

KHẢ NĂNG ĐIỀU KHIỂN DỊ HƯỚNG TỪ THEO PHƯƠNG VUÔNG GÓC TRONG MÀNG MỎNG ĐA LỚP [Co/Pd]

Cao Thị Thanh Hải¹, Vũ Hồng Kỳ², Nguyễn Thị Thanh Thủy¹,
Nguyễn Thị Huệ¹, Đinh Hùng Mạnh¹, Đỗ Khánh Tùng²,
Nguyễn Thanh Hoàng², Nguyễn Thị Ngọc Anh^{2,3*}

Tóm tắt: Các màng mỏng đa lớp [Co/Pd] có dị hướng từ vuông góc cao thu hút được sự quan tâm đặc biệt do khả năng ứng dụng trong thiết bị ghi từ mật độ cao. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành khảo sát một cách hệ thống sự phụ thuộc của dị hướng từ vuông góc vào các thông số cấu trúc của màng mỏng đa lớp [Co(t_{Co})/Pd(t_{Pd})]_N như số lớp (N), chiều dày của lớp Co (t_{Co}) và chiều dày của lớp Pd (t_{Pd}). Mối liên hệ giữa đặc trưng cấu trúc và tính chất từ như lực kháng từ (H_C), từ độ bão hòa (M_S) và hằng số dị hướng từ (K_U) trong các màng đa lớp này cũng được bàn luận chi tiết.

Từ khóa: Màng đa lớp Co/Pd; Màng mỏng từ đa lớp; Dị hướng từ vuông góc.

1. MỞ ĐẦU

Các thiết bị ghi từ và lưu trữ thông tin đã và đang được ứng dụng trong hầu hết các lĩnh vực công nghệ, cũng như trong cuộc sống hàng ngày của chúng ta. So với các thiết bị Spintronics truyền thống sử dụng các vật liệu từ có dị hướng từ nằm trong mặt phẳng, các thiết bị Spintronics thế hệ mới dựa trên các vật liệu từ có dị hướng từ vuông góc với mặt phẳng (PMA) gần đây thu hút được sự quan tâm nhờ có nhiều ưu điểm nổi trội như ít phụ thuộc vào hình dạng, độ ổn định nhiệt cao, mật độ dòng điện cần cho quá trình vận chuyển dòng spin thấp, mật độ lưu trữ siêu cao và kích thước linh kiện giảm đáng kể [1-5].

Trong các vật liệu sắt từ có dị hướng từ vuông góc (các hợp kim chứa nhóm kim loại chuyển tiếp như CoPt, CoPd, FePt, ... hay các màng mỏng đa lớp [Co/Ni], [Co/Pd], [Co/Pt], ...), màng đa lớp [Co/Pd] thu hút được sự quan tâm bởi có thể chế tạo ở nhiệt độ phòng, có tính dị hướng vuông góc tốt, từ độ bão hòa cao, trường khử 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 [6-10]. Mặc dù vậy, các nghiên cứu chi tiết về khả năng điều khiển dị hướng từ vuông góc (trường khử từ H_C , hằng số dị hướng K_U , từ độ bão hòa M_S) theo các thông số cấu trúc trong hệ vật liệu này vẫn còn ít và chưa có tính hệ thống cao. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành chế tạo và khảo sát các đặc trưng cấu trúc cũng như tính chất từ của màng mỏng đa lớp [Co(t_{Co})/Pd(t_{Pd})]_N theo các thông số cấu trúc như: i) số lớp N, ii) chiều dày của lớp Co (t_{Co}) và iii) chiều dày của lớp Pd (t_{Pd}) một cách hệ thống nhằm đánh giá khả năng điều khiển dị hướng từ vuông góc trong màng mỏng đa lớp loại này.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp chế tạo màng mỏng đa lớp

Các mẫu màng đa lớp [Co(t_{Co})/Pd(t_{Pd})]_N được chế tạo trên hệ phún xạ DC magnetron (AJA International, Inc., USA). Hệ phún xạ có chân không cơ sở cao $\sim 10^{-7}$ Pa và áp suất khí Ar khi phún xạ là 6,7 Pa. Để phún xạ là đế silic (Si) có phủ một lớp oxit silic SiO₂ dày khoảng 1000 nm trên bề mặt. Quá trình phún xạ được thực hiện lần lượt như sau: Đầu tiên lắng đọng một lớp Ta với chiều dày 5 nm tiếp đó đến lớp Pd có chiều dày 3 nm lên đế Si. Lớp màng kép Ta/Pd này được sử dụng như lớp tạo mầm cho các lớp vật liệu chính. Sau lớp màng kép Ta/Pd, các lớp vật liệu chính Co và Pd cần nghiên cứu được lắng đọng lần lượt, lớp kép Co/Pd được lắng đọng lặp lại tùy theo số lớp (N) cần khảo sát. Cuối cùng lớp kép Pd/Ta (với chiều dày giống như lớp kép tạo mầm) được phủ lên trên cùng. Lớp tạo

màng kép Ta/Pd được sử dụng nhằm mục đích tăng cường hướng mọc tinh thể (111) của Co/Pd. Trong khi lớp phủ kép Pd/Ta ở trên cùng dùng để chống ôxi hóa cho màng đa lớp Co/Pd [11, 12]. Công suất phun xạ đối với Co là 37,5 W và đối với Pd là 87,5 W tương ứng với tốc độ lắng đọng của Co là 0,18 Å/s và với Pd là 0,46 Å/s. Tốc độ lắng đọng chậm này để đảm bảo sự lắng đọng là đồng đều trong từng lớp, đảm bảo mức độ xen kẽ giữa Co-Pd ở bề mặt tiếp giáp thấp và tạo ra lớp tiếp xúc giữa các lớp Co và Pd là sắc nét [13]. Việc lắng đọng các mẫu màng đa lớp được thực hiện ở nhiệt độ phòng.

