

Cấu trúc và tính chất từ trong các màng đa lớp nano antidots [Co/Pd] với dị hướng từ vuông góc

Giáp Văn Cường¹, Chử Văn Thành^{2, 3}, Đỗ Khánh Tùng², Nguyễn Thanh Hùng²,
Đỗ Hùng Mạnh², Trần Đăng Thành², Nguyễn Thị Ngọc Anh^{2,4*}

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên;

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

³Viện Đào tạo Quốc tế về Khoa học Vật liệu/Đại học Bách khoa Hà Nội;

⁴Học viện Khoa học và Công nghệ/Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

*Email: ngocanhnt.vn@gmail.com

Nhận bài: 18/6/2022; Hoàn thiện: 25/8/2022; Chấp nhận đăng 12/12/2022; Xuất bản: 28/12/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.84.2022.119-126>

TÓM TẮT

Các màng đa lớp [Co/Pd] có cấu trúc antidots phun xạ trên các đế xốp nano Al₂O₃ và TiO₂ với kích thước lỗ xốp 30 nm và 50 nm được chế tạo bằng phương pháp phun xạ DC magnetron. Ảnh hưởng của hình thái bề mặt lên đặc trưng cấu trúc và tính chất từ trong các màng đa lớp đã chế tạo được khảo sát một cách kỹ lưỡng. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, tương tự như trong các màng phẳng [Co/Pd], các màng xốp cũng có dị hướng từ vuông góc lớn ở nhiệt độ phòng. Tuy nhiên, lực kháng từ H_C trong các màng xốp có sự tăng cường đáng kể so với các màng phẳng, H_C lớn nhất đạt được là 2220 Oe với mẫu màng xốp TiO₂-[Co/Pd], lần lượt cao gấp 1,28 và 3,15 lần so với màng Al₂O₃-[Co/Pd] và màng phẳng SiO₂-[Co/Pd], là do sự hình thành pha từ mềm tại gờ các lỗ xốp. Có thể nói tính chất từ trong các màng xốp hoàn toàn có thể được điều biến thông qua việc điều chỉnh các thông số cấu trúc của đế xốp như kích thước lỗ xốp và độ nhám bề mặt.

Từ khóa: Trao đổi dịch; Màng đa lớp nano antidots; Dị hướng từ vuông góc; Tương tác trao đổi sắt từ; Tương tác trao đổi sắt từ/phân sắt từ.

1. MỞ ĐẦU

Màng mỏng từ đơn và đa lớp có dị hướng từ vuông góc thu hút được sự quan tâm nghiên cứu bởi khả năng ứng dụng cho ghi từ vuông góc mật độ cao [1, 2]. So với quá trình chế tạo các vật liệu có dị hướng từ vuông góc dạng hợp kim như CoPt, FePt, CoPd,... quy trình chế tạo các vật liệu dạng màng mỏng đa lớp như Co/Pt, Co/Pd, Co/Ni đơn giản hơn do không cần lắng đọng màng ở nhiệt độ cao hay ủ nhiệt sau quá trình lắng đọng màng (nhiệt độ đế và nhiệt độ ủ thường lớn hơn 500 °C) [3, 4]. Hầu hết các nghiên cứu về màng đa lớp trước đây thường được thực hiện trên các màng phẳng [5, 6]. Gần đây, cùng với sự phát triển của công nghệ nano, các vật liệu từ dạng màng mỏng có cấu trúc nano bắt đầu được quan tâm nhờ các tính chất đặc biệt của chúng vốn không tồn tại ở vật liệu khối, cũng như khả năng tạo ra các linh kiện điện tử thế hệ mới với những tính năng được cải thiện so với các thế hệ vật liệu trước đó [7, 8]. Một số nghiên cứu trên các màng mỏng đa lớp có dị hướng từ vuông góc lớn có cấu trúc nano thấp chiều (như dây nano, chấm nano (nano-dot) hoặc phân chấm nano (nano-antidot)) được cho thấy có sự tăng cường dị hướng từ theo phương vuông góc so với các màng mỏng liên tục [9], nhờ đó giúp tăng cường độ ổn định từ tính của vật liệu, giảm kích thước bit từ, tăng mật độ lưu trữ thông tin. Một số nghiên cứu gần đây thực hiện trên các màng nano có cấu trúc nano-antidots (hay còn gọi là màng xốp nano) cho thấy cấu trúc antidots không chỉ giúp tăng cường dị hướng từ vuông góc mà còn giúp vượt qua được giới hạn siêu thuận từ [10, 11]. Để chế tạo các màng mỏng từ có cấu trúc nano-antidots, người ta thường sử dụng các kỹ thuật khắc nano (như nanosphere lithography, photolithography, e-beam lithography,...) thường có chi phí khá cao, kích thước mẫu nhỏ, thời gian khắc dài [12, 13]. Việc sử dụng các đế xốp nano như Al₂O₃ và TiO₂ được coi là giải pháp

thay thế hiệu quả do quy trình tạo mẫu đơn giản, chi phí thấp, diện tích mẫu lớn ($> 1 \text{ cm}^2$), phù hợp với các ứng dụng thực tế [14, 15]. Do đó, mục tiêu của bài báo là nghiên cứu ảnh hưởng của cấu trúc nano xếp lên tính chất từ (lực kháng từ H_C , độ vuông $S = M_R/M_S, \dots$) theo phương vuông góc trong các màng đa lớp nano-antidots [Co/Pd] phun xạ trên đế xếp Al_2O_3 và TiO_2 nhằm hướng đến các ứng dụng ghi từ vuông góc mật độ cao.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

