu màng [Co/Pd]/CoFe/IrMn có sự dịch nhẹ về phía bên phải khoảng $0,1^\circ$, đồng thời cường độ đỉnh nhiễu xạ cũng có sự tăng nhẹ. Điều này cho thấy việc thêm lớp xen giữa CoFe 0,5 nm vào giữa hai lớp [Co/Pd] và IrMn cũng có ảnh hưởng nhất định tới cấu trúc tinh thể của màng đa lớp, và vì thế có thể có ảnh hưởng tới tính chất từ của màng, cụ thể là H_C và H_{EB} .

3.2. Tính chất từ

Để khảo sát sự ảnh hưởng của lớp phản sắt từ IrMn và lớp xen giữa Co, CoFe, các mẫu màng đa lớp [Co/Pd], [Co/Pd]/Co/IrMn và [Co/Pd]/CoFe/IrMn được từ hóa trong từ trường có phương vuông góc với bề mặt mẫu. Hai lớp Co và CoFe xen giữa có cùng chiều dày 0,5 nm.



Hình 2. Đường cong từ hóa theo phương vuông góc của màng đa lớp [Co/Pd], [Co/Pd]/Co/IrMn và [Co/Pd]/CoFe/IrMn

Hình 2 biểu diễn đường cong từ hóa theo phương vuông góc của các màng đa lớp [Co/Pd], [Co/Pd]/Co/IrMn và [Co/Pd]/CoFe/IrMn. Kết quả cho thấy đường cong từ hóa của cả 3 mẫu đều có dạng vuông, với độ vuông xấp xỉ 1, thể hiện tính dị hướng theo phương vuông góc cao. Khi không có lớp phản sắt từ IrMn, đường cong từ hóa của mẫu [Co/Pd] là đối xứng qua trục tọa độ với giá trị $H_{C1} = -H_{C2} = 642$ Oe, trong đó H_{C1} là giá trị lực kháng từ tương ứng với từ trường quét theo chiều từ âm (-) sang dương (+), và H_{C2} là giá trị lực kháng từ tương ứng với từ trường quét theo chiều ngược lại. Khi có thêm lớp phản sắt từ IrMn, ta quan sát được hiệu ứng trao đổi dịch rõ ràng trong cả hai hệ mẫu [Co/Pd]/Co/IrMn và [Co/Pd]/CoFe/IrMn thông qua sự dịch đường cong từ hóa về phía bên trái theo phương của từ trường. Một điều đáng lưu ý rằng, độ dịch của đường cong từ hóa (H_{EB}) trong mẫu có lớp xen giữa CoFe là lớn hơn so với mẫu có lớp xen giữa là Co.

Để đánh giá một cách định lượng các giá trị H_C , H_{EB} trong các mẫu màng mỏng này, lực

kháng từ H_C và trường hiệu dịch H_{EB} được xác định bởi [31], [32]:

$$H_C = \frac{|H_{C1} - H_{C2}|}{2} \quad (1)$$

$$H_{EB} = \frac{|H_{C1} + H_{C2}|}{2} \quad (2)$$

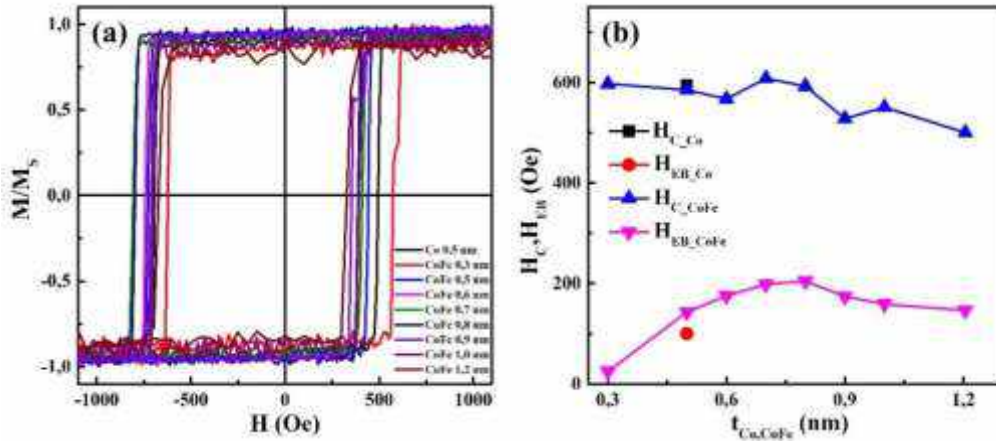
Bảng 1. Giá trị H_C và H_{EB} theo phương vuông góc của các mẫu

| Tên mẫu | H_C (Oe) | H_{EB} (Oe) |
|-------------------|------------|---------------|
| [Co/Pd] | 640 | 0 |
| [Co/Pd]/Co/IrMn | 595 | 98 |
| [Co/Pd]/CoFe/IrMn | 585 | 141 |