Để khảo sát dị hướng từ vuông góc theo các thông số cấu trúc số lớp N , chiều dày t_{Co} của lớp Co và chiều dày t_{Pd} của lớp Pd, chúng tôi tiến hành chế tạo 3 hệ mẫu có cấu trúc và độ dày danh định như sau:

Hệ mẫu 1: $[Co(0,5\text{ nm})/Pd(1,0\text{ nm})]_N$ với $N = 1, 2, 3, \dots, 10$ (ký hiệu $[Co/Pd]_N$);

Hệ mẫu 2: $[Co(t_{Co})/Pd(1,0\text{ nm})]_5$ với $t_{Co} = 0,3 - 1,0\text{ nm}$ (ký hiệu $[Co(t_{Co})/Pd]$);

Hệ mẫu 3: $[Co(0,5\text{ nm})/Pd(t_{Pd})]_5$ với $t_{Pd} = 0,6 - 2,0\text{ nm}$ (ký hiệu $[Co/Pd(t_{Pd})]$).

Các lớp đệm Ta/Pd và lớp phủ Pd/Ta là như nhau trong tất cả các hệ mẫu với các thông số được miêu tả ở trên.

Ngoài 3 hệ mẫu trên, một mẫu màng mỏng đa lớp $[Co(0,5\text{ nm})/Pd(1,0\text{ nm})]_5$ (ký hiệu $[Co/Pd]$) được chế tạo và sử dụng như mẫu đại diện. Mẫu này được chọn với các thông số cấu trúc số lớp $N = 5$, chiều dày của lớp Co $t_{Co} = 0,5\text{ nm}$ và chiều dày của lớp Pd $t_{Pd} = 1\text{ nm}$. Mẫu này sau khi chế tạo sẽ được phân tích kỹ các đặc trưng về cấu trúc và tính chất từ, và sẽ được sử dụng như mẫu đại diện $[Co/Pd]$. Các mẫu màng đa lớp khác, dựa trên cơ sở mẫu đại diện, với các thông số cấu trúc về số lớp, chiều dày các lớp thay đổi xung quanh giá trị của mẫu đại diện cũng sẽ được chế tạo, khảo sát và so sánh với mẫu đại diện này.

2.2. Các phương pháp khảo sát đặc trưng tính chất

Các màng mỏng đa lớp $[Co(t_{Co})/Pd(t_{Pd})]_N$ sau khi chế tạo được tiến hành khảo sát đặc trưng cấu trúc và tính chất từ một cách hệ thống. Cấu trúc tinh thể của các mẫu được xác định thông qua giản đồ nhiễu xạ tia X đo bằng phương pháp nhiễu xạ bột trên hệ X'pert Pro với điện áp 45 kV và dòng điện 40 mA, sử dụng bức xạ Cu-K α (bước sóng $\lambda = 1,2518\text{ Å}$). Để khảo sát dị hướng từ vuông góc, chúng tôi tiến hành đo đường cong từ hóa của các mẫu trong từ trường song song và vuông góc với mặt phẳng mẫu trên hệ từ kế mẫu rung (VSM) với từ trường cực đại đạt 14 kOe. Tất cả các phép đo đặc trưng cấu trúc và tính chất từ được tiến hành ở nhiệt độ phòng.

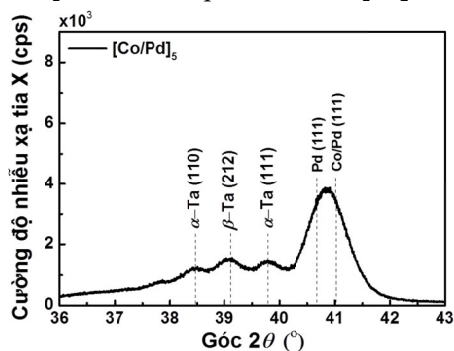
3. KẾT QUẢ, THẢO LUẬN

3.1. Đặc trưng cấu trúc và tính chất từ của mẫu màng đa lớp đại diện $[Co/Pd]$

3.1.1. Đặc trưng cấu trúc

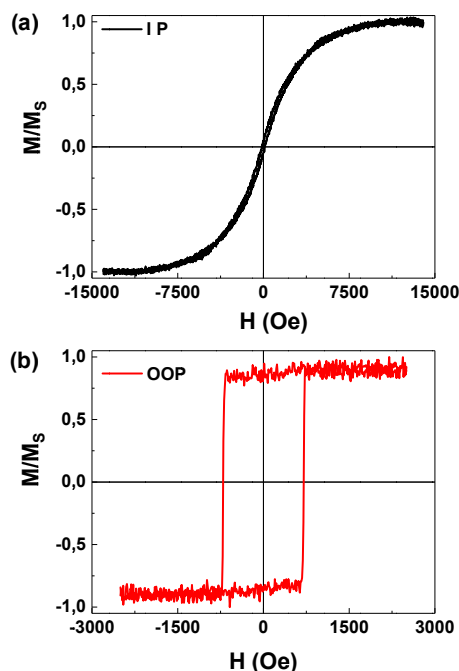
Hình 1 là kết quả đo XRD của mẫu đại diện, mẫu màng mỏng đa lớp $[Co/Pd]$. Phân tích định tính pha cho thấy có sự tồn tại của các pha tinh thể Ta, Pd, Co/Pd trong mẫu. Các đỉnh nhiễu xạ được mở rộng khá mạnh so với các đỉnh của pha tinh thể chuẩn. Sự mở rộng đỉnh này có thể do hiệu ứng kích thước nano (chiều dày của các lớp màng là rất mỏng) và sự chồng chập giữa các đỉnh. Kết quả XRD chỉ ra sự tồn tại của lớp α -Ta (110) với đỉnh nhiễu xạ đặc trưng ở góc $2\theta = 38,5^\circ$, α -Ta (111) với đỉnh nhiễu xạ đặc trưng ở góc $2\theta = 39,9^\circ$ và β -Ta (212) với đỉnh nhiễu xạ đặc trưng xuất hiện ở góc $2\theta = 39,2^\circ$ [11]. Đỉnh nhiễu xạ có cường độ mạnh ở khoảng $40,8^\circ$ là sự chồng chập của đỉnh nhiễu xạ Pd (111) và Co/Pd (111). Vị trí đỉnh nhiễu xạ Co/Pd (111) này nằm giữa đỉnh nhiễu xạ của Pd (111) tinh khiết $\sim 40,8^\circ$ và đỉnh nhiễu xạ của Co (111) tinh khiết $\sim 44,4^\circ$. Theo một số nghiên cứu, vị trí đỉnh Co/Pd (111) sẽ phụ thuộc vào chiều dày của các lớp cũng như số lớp trong màng đa lớp [15, 16]. Hướng (111) của Co/Pd 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 [17].



Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu đại diện [Co/Pd].

3.1.2. Tính chất từ



Hình 2. Đường cong từ hóa trong mẫu đại diện [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 xác định dị hướng từ vuông góc, chúng tôi tiến hành đo đường cong từ trễ của mẫu đại diện [Co/Pd] trong từ trường lên tới 14 kOe theo phương song song (IP) và vuông góc (OOP) với bề mặt mẫu. Hình 2 (a) và 2 (b) biểu diễn đường cong từ hóa đo theo hai phương này. Kết quả chỉ ra rằng, với màng đa lớp [Co/Pd] đã chế tạo, phương từ hóa song song với mặt phẳng mẫu 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 trường đảo từ bằng với giá trị của lực kháng từ, $H_a = H_c = 750$ Oe. Kết quả này phù hợp với một số nghiên cứu trước đây rằng, quá trình đảo từ theo phương vuông góc sẽ diễn ra rất đột ngột trong các màng đa lớp Co/Pd có dị hướng từ vuông góc cao và quá trình đảo từ xảy ra chủ yếu là do quá trình quay mômen [18]. Kết quả dị hướng từ vuông góc cao trong mẫu màng đa lớp này cũng phù hợp với kết quả phân tích cấu trúc từ giản đồ nhiễu xạ tia X ở trên.

Theo kết quả phân tích XRD, mẫu màng mỏng đa lớp [Co/Pd] đã chế tạo có hướng tinh thể ưu tiên là hướng (111). Đây chính là hướng tinh thể cho dị hướng từ vuông góc cao.

Từ các đường cong từ hóa theo hai phương song song và vuông góc với mặt phẳng mẫu, 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_U . Bằng cách vẽ chồng các đường cong từ hóa đo theo hai phương song song và vuông góc với mặt phẳng mẫu, từ trường bão hòa H_S được xác định là điểm giao nhau giữa hai đường từ hóa. Trường dị hướng H_K và dị hướng từ hiệu dụng K_U được tính theo công thức [19, 20]:

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

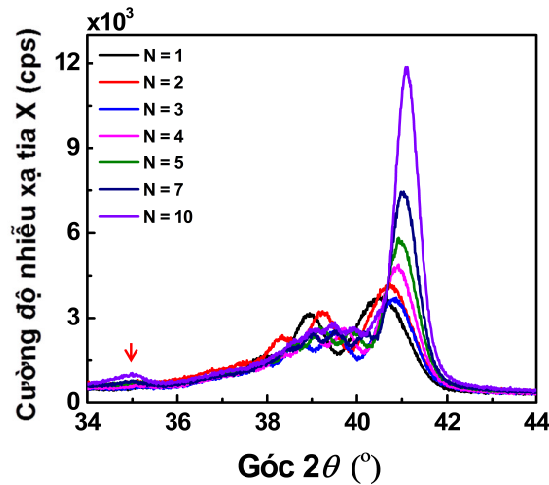
$$K_U = H_K + \frac{M_S}{2} \quad (2)$$

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 [21]. Trong mẫu màng mỏng [Co/Pd] đã chế tạo, giá trị của $M_S = 385 \text{ emu/cm}^3$ và $K_U = 6,5 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$, giá trị này hoàn toàn phù hợp với công bố trước đó [22].

Để đánh giá vai trò của các thông số cấu trúc trong màng đa lớp [Co/Pd] ảnh hưởng tới tính chất từ, các mẫu với thông số cấu trúc (chiều dày lớp Co, chiều dày lớp Pd, số lớp kép Co/Pd) khác nhau cũng đã được chế tạo và khảo sát.

3.2. Ảnh hưởng của số lớp N trong màng mỏng đa lớp [Co/Pd] $_N$

3.2.1. Ảnh hưởng của số lớp N lên đặc trưng cấu trúc



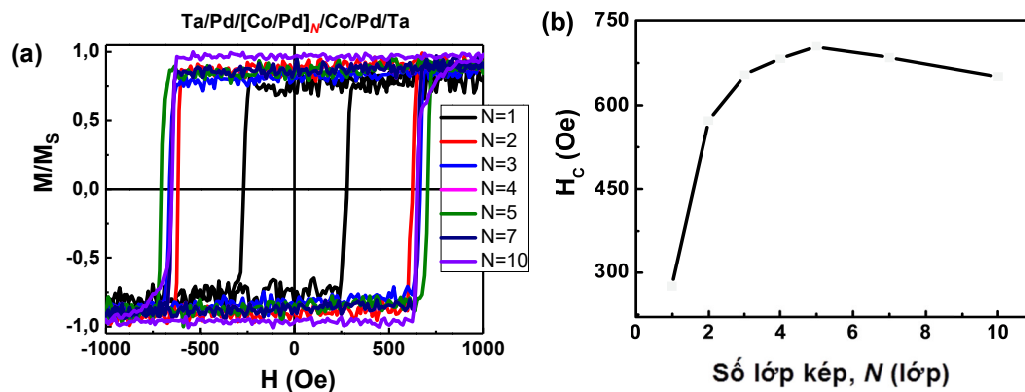
Hình 3. Giảm đồ nhiễu xạ tia X của các màng mỏng đa lớp [Co/Pd] $_N$ trong hệ mẫu 1 với N thay đổi từ 1 tới 10.