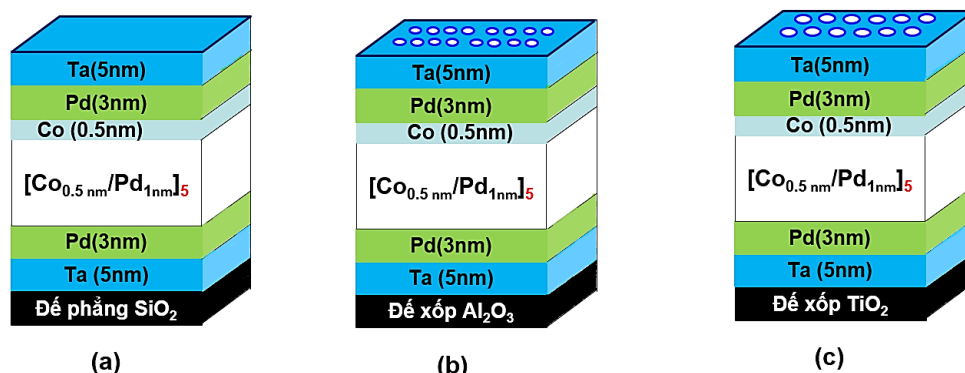
2.1. Chế tạo màng mỏng xếp có cấu trúc nano-antidots

2.1.1. Chế tạo đế xếp

Đế xếp nano Al_2O_3 và TiO_2 được chế tạo bằng phương pháp anốt hóa hai bước, bề mặt màng xếp được làm phẳng bằng phương pháp ăn mòn plasma với khí Argon trong thời gian 60 phút như đã trình bày trong các nghiên cứu trước đó của nhóm [16, 17].

2.1.2. Chế tạo màng mỏng đa lớp

Màng mỏng đa lớp Ta 5 nm/Pd 3 nm/[Co_{0,5} nm/Pd₁ nm]₅/Co_{0,5} nm/Pd 3 nm/Ta 5 nm dạng phẳng được lắng đọng lên trên đế phẳng đơn tinh thể Si(100) loại p pha tạp Bo có phủ lớp oxit SiO_2 dày 3000 Å (Si/SiO₂) (gọi là màng đối chứng, ký hiệu $\text{SiO}_2\text{-[Co/Pd]}$), hình 1(a) và dạng xếp nano được lắng đọng trên các đế xếp Al_2O_3 và TiO_2 với kích thước lỗ xếp lần lượt vào khoảng 30 nm và 50 nm (gọi là màng xếp, ký hiệu lần lượt là $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-[Co/Pd]}$ và $\text{TiO}_2\text{-[Co/Pd]}$), hình 1(b) và 1(c)) bằng phương pháp phun xạ DC magnetron trên hệ phun xạ AJA ATC ORION với áp suất cơ sở thấp ($\sim 3 \times 10^{-8}$ Torr), áp suất khí Argon được duy trì trong suốt quá trình phun xạ ở mức 5 mTorr cho lớp Co, Pd và 2,5 mTorr cho lớp Ta.



Hình 1. Mô hình 3D của các màng mỏng đa lớp:
(a) $\text{SiO}_2\text{-[Co/Pd]}$; (b) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-[Co/Pd]}$; (c) $\text{TiO}_2\text{-[Co/Pd]}$.

Công suất phun xạ trong khoảng 37,5 - 150 W tương ứng với tốc độ phun xạ trong khoảng 0,18-0,73 nm/s cho các lớp vật liệu như chỉ ra trong bảng 1. Khoảng cách giữa bia và đế trong quá trình phun xạ được lựa chọn ở chế độ phun xạ gần, 50 mm, để đảm bảo đế phun xạ nằm trong vùng plasma, nhằm đảm bảo độ đồng nhất cũng như chất lượng của màng.

Các thông số phun xạ, thông số cấu trúc của màng đa lớp như chiều dày các lớp, số lớp, lớp đệm Ta/Pd hay lớp phủ Pd/Ta được lựa chọn dựa trên các khảo sát trước đó [18]. Các mẫu đều được lắng đọng ở nhiệt độ phòng.

Bảng 1. Thông số phun xạ được sử dụng cho các vật liệu.