Bảng 1 là giá trị của H_C và H_{EB} trong các mẫu màng đa lớp [Co/Pd], [Co/Pd]/Co/IrMn và [Co/Pd]/CoFe/IrMn được xác định qua đường cong từ hóa. Kết quả tính toán cho thấy giá trị H_C trong các màng mỏng khi có thêm lớp phản sắt từ IrMn giảm không đáng kể so với màng [Co/Pd] và độ vuông của đường cong từ hóa hầu như không đổi (~1), điều đó cho thấy các mẫu màng đa lớp vẫn duy trì được tính dị hướng từ theo phương vuông góc cao. Khi lớp xen giữa là CoFe, giá trị H_{EB} được cải thiện đáng kể. $H_{EB} = 141$ Oe với lớp xen giữa CoFe trong khi $H_{EB} = 98$ Oe với lớp xen giữa Co (tăng gấp gần 1,5 lần).

Để đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp CoFe xen kẽ trong màng đa lớp [Co/Pd] lên H_C và H_{EB} , tính chất từ của các mẫu [Co/Pd]₅/CoFe/IrMn với lớp CoFe có chiều dày thay đổi từ 0,3 nm đến 1,2 nm được tiến hành khảo sát một cách hệ thống. Hình 3 là kết quả đo đường cong từ hóa theo phương vuông góc của các mẫu [Co/Pd]₅/CoFe/IrMn với chiều dày lớp CoFe thay đổi từ 0,3 nm đến 1,2 nm. Đường cong từ hóa theo phương vuông góc cho thấy H_{EB} cao lên tới 205 Oe đạt được trong mẫu $t_{CoFe} = 0,8$ nm ở nhiệt độ phòng. Các đường cong từ hóa có dạng vuông, thể hiện dị hướng từ theo phương vuông góc cao. Trường khử từ $H_C \sim 600$ Oe với $t_{CoFe} = 0,8$ nm và giảm nhẹ khi tăng chiều dày lớp CoFe. Điều đó chứng tỏ H_C không bị ảnh hưởng nhiều bởi chiều dày của lớp xen kẽ CoFe. Ngược lại, H_{EB} tăng mạnh từ 25 Oe đến 205 Oe khi chiều dày lớp CoFe tăng từ

0,3 nm đến 0,8 nm và giảm nhẹ xuống 145 Oe khi t_{CoFe} tăng lên đến 1,2 nm. H_{EB} có giá trị lớn nhất với t_{CoFe} trong khoảng 0,7 nm và 0,8 nm, kết quả này phù hợp với một số công bố [24]-[26]. Điều này chỉ ra rằng, việc sử dụng lớp xen giữa CoFe mỏng không chỉ có khả năng điều biến mà với chiều dày thích hợp có thể tăng cường đáng kể H_{EB} .



Hình 3. (a) Đường cong từ hóa theo phương vuông góc của màng đa lớp [Co/Pd]/CoFe/IrMn và (b) Sự phụ thuộc của H_c và H_{EB} vào chiều dày lớp CoFe (t_{CoFe}) của màng đa lớp [Co/Pd]/CoFe/IrMn

Khi có thêm lớp CoFe, độ nhám bề mặt tiếp xúc giữa màng [Co/Pd] và lớp IrMn được cải thiện, tương tác trao đổi giữa chúng vì thế được tăng cường, H_{EB} do đó cũng được tăng cường [24]. Tuy nhiên giá trị H_{EB} giảm khi $t_{CoFe} > 0,8$ nm có thể được giải thích là do tương tác trao đổi giữa hai lớp FM và AFM trong mẫu giảm khi chiều dày lớp xen giữa CoFe tăng, dẫn đến H_{EB} giảm. Định hướng từ bề mặt của hệ CoFe/Pd được biết đến là có phương vuông góc [33], tuy nhiên bản thân vật liệu CoFe vốn là vật liệu có định hướng từ ưu tiên theo phương song song với mặt phẳng màng. Do đó khi chiều dày của lớp CoFe tăng tới một giá trị nhất định ($t_{CoFe} > 0,8$ nm), định hướng từ định hướng tinh thể (có phương song song) trở lên vượt trội so với định hướng từ bề mặt (có phương vuông góc), khiến định hướng từ tổng cộng của hệ vật liệu theo phương vuông góc giảm. Điều này giải thích nguyên nhân H_c theo phương vuông góc giảm khi $t_{CoFe} > 0,8$ nm [33].