Kết quả đo XRD của các màng mỏng [Co/Pd] $_N$ trong **hệ mẫu 1** với $t_{Co} = 0,5 \text{ nm}$, $t_{Pd} = 1,0 \text{ nm}$ và N thay đổi từ 1 đến 10 được biểu diễn trong hình 3. Giảm đồ nhiễu xạ tia X cho thấy các màng đa lớp đều có cấu trúc Co/Pd (111) với đỉnh nhiễu xạ đặc trưng có cường độ mạnh ở góc 2θ vào khoảng 41° . Khi số lớp N tăng, cường độ đỉnh nhiễu xạ Co/Pd (111) cũng tăng rõ rệt. Cùng với việc cường độ đỉnh nhiễu xạ Co/Pd (111) được tăng cường khi N tăng, vị trí đỉnh nhiễu xạ Co/Pd (111) có sự dịch chuyển về phía bên phải với độ dịch góc 2θ từ $40,5^\circ$ (với $N=1$) tới $41,1^\circ$ (với $N=10$) gần với đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của Co (111) tinh khiết. Điều này chứng tỏ cấu trúc Co/Pd (111) trở nên tốt hơn khi số lớp N tăng. Điều này kỳ vọng sẽ dẫn tới sự tăng cường dị hướng từ theo phương vuông góc khi N tăng bởi cấu trúc (111) được biết là có vai trò quan trọng trong việc tăng cường tính dị hướng

từ theo phương vuông góc trong các màng mỏng đa lớp Co/Pd. Với các mẫu $N \geq 7$, phổ nhiễu xạ tia X có sự xuất hiện một đỉnh lạ ở vị trí góc 2θ vào khoảng 35° . Điều đó cho thấy khi $N \geq 7$ mẫu bắt đầu có sự thay đổi về cấu trúc tinh thể.

3.2.2. Ảnh hưởng của số lớp N lên tính chất từ

Hình 4 là kết quả đo đường cong từ hóa theo phương vuông góc của các mẫu trong **hệ mẫu 1** $[\text{Co/Pd}]_N$, với số lớp N thay đổi từ 1 đến 10. Đường cong từ hóa theo phương vuông góc (hình 4 (a)) cho thấy các mẫu đều có dị hướng từ theo phương vuông góc cao vì các đường cong từ hóa đều rất vuông ($S = 0,96-0,98$). Lực kháng từ H_C của các mẫu thay đổi từ khoảng từ 275 Oe đến 750 Oe. Điều này hoàn toàn phù hợp với kết quả đo XRD của các mẫu trong đó chỉ ra các mẫu đều có cấu trúc Co/Pd (111) mạnh. Ở các mẫu có N tăng 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 loại này một cách gián tiếp.



Hình 4. (a) Đường cong từ hóa của màng mỏng đa lớp $[\text{Co/Pd}]_N$ trong **hệ mẫu 1** theo phương vuông góc với mặt phẳng màng, (b) Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của lực kháng từ H_C vào số lớp N (N thay đổi từ 1 đến 10).

Kết quả đo đường cong từ hóa chỉ ra rằng, cơ chế từ hóa trong các màng mỏng này với $N < 7$ chủ yếu là cơ chế quay đômên. 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 từ hóa. Kết quả này có thể là do sự hình thành cấu trúc đômên có dạng vòng/sọc gấp khúc (labyrinth/stripe domain) với mômen từ vuông góc với mặt phẳng màng và ngược chiều với các vùng đômên lân cận dẫn đến 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 quá trình quay vách đômên [22]. Cấu trúc đômên loại này đã được biết đến và nghiên cứu rộng rãi trước đây ở các hệ màng mỏng đa lớp có dị hướng từ vuông góc [22-24]. Nói cách khác, H_C lúc đầu tăng theo số lớp N từ 275 Oe đến 750 Oe khi N tăng từ 1 đến 5, tuy nhiên khi N tiếp tục tăng thì tính dị hướng vuông góc trong màng lại giảm, H_C giảm do sự hình thành các đômên dạng vòng/sọc gấp khúc.

Hằng số dị hướng K_U và lực kháng từ H_C của các mẫu màng đa lớp được trình bày trong bảng 1. Các giá trị này được tính toán từ các giá trị thực nghiệm thu được trên các đường cong từ hóa của các mẫu theo phương trình (1) và (2).

Từ bảng 1 ta thấy giá trị K_U tăng nhẹ khi N tăng từ 1 đến 5, sau đó giảm khi N tiếp tục tăng. Sự giảm của hằng số dị hướng K_U với sự tăng số lớp N có thể liên quan đến độ nhám bề mặt hoặc sự thay đổi cấu trúc tinh thể của màng do sự thay đổi ứng suất bề mặt giữa các lớp hoặc sự thay đổi về kích thước hạt khi độ dày của màng tăng. Điều đó chứng tỏ rằng, hoàn toàn có thể điều khiển dị hướng từ vuông góc thông qua việc thay đổi số lớp

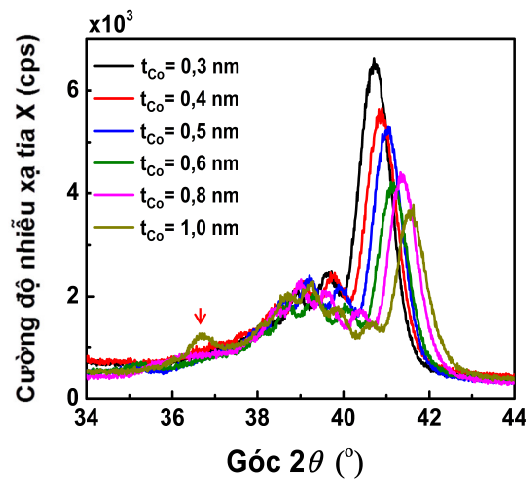
của màng đa lớp. Cũng từ kết quả này, mẫu có lực kháng từ lớn nhất, có dị hướng từ vuông góc tốt nhất (ứng với $N = 5$) được lựa chọn để tiến hành các khảo sát tiếp theo.