Bia vật liệu	Công suất phun xạ (W)	Áp suất phun xạ (mTorr)	Tốc độ phun xạ (Å/sec)
Ta	150	2,5	0,73
Co	37,5	5	0,18
Pd	37,5	5	0,32

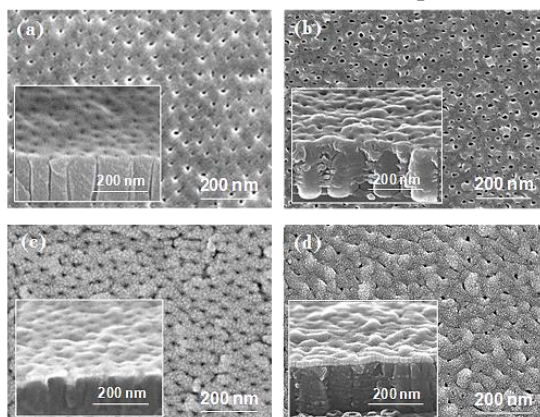
2.2. Các phép khảo sát, phân tích

Sau khi lắng đọng, các mẫu được từ hóa trong từ trường vuông góc với mặt phẳng mẫu bằng hệ đo các tính chất vật lý (Quantum Design PPMS® VersaLab™) tại Viện Khoa học vật liệu với từ trường lớn nhất đạt ± 3 T. Hình thái bề mặt của các mẫu được kiểm tra bằng phương pháp chụp ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) trên hệ Hitachi S-4800 FE-SEM) tại Viện Khoa học vật liệu, phương pháp hiển vi lực nguyên tử (AFM) trên hệ Solver P47-PRO (NT-MDT Spectrum Instruments) sử dụng đầu dò cacbon siêu nhọn NSG01_DLC với bán kính đầu dò cỡ 1 nm tại Đại học Tổng hợp Quốc gia Belarus. Tất cả các phép đo được tiến hành ở nhiệt độ phòng.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc trưng hình thái cấu trúc của màng đế xốp và màng xốp đa lớp [Co/Pd]

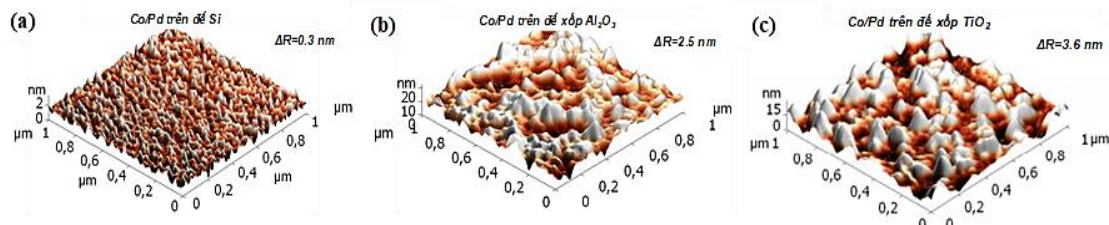
Hình thái học bề mặt của màng đế xốp nano Al_2O_3 và TiO_2 và các màng xốp đa lớp từ tính Al_2O_3 -[Co/Pd] và TiO_2 -[Co/Pd] được thể hiện qua ảnh SEM lần lượt trên hình 2(a), 2(b), 2(c) và 2(d). Kết quả chụp SEM cho thấy màng đế xốp Al_2O_3 với các lỗ xốp được phân bố khá đồng đều trên toàn bộ bề mặt mẫu, đường kính trung bình vào khoảng 30 nm, bề mặt màng xốp Al_2O_3 tương đối phẳng (hình 2(a)). Trong khi đó, màng xốp TiO_2 với các lỗ xốp có đường kính trung bình lớn hơn (vào khoảng 50 nm), sự phân bố của lỗ xốp không đều, ngoài ra độ nhám bề mặt cao hơn so với màng đế xốp Al_2O_3 (hình 2(b)). Hình chèn trong của các hình 2(a) và 2(b) cho thấy rõ bề mặt đế xốp TiO_2 có độ nhám cao hơn so với đế xốp Al_2O_3 .



Hình 2. Ảnh SEM của màng đế xốp (a) Al_2O_3 , (b) TiO_2 chế tạo bằng phương pháp anốt hóa hai bước và màng đa lớp [Co/Pd] phun xạ lần lượt trên đế xốp (c) Al_2O_3 và (d) TiO_2 bằng phun xạ DC magnetron chụp ở góc nghiêng 90° so với bề mặt mẫu. Hình chèn phía trong là ảnh chụp ở góc nghiêng 45° so với bề mặt mẫu.

So với hình ảnh chụp bề mặt của đế xốp Al_2O_3 , hình chụp bề mặt của màng xốp Al_2O_3 -[Co/Pd] được thể hiện trên hình 2(c) cho thấy rằng màng Al_2O_3 -[Co/Pd] phun xạ lên đế Al_2O_3 cũng có cấu trúc xốp, các lỗ xốp có dạng tròn và sắp xếp khá đều tương tự như của màng đế xốp Al_2O_3 , tuy vậy đường kính của các lỗ xốp nhỏ hơn so với của màng đế xốp. Kích thước trung bình của lỗ xốp của màng xốp Al_2O_3 -[Co/Pd] vào khoảng 20 nm, được phân bố khá đều, bề mặt màng khá phẳng (hình 2(c)). Nguyên nhân kích thước lỗ xốp của màng đa lớp Al_2O_3 -[Co/Pd] giảm so với kích thước lỗ xốp của đế xốp Al_2O_3 là do trong quá trình phun xạ màng [Co/Pd] phủ chòem lên gờ các lỗ xốp. Hình 2(d) là ảnh SEM của màng xốp [Co/Pd] được phun xạ trên đế xốp TiO_2 . Ảnh SEM chụp ở góc 90° so với mặt phẳng mẫu ở hình 2(b) cho thấy các lỗ xốp của màng xốp TiO_2 có đường kính trung bình khoảng 50 nm, trong khi đó kích thước lỗ xốp của màng xốp [Co/Pd] nhỏ hơn đáng kể ($\sim 30 \div 35$ nm). Khi quan sát ảnh chụp dưới góc nghiêng 45° (hình chèn trong) ta cũng thấy rõ sự không bằng phẳng của màng xốp TiO_2 -[Co/Pd] so với màng xốp Al_2O_3 -[Co/Pd].