4. Kết luận

Màng mỏng đa lớp [Co/Pd]/IrMn thể hiện tính định hướng vuông góc và trường trao đổi hiệu dụng theo phương vuông góc cao ở nhiệt

độ phòng. Bằng cách thay thế lớp Co liền kề với IrMn bằng lớp CoFe mỏng, trường trao đổi dịch theo phương vuông góc được tăng cường đáng kể và phụ thuộc mạnh vào chiều dày lớp xen giữa trong khi định hướng vuông góc lớn vẫn được duy trì (H_c thay đổi không đáng kể). Trường trao đổi dịch là lớn nhất ($H_{EB}=205$ Oe) với chiều dày lớp xen kẽ CoFe là 0,8 nm, tăng gấp 2 lần so với hệ không có lớp CoFe xen giữa. Kết quả nghiên cứu này cung cấp một phương pháp hiệu quả để tăng cường H_{EB} trong các hệ vật liệu AF/FM có định hướng vuông góc nhằm ứng dụng trong các linh kiện từ, spintronic thế hệ mới.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn sự trợ giúp kinh phí của Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam thông qua đề tài Khoa học Công nghệ cấp Viện Hàn lâm KHCNVN thuộc chương trình hợp tác quốc tế với Belarus, mã số QTBY01.04/19-20.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1]. W. H. Meiklejohn, and C. P. Bean, "New Magnetic Anisotropy," *Phys. Rev.*, vol. 102, no. 5, p. 1413, 1956.

- [2]. W. H. Meiklejohn, and C. P. Bean, "New Magnetic Anisotropy," *Phys. Rev.*, vol. 105, no. 3, p. 904, 1957.
- [3]. C. Leighton, J. Nogués, B. J. Jönsson-Åkerman, and I. K. Schuller, "Coercivity Enhancement in Exchange Biased Systems Driven by Interfacial Magnetic Frustration," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 15, p. 3466, 2000.
- [4]. D. Schafer, P. L. Grande, L. G. Pereira, G. M. Azevedo, A. Harres, M. A. de Sousa, F. Pelegrini, and J. Geshev, "Antiparallel interface coupling evidenced by negative rotatable anisotropy in IrMn/NiFe bilayers," *J. Appl. Phys.*, vol. 117, no. 21, p. 215301, 2015.
- [5]. A. E. Berkowitz, and K. Takano, "Exchange anisotropy-a review," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 200, no. 1-3, pp. 552-570, 1999.
- [6]. S. Giri, M. Patra, and S. Majumdar, "Exchange bias effect in alloys and compounds," *J. Phys.: Condens. Matter.*, vol. 23, p. 07321, 2011
- [7]. 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. Buchigano, 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," *J. Appl. Phys.*, vol. 85, no. 8, pp. 5828-5833, 1999.
- [8]. P. P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso, and F. Cardoso, "Magnetoresistive sensors," *J. Phys.: Condens. Matter.*, vol. 19, no. 16, p. 165221, 2007.
- [9]. B. Tudu, and A. Tiwari, "Recent Developments in Perpendicular Magnetic Anisotropy Thin Films for Data Storage Applications," *Vacuum*, vol. 146, pp. 329-341, 2017.
- [10]. R. Sbiaa, H. Meng, and S. N. Piramanayagam, "Materials with perpendicular magnetic anisotropy for magnetic random access memory," *Phys. Stat. Sol. RRL*, vol. 5, no. 12, pp. 413-419, 2011.
- [11]. S. Yanlin, and Z. Daoben (Eds.), *High density data storage: Principle, Technology, and Materials*, World Scientific, 2009.
- [12]. K. Mohri, Y. Honkura, L. Panina, and T. Uchiyama, "Super MI sensor: recent advances of amorphous wire and CMOS-IC magneto-impedance sensor," *J. Nanosci. Nanotech.*, vol. 12, no. 9, pp. 7491-7495, 2012.
- [13]. A. V. Kimel, A. Kirilyuk, P. A. Usachev, R. V. Pisarev, A.M. Balbashov, and T. Rasing, "Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulses," *Nature*, vol. 435, pp. 655-657, (2005).
- [14]. T. Satoh, S.-J. Cho, R. Iida, T. Shimura, K. Kuroda, H. Ueda, Y. Ueda, B. A. Ivanov, F. Nori, and M. Fiebig, "Spin Oscillations in Antiferromagnetic NiO Triggered by Circularly Polarized Light," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105, p. 077402, 2010.
- [15]. S. Wienholdt, D. Hinzke, and U. Nowak, "THz Switching of Antiferromagnets and Ferrimagnets," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 108, p. 247207, 2012.
- [16]. A. Mougin, S. Mangin, J.-F. Bobo, and A. Loidl, "New Trends in Magnetic Exchange Bias," *Eur. Phys. J. B*, vol. 45, p. 155, 2005
- [17]. 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.*, vol. 83, no. 17, p. 3537, 2003.
- [18]. 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.*, vol. 97, no. 6, p. 063907, 2005.
- [19]. P. F. Carcia, "Perpendicular magnetic anisotropy in Pd/Co and Pt/Co thin-film layered structures," *J. App. Phys.*, vol. 63, no. 10, p. 5066, 1988.
- [20]. C. W. Barton, and T. Thomson, "Magnetisation reversal in anisotropy graded Co/Pd multilayers," *J. Appl. Phys.*, vol. 118, no. 6, p. 063901, 2015.
- [21]. C. P. Li, Nanofabrication, nanomagnetism and other applications of nanostructures. Diss. UC San Diego, 2007.
- [22]. N. T. Hue, N. T. T. Thuy, C. T. T. Hai, D. H. Manh, D. H. Manh, V. D. Lam, N. V. Dang, and N. T. N. Anh, "Tunable perpendicular exchange bias and coercivity in [Co/Pd]/IrMn multilayers," *TNU - J. Sci. Tech.*, vol. 200, no. 7, pp. 141-148, 2019.
- [23]. Y. F. Liu, J. W. Cai, and S. L. He, "Large perpendicular exchange bias in IrMn/CoFe/[Pt/Co] multilayers grown on a Ta/Pt buffer layer," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 42, no. 11, p. 115002, 2009.