Bảng 1. Biểu diễn các giá trị lực kháng từ H_C , từ độ bão hòa M_S , hằng số dị hướng K_U khi thay đổi số lớp N từ 1 đến 10.

N	H_C (Oe)	M_S (emu/cm ³)	K_U (erg/cm ³)
1	275	359	6.11×10^6
2	573.5	352	6.17×10^6
3	654.4	360	6.23×10^6
4	682.8	368	6.28×10^6
5	750	385	6.50×10^6
7	685	355	6.00×10^6
10	651	363	5.41×10^6

3.3. Ảnh hưởng của chiều dày lớp Co trong màng mỏng đa lớp $[Co(t_{Co})/Pd]$

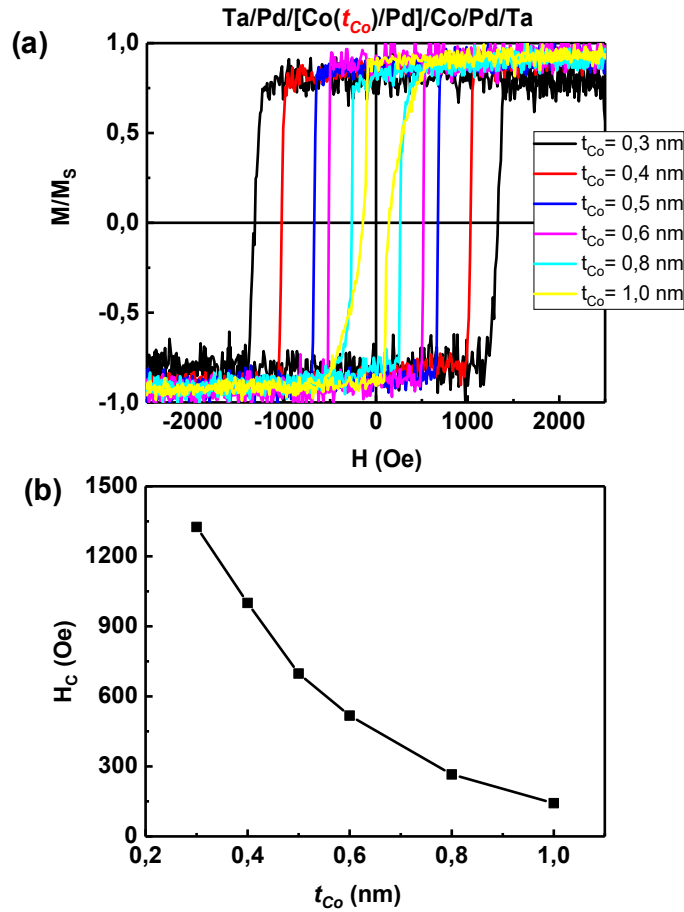
3.3.1. Ảnh hưởng của chiều dày lớp Co lên đặc trưng cấu trúc



Hình 5. Giản đồ nhiễu xạ tia X của màng mỏng $[Co(t_{Co})/Pd]$ trong hệ mẫu 2 với t_{Co} thay đổi từ 0,3 đến 1,0 nm.

Hình 5 là kết quả đo XRD của màng mỏng $[Co(t_{Co})/Pd]$ của hệ mẫu 2 với $t_{Pd} = 1,0$ nm và t_{Co} thay đổi từ 0,3 đến 1,0 nm. Kết quả cho thấy đỉnh nhiễu xạ Co/Pd (111) có cường độ mạnh, vị trí của đỉnh Co/Pd (111) có sự thay đổi nhẹ phụ thuộc vào chiều dày của lớp Co. Điều này phù hợp với các kết quả nghiên cứu đã được công bố trước đó cho hệ Co/Pd [15,16]. Khi chiều dày lớp Co tăng, đỉnh nhiễu xạ Co/Pd (111) có sự dịch chuyển về phía bên phải, gần với đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của Co (111) tinh khiết. Cường độ đỉnh nhiễu xạ Co/Pd (111) giảm dần khi t_{Co} tăng. Với kết quả như vậy, có thể dự đoán rằng, dị hướng từ theo phương vuông góc trong các mẫu này sẽ giảm dần khi t_{Co} tăng. Điều đó chứng tỏ dị hướng từ vuông góc trong các màng mỏng đa lớp loại này hoàn toàn có thể điều biến được thông qua việc thay đổi chiều dày lớp Co. Khi $t_{Co} = 1,0$ nm, phổ nhiễu xạ XRD có sự xuất hiện một đỉnh lạ ở vị trí $\sim 36,7^\circ$. Điều này cho thấy có sự thay đổi về cấu trúc tinh thể của mẫu màng đa lớp khi chiều dày lớp Co tăng lên tới 1,0 nm.

3.3.2. Ảnh hưởng của chiều dày lớp Co lên tính chất từ



Hình 6. (a) Đường cong từ hóa của màng mỏng $[\text{Co}(t_{\text{Co}})/\text{Pd}]$ trong **hệ mẫu 2** theo phương vuông góc với mặt phẳng màng với t_{Co} thay đổi từ 0,3 đến 1,0 nm và (b) Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của lực kháng từ H_c vào chiều dày lớp Co.