Để xác định một cách định lượng độ nhám bề mặt của các màng đa lớp [Co/Pd] phún xạ lên trên các đế phẳng, đế xốp Al_2O_3 và TiO_2 , bề mặt các mẫu màng SiO_2 -[Co/Pd], Al_2O_3 -[Co/Pd] và TiO_2 -[Co/Pd] được tiến hành chụp ảnh hiển vi lực nguyên tử (AFM) (hình 3).



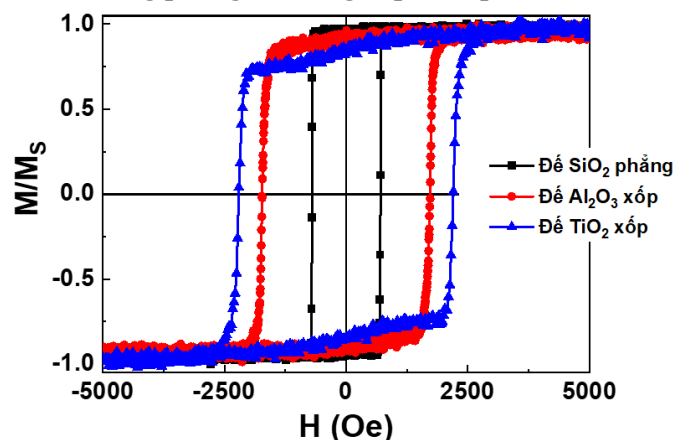
Hình 3. Ảnh AFM của (a) màng liên tục SiO_2 -[Co/Pd], (b) màng xốp Al_2O_3 -[Co/Pd], (c) màng xốp TiO_2 -[Co/Pd]. ΔR là giá trị độ nhám bề mặt trung bình.

Bảng 2. Độ nhám bề mặt của các màng xốp.

Tên mẫu	Đặc điểm đế	Độ nhám bề mặt (nm)
SiO_2 -[Co/Pd]	Đế SiO_2 phẳng	0,3
Al_2O_3 -[Co/Pd]	Đế xốp Al_2O_3 với đường kính lỗ xốp ~ 30 nm	2,5
TiO_2 -[Co/Pd]	Đế xốp TiO_2 với đường kính lỗ xốp ~ 50 nm	3,6

Kết quả đo AFM cho giá trị độ nhám bề mặt của màng phẳng SiO_2 -[Co/Pd] và các màng xốp Al_2O_3 -[Co/Pd], TiO_2 -[Co/Pd] lần lượt vào khoảng 0,3 nm, 2,5 nm và 3,6 nm được tổng hợp trong bảng 2. Kết quả này phù hợp với kết quả thu được từ ảnh SEM. Sự ảnh hưởng của hình thái bề mặt (độ nhám, kích thước lỗ xốp) lên tính chất từ của cả hệ sẽ được khảo sát trong phần tiếp theo.

3.2. Đặc trưng từ tính của màng phẳng và màng xốp đa lớp [Co/Pd]



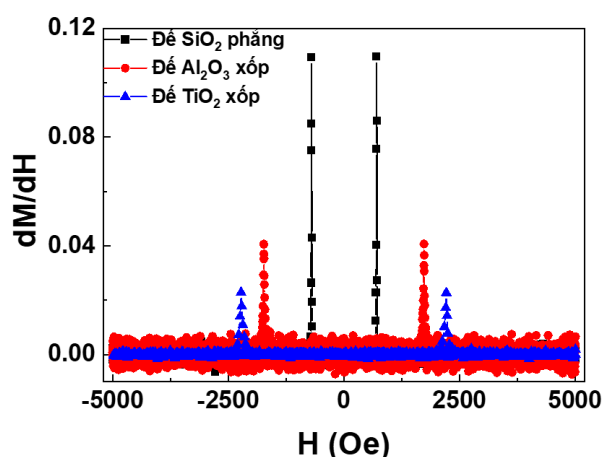
Hình 4. Đường cong từ hóa theo phương vuông góc của của màng đa lớp SiO_2 -[Co/Pd] (hình vuông màu đen), màng xốp Al_2O_3 -[Co/Pd] (hình tròn màu đỏ) và màng xốp TiO_2 -[Co/Pd] (hình tam giác màu xanh).