- [24]. L. Lin, S. Kim, and S. Bae, "Effects of $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ insertion layer on perpendicular exchange bias characteristics in $[\text{Pd}/\text{Co}]_s/\text{FeMn}$ bilayered thin films," *J. Phys.*, vol. 101, no. 9, p. 09066, 2007.
- [25]. G. Anderson, Y. Huai, and L. Miloslawsky, "CoFe/IrMn exchange biased top, bottom, and dual spin valves," *J. App. Phys.*, vol. 87, no. 9, p. 6989, 2000.
- [26]. R. Law, R. Sbiaa, T. Liew, and T. C. Chong, "Effects of Ta seed layer and annealing on magnetoresistance in CoFePd-based pseudo-spin-valves with perpendicular anisotropy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 24, p. 242504, 2007.
- [27]. T. Tahmasebi, S. N. Piramanayagam, R. Sbiaa, R. Law, and T. C. Chong, "Effect of different seed layers on magnetic and transport properties of perpendicular anisotropic spin valves," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 6, p. 1933, 2010.
- [28]. H. Nemoto, H. Nakagawa, and Y. Hosoe, "Dependence of Co/Pd Superlattice Properties on Pd Layer Thickness," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 5, pp. 2714-2716, 2003.
- [29]. H. J. Zhang, S. Yamamoto, Y. Fukaya, M. Maekawa, H. Li, A. Kawasuso, T. Seki, E. Saitoh, and K. Takanashi, "Current-induced spin polarization on metal surfaces probed by spin-polarized positron beam," *Sci. Rep.*, vol. 4, p. 4844, 2014.
- [30]. 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.*, vol. 102, no. 5, p. 053911, 2007.
- [31]. 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.*, vol. 113, no. 20, p. 203903, 2013.
- [32]. J. Nogués, and I. K. Schuller, "Exchange bias," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 192, pp. 203-232, 1999.
- [33]. D.-T. Ngo, Z. L. Meng, T. Tahmasebi, X. Yu, E. Thoeng, L. H. Yeo, A. Rusydi, G. C. Han, and K.-L. Teo, "Interfacial tuning of perpendicular magnetic anisotropy and spin magnetic moment in CoFe/Pd multilayers," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 350, pp. 42-46, 2014.