Hình 6 (a) là các đường từ hóa theo phương vuông góc của các màng đa lớp $[\text{Co}(t_{\text{Co}})/\text{Pd}]$ trong **hệ mẫu 2**. Các mẫu trong hệ này có $N = 5$, $t_{\text{Pd}} = 1,0$ nm trong khi t_{Co} thay đổi từ 0,3 nm tới 1,0 nm. Khi chiều dày lớp Co trong khoảng $t_{\text{Co}} = 0,3-0,5$ nm, các đường từ hóa có dạng vuông và quá trình đảo từ xảy ra đột ngột tại $H=H_c$, nói cách khác trường đảo từ trong các mẫu này $H_a=H_c$. Giá trị H_c giảm gần như tuyến tính khi t_{Co} tăng từ 0,3-0,5 nm (hình 6 (b)). 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 [23]. 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 $t_{\text{Co}} \geq 0,6$ nm, có một sự suy giảm rõ rệt về độ vuông trong các đường từ hóa, hình thành vùng đuôi nhọn ở cuối các đường cong từ hóa. Nói cách khác khi t_{Co} tăng dị hướng từ thể tích (theo phương song song với mặt phẳng mẫu) của các lớp Co dần trở lên trội hơn so với dị hướng từ bề mặt ở các lớp tiếp giáp Co/Pd (dị hướng từ theo phương vuông góc với mặt phẳng mẫu).

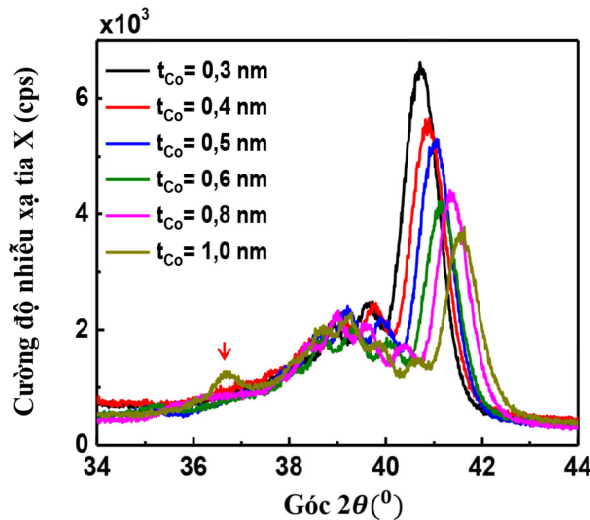
Kết quả này hoàn toàn phù hợp với một số kết quả nghiên cứu đã được công bố trên hệ vật liệu này. Sự thay đổi hình dạng của đường cong từ hóa trong các mẫu có $t_{\text{Co}} \geq 0,6$ nm tương ứng với sự hình thành cấu trúc cầu trúc đômên từ có dạng vòng/sọc gấp khúc với

mômen từ vuông góc với mặt phẳng màng và ngược chiều với các vùng đômen lân cận, cơ chế đảo từ trong các màng có $t_{Co} \geq 0,6$ nm gồm cả quá trình dịch chuyển và quay vách đômen [21-24]. Kết quả này cũng hoàn toàn phù hợp với kết quả đo nhiễu xạ XRD trong đó khi t_{Co} tăng thì cường độ đỉnh nhiễu xạ Co/Pd (111) giảm dần. Như vậy, kết quả cho thấy có thể điều khiển được tính dị hướng vuông góc dựa trên việc điều khiển chiều dày lớp Co.

3.4. Ảnh hưởng của chiều dày lớp Pd trong màng mỏng đa lớp [Co/Pd(t_{Pd})]

3.4.1. Ảnh hưởng của chiều dày lớp Pd lên đặc trưng cấu trúc

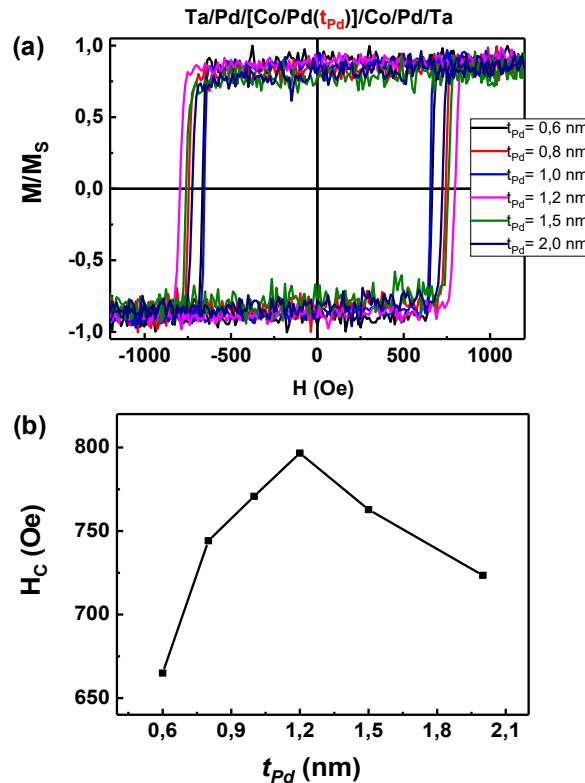
Hình 7 là kết quả đo XRD của màng mỏng [Co/Pd(t_{Pd})] trong **hệ mẫu 3** với $t_{Co} = 0,5$ nm và t_{Pd} thay đổi từ 0,6 đến 2,0 nm. Giảm độ nhiễu xạ tia X trên các mẫu cho thấy đỉnh Co/Pd (111) có cường độ nhiễu xạ mạnh, khi chiều dày lớp Pd tăng, đỉnh nhiễu xạ Co/Pd (111) có sự dịch chuyển về phía bên trái, gần với đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của Pd (111) tinh khiết. Cường độ đỉnh xạ Co/Pd (111) tăng khi t_{Pd} tăng. Điều này có thể dự đoán rằng, dị hướng từ theo phương vuông góc trong các mẫu này sẽ tăng dần khi t_{Pd} tăng. Tuy nhiên khi $t_{Pd} \geq 1,5$ nm, có sự xuất hiện một đỉnh lạ ở vị trí khoảng $36,7^\circ$. Sự xuất hiện đỉnh nhiễu xạ lạ cho thấy đã có sự thay đổi về cấu trúc tinh thể của mẫu khi chiều dày của lớp Pd tăng lên tới 1,5 nm.