Hình 4 biểu diễn đường cong từ hóa của màng phẳng SiO_2 -[Co/Pd] và các màng xốp Al_2O_3 -[Co/Pd], TiO_2 -[Co/Pd] đo theo phương vuông góc với mặt phẳng mẫu với từ trường đặt vào lên tới 14 kOe. Kết quả đo VSM cho thấy đường cong từ hóa theo phương vuông góc của mẫu màng liên tục SiO_2 -[Co/Pd] có dạng rất vuông, độ vuông (squareness ratio) $S = M_R/M_S \sim 1$, lực kháng từ theo phương vuông góc $H_C = 702$ Oe, thể hiện tính dị hướng theo phương vuông góc cao ở nhiệt độ phòng, quá trình đảo từ xảy ra đột ngột. Có thể nói cơ chế đảo từ trong màng mỏng loại này chủ yếu là cơ chế quay đô-men trong khi sự đóng góp của cơ chế dịch chuyển vách đô-men là không đáng kể. Kết quả này phù hợp với một số nghiên cứu trước đây về dị hướng từ vuông góc cao trong màng [Co/Pd] [19].

Bảng 3. Giá trị lực kháng từ H_C , tỷ số M_R/M_S của các màng đa lớp [Co/Pd] lắng đọng trên đế phẳng SiO_2 và trên các đế xốp Al_2O_3 và TiO_2 .

Tên mẫu	Đặc điểm đế	H_C (Oe)	M_R/M_S
SiO_2 -[Co/Pd]	Đế SiO_2 phẳng	702	0,98
Al_2O_3 -[Co/Pd]	Đế xốp Al_2O_3 với đường kính lỗ xốp ~ 30 nm	1732	0,93
TiO_2 -[Co/Pd]	Đế xốp TiO_2 với đường kính lỗ xốp ~ 50 nm	2220	0,85

Trong khi đó, đường cong từ hóa theo phương vuông góc của các mẫu màng xốp Al_2O_3 -[Co/Pd] và TiO_2 -[Co/Pd] đều cho thấy dị hướng theo phương vuông góc được tăng cường một cách rõ rệt, thể hiện ở sự gia tăng đáng kể của giá trị H_C trong các màng xốp so với màng phẳng. H_C của màng xốp Al_2O_3 -[Co/Pd] có giá trị bằng 1732 Oe và của màng xốp TiO_2 -[Co/Pd] có giá trị bằng $H_C = 2220$ Oe cao gấp khoảng 2,5 và 3,2 lần so với màng phẳng SiO_2 -[Co/Pd] thể hiện trong bảng 3.



Hình 5. Đường đạo hàm dM/dH theo hàm của từ trường ngoài H của màng phẳng SiO_2 -[Co/Pd] (đường màu đen) và các màng xốp Al_2O_3 -[Co/Pd] (đường màu đỏ), TiO_2 -[Co/Pd] (đường màu xanh).

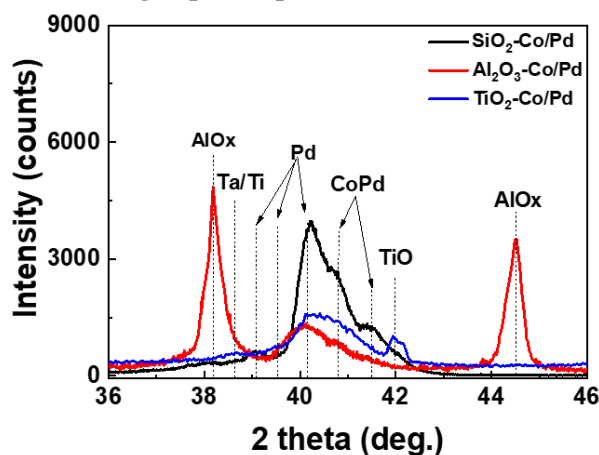
Số liệu thực nghiệm trong bảng 3 cho thấy rằng độ vuông của đường từ hóa của các màng xốp có sự giảm nhẹ so với độ vuông của màng phẳng, độ vuông của đường từ hóa trong hai màng xốp Al_2O_3 -[Co/Pd] và TiO_2 -[Co/Pd] lần lượt là 0,93 và 0,85. Nguyên nhân độ vuông của đường từ hóa giảm là do trong các màng xốp có sự hình thành các pha từ mềm tại gờ các lỗ xốp với các mô-men từ sắp xếp không trật tự trong khi hướng của các mô-men từ trong phần phẳng của mẫu có phương vuông góc với mặt phẳng mẫu, vì vậy các các lỗ xốp đóng vai trò như các điểm ghim từ trong quá trình từ hóa mẫu [16], khiến cho các mẫu xốp bị “cứng” hơn so với mẫu màng phẳng. Tương tác giữa hai pha từ cứng-từ mềm (tương tác trao đổi đàn hồi cứng/mềm) dẫn đến sự tăng cường H_C [20], quá trình đảo từ khi đó không chỉ có cơ chế quay mà còn có cả cơ chế dịch chuyển các vách đô-men tại các điểm ghim từ.

Giá trị H_C của màng xốp TiO_2 -[Co/Pd] lớn hơn, độ vuông của đường cong từ hóa của màng TiO_2 -[Co/Pd] nhỏ hơn so với màng Al_2O_3 -[Co/Pd] có thể được giải thích là do thành phần pha từ mềm trong màng TiO_2 -[Co/Pd] lớn hơn vì kích thước lỗ xốp và độ nhám bề mặt của đế TiO_2 lớn hơn so với đế Al_2O_3 , dẫn đến sự kém đồng nhất về mô-men từ trong mẫu màng TiO_2 -[Co/Pd].