Hình 7. Giảm độ nhiễu xạ tia X của màng mỏng [Co/Pd(t_{Pd})] trong **hệ mẫu 3** với t_{Pd} thay đổi từ 0,6 đến 2,0 nm.

3.4.2. Ảnh hưởng của chiều dày lớp Pd lên tính chất từ

Ảnh hưởng của chiều dày lớp Pd lên tính chất từ của các mẫu [Co/Pd(t_{Pd})] trong **hệ mẫu 3** được thể hiện trong hình 8. Các mẫu trong hệ này có $N = 5$, $t_{Co} = 0,5$ nm trong khi t_{Pd} thay đổi từ 0,6 đến 2,0 nm. Kết quả đo trong hình 8 (a) cho thấy đường cong từ hóa theo phương vuông góc của các mẫu có dạng vuông, tương ứng với dị hướng từ vuông góc cao. Với các mẫu có 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 đó rằng, khi 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 phi từ lớn gấp 2 đến 3 lần chiều dày lớp từ tính [13]. Trong nghiên cứu này, chiều dày lớp Pd lý tưởng là nằm trong khoảng từ 1,0-1,5 nm. Khi lớp Pd tiếp tục tăng ($t_{Pd} \geq 1,5$ nm), tương tác trao đổi sắt từ giữa các lớp Co trở lên yếu đi, dẫn đến H_C giảm. Điều này hoàn toàn phù hợp với kết quả đo XRD, với $t_{Pd} \geq 1,5$ nm, mẫu bắt đầu có sự thay đổi về cấu trúc tinh thể. Kết quả chỉ ra rằng, hoàn toàn có thể điều khiển được tính dị hướng vuông góc dựa trên việc điều khiển chiều dày lớp Pd.



Hình 8. (a) Đường cong từ hóa của màng mỏng $[\text{Co/Pd}(t_{Pd})]$ hệ mẫu 3 theo phương vuông góc với mặt phẳng màng với t_{Pd} thay đổi từ 0,6 đến 2,0 nm và (b) Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của lực kháng từ H_c vào chiều dày lớp Pd.

4. KẾT LUẬN

Các mẫu màng đa lớp $[\text{Co}(t_{Co})/\text{Pd}(t_{Pd})]_N$ ($t_{Co} = 0,3 - 1$ nm, $t_{Pd} = 0,6 - 2,0$ nm và $N = 1 - 10$) đã được chế tạo thành công bằng phương pháp phún xạ DC magnetron. Các mẫu chế tạo được đều có dị hướng từ vuông góc cao. Kết quả cho thấy mẫu được chọn là mẫu đại diện $[\text{Co}(0,5 \text{ nm})/\text{Pd}(1,0 \text{ nm})]_5$ có dị hướng từ cao nhất với $K_U \sim 6,5 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$, $H_C \sim 750 \text{ Oe}$ và $M_S \sim 385 \text{ emu/cm}^3$. Trong **hệ mẫu 1** $[\text{Co/Pd}]_N$, hằng số dị hướng K_U , lực kháng từ H_C và từ độ M_S tăng khi số lớp N tăng từ 1 đến 5, và sau đó giảm khi N tiếp tục tăng. Trong **hệ mẫu 2** $[\text{Co}(t_{Co})/\text{Pd}]_5$, khi chiều dày lớp Co t_{Co} tăng từ 0,3 - 1,0 nm, giá trị H_C giảm. Việc suy giảm tính dị hướng theo phương vuông góc này có thể là do dị hướng từ tinh thể tăng khi chiều dày lớp Co tăng. Trong khi đó, trong **hệ mẫu 3** $[\text{Co/Pd}(t_{Pd})]_5$, khi chiều dày lớp Pd mỏng ($t_{Pd} \leq 1,2$ nm), H_C tăng khi t_{Pd} tăng, và sau đó H_C giảm khi lớp Pd tiếp tục tăng ($t_{Pd} \geq 1,5$ nm). Dị hướng từ trong mẫu thay đổi như vậy có thể là do tương tác trao đổi sắt từ giữa các lớp Co yếu hơn khi chiều dày lớp Pd tăng. Kết quả nghiên cứu chứng tỏ rằng, dị hướng từ vuông góc trong các mẫu đa lớp loại này có thể điều khiển được một cách linh hoạt thông qua sự thay đổi các thông số cấu trúc như: i) số lớp N , ii) chiều dày của lớp Co (t_{Co}) và iii) chiều dày của lớp Pd (t_{Pd}). Khả năng điều biến dị hướng từ vuông góc trong các cấu trúc loại này mở ra các khả năng ứng dụng to lớn trong việc thiết kế, chế tạo các linh kiện Spintronics thế hệ mới như các thiết bị ghi từ mật độ cao, máy phát cao tần, cảm biến từ sinh học.