Hình 5 là đường đạo hàm dM/dH , xác định bằng phép lấy vi phân đường từ hóa theo từ trường ngoài, của màng phẳng SiO_2 -[Co/Pd] và các màng xốp Al_2O_3 -[Co/Pd], TiO_2 -[Co/Pd] cho thấy rõ sự tăng cường của giá trị H_C trong các màng xốp so với màng phẳng (sự dịch vị trí đỉnh peak về phía từ trường cao trong các màng xốp). Trong màng phẳng SiO_2 -[Co/Pd], peak nhọn và cao, thể hiện quá trình đảo từ đột ngột, sự đóng góp của cơ chế quay đô-men là chủ yếu. Trong

các màng xốp, có thể thấy rõ ràng là độ lớn của peak giảm, độ rộng của peak tăng do ảnh hưởng của pha từ mềm trong quá trình đảo từ, nói cách khác là do ảnh hưởng của cơ chế dịch chuyển vách đô-men trong các màng xốp khiến quá trình đảo từ không xảy ra đột ngột mà diễn ra từ từ.

3.3. Đặc trưng cấu trúc của màng xốp đa lớp [Co/Pd]



Hình 6. Giản đồ nhiễu xạ tia X của màng liên tục $\text{SiO}_2\text{-[Co/Pd]}$ (đường màu đen), màng xốp $\text{TiO}_2\text{-[Co/Pd]}$ (đường màu đỏ) và màng xốp $\text{TiO}_2\text{-[Co/Pd]}$ (đường màu xanh).

Phổ nhiễu xạ tia X của màng phẳng đa lớp $\text{SiO}_2\text{-[Co/Pd]}$ và các màng xốp $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-[Co/Pd]}$, $\text{TiO}_2\text{-[Co/Pd]}$ cho thấy có sự chồng chập các đỉnh nhiễu xạ trong khoảng góc $2\theta = 40 \div 42^\circ$, được thể hiện trên hình 6. Các đỉnh nhiễu xạ chính từ của các màng đa lớp nằm trong khoảng góc nhiễu xạ 2θ giữa 38° và 43° . Phổ nhiễu xạ tia X trên mẫu màng phẳng $\text{SiO}_2\text{-[Co/Pd]}$ và các màng xốp $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-[Co/Pd]}$, $\text{TiO}_2\text{-[Co/Pd]}$ đều chỉ ra sự tồn tại của ba đỉnh nhiễu xạ Pd (111) ở góc $2\theta = 39,1^\circ$, $39,6^\circ$ và $40,26^\circ$ được cho là do sự thay đổi hằng số mạng của các pha Pd-fcc trong lớp đệm, lớp phủ và lớp xen giữa các lớp Co trong màng đa lớp Co/Pd. Sự thay đổi hằng số mạng của Pd trong các lớp khác nhau được cho là do các lớp được phún xạ trên các vật liệu khác nhau sẽ chịu các ứng suất khác nhau [20]. Cấu trúc fcc của Pd (111) giúp tăng cường định hướng (111) cho màng Co/Pd, vốn cần thiết để đạt được dị hướng từ theo phương vuông góc cao trong màng đa lớp [Co/Pd]. Gần các đỉnh nhiễu xạ Pd (111) tồn tại hai đỉnh nhiễu xạ Co/Pd (111) có cường độ nhiễu xạ mạnh ở khoảng $2\theta = 40,8^\circ$. Ngoài ra, trong các mẫu còn có thêm đỉnh nhiễu xạ của Co/Pd tại vị trí góc 2θ khoảng $41,49^\circ$, được cho là do sự hình thành pha hợp kim của Co và Pd tại mặt phân cách giữa các lớp và tại gờ các lỗ xốp. Co (111) tinh khiết được biết có đỉnh nhiễu xạ khoảng $44,4^\circ$ và Pd (111) tinh khiết có đỉnh nhiễu xạ khoảng $40,2^\circ$ nên vị trí Co/Pd (111) có các đỉnh nhiễu xạ nằm trong khoảng giữa hai đỉnh này là hoàn toàn phù hợp. Hướng (111) của Co/Pd cũng là hướng thể hiện tính dị hướng từ vuông góc cao nhất so với các hướng khác và thường được thể hiện mạnh khi được mọc trên lớp đệm Ta/Pd [21]. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với kết quả đo VSM, cho thấy các mẫu đều có dị hướng từ vuông góc cao ở nhiệt độ phòng. Phổ nhiễu xạ của mẫu xốp $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-[Co/Pd]}$ xuất hiện hai đỉnh nhiễu xạ mạnh, đặc trưng của đế xốp Al_2O_3 tại vị trí $2\theta = 38,1^\circ$ và $44,5^\circ$ [22]. Phổ nhiễu xạ của mẫu xốp $\text{TiO}_2\text{-[Co/Pd]}$ xuất hiện một đỉnh hẹp của TiO của đế xốp với đỉnh nhiễu xạ nằm tại vị trí $2\theta = 42^\circ$ [14, 23].