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 thực hiện năm 2019-2020 thuộc Chương trình phát triển Vật lý đến năm 2020, mã số KHCTVL.03/19-20.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Buschow K.H.J, de Boer F.R., “*Physics of Magnetism and Magnetic Materials*”, Kluwer Academic/Plenum Publishers (2004), ISBN 0-306-48408-0.
- [2]. S. Iwasaki, “*A study for the future of the magnetic recording: the possibility of the perpendicular magnetic recording*”, J. Magn. Soc. Jpn., **Vol. 1** (1977), pp. 5–11.
- [3]. B. Tudu, A. Tiwari, “*Recent Developments in Perpendicular Magnetic Anisotropy Thin Films for Data Storage Applications*”, Vacuum, **Vol. 146** (2017), pp. 329–341.
- [4]. R. Sbiaa, H. Meng, S.N. Piramanayagam, “*Materials with perpendicular magnetic anisotropy for magnetic random access memory*”, Phys. Status Solidi RRL-Rapid Res. Lett., **Vol. 5**, No. 12 (2011), pp. 413–419.
- [5]. S. Maat, K. Takano, S.S.P. Parkin, and E.E. Fullerton, “*Perpendicular Exchange Bias of Co/Pt Multilayers*”, Phys. Rev. Lett., **Vol. 87**, No. 8 (2001), pp. 087202.
- [6]. 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., **Vol. 235**, No.1-3 (2001), pp. 82-86.
- [7]. 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., **Vol. 6** (2016), pp. 21324.
- [8]. Davydenko, A. V. et al. “*Dzyaloshinskii-Moriya interaction in symmetric epitaxial [Co/Pd(111)]_N superlattices with different numbers of Co/Pd bilayers*”, Phys. Rev. B, **Vol. 99** (2019), pp. 014433
- [9]. Okabayashi J, Miura Y, Munekata H, “*Anatomy of interfacial spin-orbit coupling in Co/Pd multilayers using X-ray magnetic circular dichroism and first-principles calculations*”, Scientific Reports, Vol. 8, No. 1 (2018), pp. 8303
- [10]. W.C. Law, T.L. Jin, X.T. Zhu, R.R. Nistala, N. Thiyagarajah, C.S. Seet, W.S. Lew, “*Perpendicular magnetic anisotropy in Co/Pt multilayers induced by hcp-Hoat 400 °C*”, J. Magn. Magn. Mater., Vol. 477 (2019), pp. 124-130
- [11]. 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., **Vol. 91**, No. 24 (2007), pp. 242504.
- [12]. 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., **Vol. 46**, No. 6 (2010), pp. 1933.
- [13]. H. Nemoto, H. Nakagawa, Y. Hosoe, “*Dependence of Co/Pd Superlattice Properties on Pd Layer Thickness*”, IEEE Trans. Magn., **Vol. 39**, No. 5 (2003), pp. 2714-2716.
- [14]. 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., **Vol. 4** (2014), pp. 4844.
- [15]. M. Albert, M. Franchin, T. Fischbacher, G. Meier, H. Fangohr, “*Domain wall motion in perpendicular anisotropy nanowires with edge roughness*”, J. Phys.: Condens. Matter., **Vol. 24**, No. 2 (2012), pp. 024219.
- [16]. M.Y. Im, L. Bocklage, P. Fischer, G. Meier, “*Direct observation of stochastic domain-wall depinning in magnetic nanowires*”, Phys. Rev. Lett., **Vol. 102**, No. 14 (2009), pp. 147204.
- [17]. 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., **Vol. 59**, No. 11 (1996), pp. 1409.

- [18]. C. W. Barton, T. J. A. Slater, R. M. Rowan-Robinson, S. J. Haigh, D. Atkinson, and T. Thomson, “*Precise control of interface anisotropy during deposition of Co/Pd multilayers*”, J. Appl. Phys., **Vol. 116**, No. 20 (2014), 203903.
- [19]. 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., **Vol. 96**, No. 21 (2010), pp. 212503.
- [20]. 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., **Vol. 350** (2014), pp. 42-46.
- [21]. 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] multilayer matrix upon annealing*”, Sci. Rep., **Vol. 6** (2016), pp. 37503.
- [22]. 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., Vol. 98, **No. 17** (2011), pp. 172502.
- [23]. O. Hellwig, T. Hauet, T. Thomson, E. Dobisz, J.D. RisnerJamtgaard, D. Yaney, B.D. Terris, and E.E. Fullerton, “*Coercivity tuning in Co/Pd multilayer based bit patterned media*”, Appl. Phys. Lett., **Vol. 95**, No. 23 (2009), pp. 232505.
- [24]. 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]₃/NiFe multilayers*”, Phys. Rev. B, **Vol. 91** (2015), pp. 014407.

ABSTRACT

TAILORING PERPENDICULAR MAGNETIC ANISOTROPY IN [Co/Pd] MULTILAYERS

[Co/Pd] multilayers with strong magnetic anisotropy have gained huge interest due to their potential applications in high-density magnetic recording media. In this study, we have been investigated systematically the dependence of the perpendicular magnetic anisotropy of [Co(t_{Co})/Pd(t_{Pd})]_N multilayers on the structural parameters such as the multilayer repetition number (N), thickness of Co layer (t_{Co}) and thickness of Pd layer (t_{Pd}). The correlation between structural and magnetic properties such as coercivity (H_C), the saturation magnetization (M_S) as well as the magnetic anisotropy constant (K_U) in these multilayers has been discussed in detail.

Keywords: Co/Pd multilayers; Magnetic multilayers; Perpendicular magnetic anisotropy.

Nhận bài ngày 01 tháng 11 năm 2019

Hoàn thiện ngày 26 tháng 12 năm 2019

Chấp nhận đăng ngày 10 tháng 4 năm 2020

Địa chỉ: ¹Khoa Vật lý, Đại học Sư phạm Hà Nội;

²Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam;

³Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

*Email: ngocanhnt.vn@gmail.com.