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu hình thái bề mặt, đặc trưng cấu trúc và tính chất từ của các màng mỏng đa lớp [Co/Pd] phún xạ trên đế phẳng SiO_2 và các màng nano-antidots [Co/Pd] phún xạ trên các đế xốp Al_2O_3 và TiO_2 với kích thước lỗ xốp và độ nhám bề mặt khác nhau. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng các màng Co/Pd đều có tính dị hướng từ theo phương vuông góc cao ở nhiệt độ phòng. H_C trong các màng xốp được tăng cường đáng kể so với màng phẳng, H_C của màng xốp

Al₂O₃-[Co/Pd] và màng TiO₂-[Co/Pd] lần lượt là 1732 Oe và 2220 Oe, cao gấp 2,5 và 3,2 lần so với màng phẳng SiO₂-[Co/Pd], nguyên nhân là do sự ảnh hưởng của thành phần pha từ mềm hình thành tại gờ các lỗ xốp. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng các tính chất từ như dị hướng, trường khử từ, độ vuông M_R/M_S hoàn toàn có thể dễ dàng điều khiển được trong các màng đa lớp [Co/Pd] có cấu trúc nano-antidots bằng cách thay đổi hình thái học của cấu trúc xốp như độ nhám, kích thước lỗ xốp. Các cấu trúc từ kích thước nano dạng antidot có dị hướng từ vuông góc cao ở nhiệt độ phòng, có tính chất từ có thể điều biến được sẽ giúp phát triển các thế hệ linh kiện từ và Spintronics thế hệ mới có mật độ cao và siêu cao.

Lời cảm ơn: Công trình này được thực hiện với sự hỗ trợ về kinh phí thông qua đề tài Khoa học Công nghệ tại Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam thuộc Chương trình phát triển nhóm nghiên cứu xuất sắc, mã số NCXS01.04/22-24.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Futamoto, M. and M. Ohtake, “Development of Media Nanostructure for Perpendicular Magnetic Recording”, Journal of the Magnetics Society of Japan. 41(6): pp. 108-126, 2017.
- [2]. S. Iwasaki, “Perpendicular magnetic recording”, IEEE Transactions on Magnetics. Volume: 16, Issue: 1, (1980).
- [3]. Z. L. Zhao, “Fabrication and microstructure of high coercivity FePt thin films at 400 °C”, Appl. Phys. Lett. 88, 052503 (2006).
- [4]. Jung H. Kim, Jeon Kim, Nuri Oh, Young-Ho Kim, Chang Kyung Kim, and Chong Seung Yoona, “Monolayer CoPt magnetic nanoparticle array using multiple thin film depositions”, Appl. Phys. Lett. 90, 023117 (2007).
- [5]. T. Thomson, G. Hu, and B. D. Terris, “Intrinsic Distribution of Magnetic Anisotropy in Thin Films Probed by Patterned Nanostructures”, Phys. Rev. Lett. 96, 257204, (2006).
- [6]. Hao Su, Anusha Natarajarathinam and Subhadra Gupta, “Nanorods of Co/Pd multilayers fabricated by glancing angle deposition for advanced media”, Journal of Applied Physics 113, 203901 (2013).
- [7]. Thân Đức Hiền, Lưu Tuấn Tài, “Từ học và vật liệu từ”, Nhà xuất bản Bách khoa Hà Nội, (2008).
- [8]. Nguyễn Hữu Định, “Vật liệu từ cấu trúc Nanô và điện từ Spin”, Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Hà Nội, (2008).
- [9]. S. Hashimoto, Y. Ochiai, and K. Aso, “Perpendicular magnetic anisotropy and magnetostriction of sputtered Co/Pd and Co/Pt multilayered films”, Journal of Applied Physics 66, 4909 (1989).
- [10]. Marcin Perzanowski, Marta Marszalek, Arkadiusz Zarzycki, Michal Krupinski, Andrzej Dzedzic and Yevhen Zabyla, “Influence of Superparamagnetism on Exchange Anisotropy at CoO/[Co/Pd] Interfaces”, ACS Appl. Mater. Interfaces, 8, 41, pp. 28159–28165, (2016).
- [11]. S. Pal, J. W. Klos, K. Das, O. Hellwig, P. Gruszecki, M. Krawczyk and A. Barman, “Optically induced spin wave dynamics in [Co/Pd]₈ antidot lattices with perpendicular magnetic anisotropy”, Appl. Phys. Lett. 105, 162408 (2014).
- [12]. Paola Tiberto, Luca Boarinoa, Federica Celegato, Gabriele Barrera, Natascia De Leo, Marco Coissona, Franco Vinaia and Paolo Alliaab, “Arrays of nanostructured antidot in Ni80Fe20 magnetic thin films by photolithography of polystyrene nanospheres”, Applied Surface Science Volume 259, pp. 44-48, (2012).
- [13]. Paola Tiberto, Luca Boarino, Federica Celegato, Gabriele Barrera, Marco Coisson, Natascia De Leo and Franco Vinai, “Large-area patterned magnetic nanostructures by self-assembling of polystyrene nanospheres”, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1411, Materials Research Society, (2012).
- [14]. Ghafar Ali, Chong Chen, Seung Hwa Yoo, Jong Min Kum and Sung Oh Cho, “Fabrication of complete titania nanoporous structures via electrochemical anodization of Ti”, Nanoscale Research Letters, 6:332, (2011).
- [15]. Ajab Khan Kasi, Jafar Khan Kasi, Nitin Afzulpurkar, Erik Bohez, Adisom Tuantranont and Banchong Mahaisavariya “Fabrication of Anodic Aluminum Oxide (AAO) Nano-Porous Membrane on Both Sides of Aluminum Sheet”, 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE 2010).
- [16]. Thi Ngoc Anh Nguyen, Julia Kasiuk, Wen Bin Wu, Julia Fedotova, Janusz Przewoźnik, Czesław Kapusta, Olga Kupreeva, Serguei Lazarouk, Thi Thanh Hai Cao, Thi Thanh Thuy Nguyen, Hung

- Manh Dinh, Khanh Tung Do, Thanh Huong Nguyen, Hong Ky Vu, Dinh Lam Vu & Johan Åkerman, “Correlation of magnetic and magnetoresistive properties of nanoporous Co/Pd thin multilayers fabricated on anodized TiO₂ templates”, *Sci. Reports* **10**, 108381 (2020).
- [17]. T.N. Anh Nguyen, J. Fedotova, J. Kasiuk, V. Bayev, O. Kupreeva, S. Lasarouk, H.M. Do, D.L. Vu, S. Chung, J. Åkerman, V. Altynov and A. Maximenko, “Effect of flattened surface morphology of anodized aluminum oxide templates on the magnetic properties of nanoporous Co/Pt and Co/Pd thin multilayered films”, *Appl. Surf. Sci.* **427**, Part B, 649-655 (2018).
- [18]. C.T.T. Hai, V.H. Ky, N.T.T. Thuy, N.T. Hue, D.H. Manh, D.K. Tung, N.T. Huong, N.T.N. Anh, “Khả năng điều biến dị hướng từ theo phương vuông góc trong màng mỏng đa lớp [Co/Pd]”, *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự*, S **66(4)**, 173-177 (2020).
- [19]. Qiling Peng, Huijin Liu and Shen Ye*, “Adsorption of Organic Carbonate Solvents on a Carbon Surface Probed by Sum Frequency Generation (SFG) Vibrational Spectroscopy”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, (2016). doi: 10.1016/j.jelechem.
- [20]. Wen-Bin Wu, Julia Kasiuk, Thi Ngoc Anh Nguyen, Janusz Przewoźnik, Julia Fedotova, Czesław Kapusta, Olga Kupreeva, Serguei Lazarouk, Khanh Tung Do, Thanh Huong Nguyen, Hong Ky Vu, Hoai Linh Pham, Dinh Lam Vu, and Johan Åkerman, “Influence of interfacial magnetic ordering and field-cooling effect on perpendicular exchange bias and magnetoresistance in nanoporous IrMn/[Co/Pd] films”, *Journal of Applied Physics* **127**, 223904 (2020).
- [21]. Castro, I.L., et al., “The role of the (111) texture on the exchange bias and interlayer coupling effects observed in sputtered NiFe/IrMn/Co trilayers”, *Journal of Applied Physics*. **113(20)**: p. 203903, (2013).
- [22]. B.R. Tzanevaa, A.I. Naydenovb, S.Zh. Todorovac, V.H. Videkova, V.S. Milushevaa and P.K. Stefanovb, “Cobalt electrodeposition in nanoporous anodic aluminium oxide for application as catalyst for methane combustion”, *Electrochimica Acta* Volume **191**, pp. 192-199, (2016).
- [23]. Yuan, W., et al., “Crystal Structure Manipulation of the Exchange Bias in an Antiferromagnetic Film”, *Scientific Reports*, **6**, (2016).

ABSTRACT

Structure and magnetic properties of [Co/Pd] multilayer antidot thin films with perpendicular magnetic anisotropy

The [Co/Pd] multilayer antidot thin films sputtered on the Al₂O₃ and TiO₂ nanoporous templates with pore sizes of 30 nm and 50 nm were fabricated by DC magnetron sputtering. The impact of film morphology on the structural and magnetic properties in the delveloped films are thoroughly investigated. The results show that, similar to the [Co/Pd] multilayer flat thin film, the multilayer antidot films also show large perpendicular magnetic anisotropy at room temperature. However, the coercivity of H_C in the multilayer antidot films is significantly enhanced compared with that of the flat film, the highest H_C of 2220 Oe was achieved for the TiO₂-[Co/Pd] multilayer antidot film, which is respectively 1.28 and 3.15 times higher than that of the Al₂O₃-[Co/Pd] multilayer antidot film and the SiO₂-[Co/Pd] flat thin film, due to the formation of magnetically soft regions near the pore edges. It can be said that the magnetic properties in the antidots multilayer thin films can be completely modulated by adjusting the structural parameters of the nanoporous template such as pore size and surface roughness.

Keywords: Exchange bias; Antidots multilayer thin films; Perpendicular mangnetic anisotropy; Ferromagnetic exchange interactions; Ferromagnetic - antiferromagnetic exchange interaction.