

# TÍNH CHẤT TỪ CỦA HỆ MÀNG MỎNG Co/Pt DỰA TRÊN HIỆU ỨNG QUANG TỪ

Quách Duy Trường\*

Khoa Khoa học Cơ bản, Đại học Giao thông Vận tải, 3 Cầu giấy, Láng thượng, Đống đa, Hà nội, Việt Nam

\* Tác giả liên hệ Quách Duy Trường <hxanhvu@hueuni.edu.vn>

(Ngày nhận bài: 17-05-2023; Hoàn thành phản biện: 11-07-2023; Ngày chấp nhận đăng: 14-08-2023)

**Tóm tắt.** Tính chất từ và cấu trúc đô men từ của hệ màng mỏng đa lớp (Co- $t$  nm/Pt-0.8 nm)<sub>5</sub> ( $t = 0,3, 0,5$  và  $0,6$ ) được chế tạo bằng phương pháp phún xạ magnetron với dị hướng từ vuông góc đã được nghiên cứu dựa trên hiệu ứng quang từ (Kerr effect). Kết quả cho thấy rằng có sự thay đổi rõ ràng về tính chất từ cũng như cấu trúc đô men từ khi độ dày lớp từ tính tăng lên từ  $0,3$  đến  $0,6$ . Với sự tăng lên của độ dày của lớp từ tính, đường cong từ trễ của các màng mỏng biến đổi từ dạng vuông sang dạng nghiêng, trong khi cấu trúc đô men từ thay đổi từ dạng tròn sang dạng các dải hẹp. Đồng thời, quá trình đảo từ biến đổi từ dễ đảo từ hoàn toàn với  $t$  nhỏ sang khó đảo từ hoàn toàn với  $t$  lớn.

**Từ khóa:** cấu trúc đô men từ, màng mỏng đa lớp, hiệu ứng quang từ

## Magnetic properties of Co/Pt multilayers based on magneto-optical effect

Quach Duy Truong\*

Department of Basic Science, University of Transport and Communications, 3 Cau Giay, Lang Thuong, Dong Da, Hanoi, Vietnam

\* Correspondence to Quach Duy Truong <hxanhvu@hueuni.edu.vn>

(Received: 17 May 2023; Revised: 11 July 2023; Accepted: 14 August 2023)

**Abstract.** Magnetic properties and domain structures of (Co- $t$  nm/Pt-0,8 nm)<sub>5</sub> ( $t = 0.3, 0.5,$  and  $0.6$ ) multilayers with perpendicular magnetic anisotropy fabricated by magnetron sputtering were investigated based on the magneto-optical (Kerr) effect. The results show that there are significant changes in their magnetic properties, as well as domain structures when increasing the thickness of the magnetic layers from  $0.3$  to  $0.6$  nm. With the increase of the thickness of the magnetic layers, the hysteresis loops of the multilayers change from circular-like to stripe-like structures. Furthermore, their magnetization reversals shift from being easy to completely reversible with small  $t$  and to being difficult to completely reversible with large  $t$ .

**Keywords:** magnetic domain structure, multilayers, magneto-optical effect

### 1 Mở đầu

Vật liệu màng mỏng đa lớp cấu trúc nano là vật liệu trong đó có các lớp từ tính (Fe, Co, Ni,

CoFe, CoFeB, v.v.) xen kẽ với lớp không từ tính (Pt, Pd, Ag, v.v.). Trong các vật liệu này, khi kích thước lớp từ tính giảm xuống cỡ nano mét, dị hướng từ

vuông góc hình thành do hiệu ứng bề mặt lớn. Khi đó, các mô men từ có định hướng vuông góc với bề mặt của màng. Các màng mỏng với tính dị hướng từ vuông góc đã và đang thu hút sự quan tâm của các nhà nghiên cứu nhờ các ứng dụng tiềm năng của chúng trong công nghệ lưu trữ thông tin và các thiết bị mô-men xoắn truyền spin [1-3]. Các màng mỏng từ tính chứa Co đã được nghiên cứu rộng rãi [4-7]; trong đó, cấu trúc đô men từ phụ thuộc mạnh vào số lần lặp lại của các lớp từ tính và lớp không từ tính [4] cũng như độ dày của các lớp màng từ tính [5]. Sự khác biệt trong các cấu trúc đô men dẫn đến hình thành các hình dạng đường cong từ trễ khác nhau [5-8].

Để có thể nâng cao hiệu quả, chất lượng, cũng như sự ổn định của các linh kiện điện tử spin sử dụng màng mỏng đa lớp cấu trúc nano, cần phải hiểu rõ tính chất từ của hệ vật liệu và đặc biệt là cấu trúc đô men từ cũng như các quá trình động học đô men từ của chúng. Hơn nữa, sự phụ thuộc của các yếu tố trên vào độ dày của lớp màng từ trên vật liệu sẽ giúp tìm được cấu trúc phù hợp nhất với các ứng dụng đề xuất trong tương lai.

Trong công trình này, chúng tôi sử dụng kính hiển vi quang từ dựa trên hiệu ứng Kerr (Kerr effect) [9]. Thiết bị cho phép nghiên cứu các đặc trưng của các quá trình từ hoá đảo từ cũng như trực tiếp quan sát được cấu trúc đô men từ. Các kết quả về đặc trưng từ trễ, hình ảnh đô men từ của các mẫu được phân tích đối chiếu với nhau dọc theo đường cong từ trễ và quá trình phục hồi từ để hiểu rõ cơ chế từ hoá đảo từ của các màng mỏng.

## 2 Thực nghiệm

Các màng Co/Pt được lắng đọng trên đế SiN 100 nm bằng phương pháp phun xạ magnetron. Các màng mỏng được phủ một lớp Ta (dày 1 nm) để bảo vệ các lớp bên trong khỏi quá trình oxi hoá khi tiếp xúc với không khí. Lớp không từ tính Pt có độ dày 0,8 nm. Các mẫu với lớp Co dày 0,3, 0,5 và 0,6 nm được ký hiệu lần lượt là  $S_1$ ,  $S_2$  và  $S_3$ . Hình

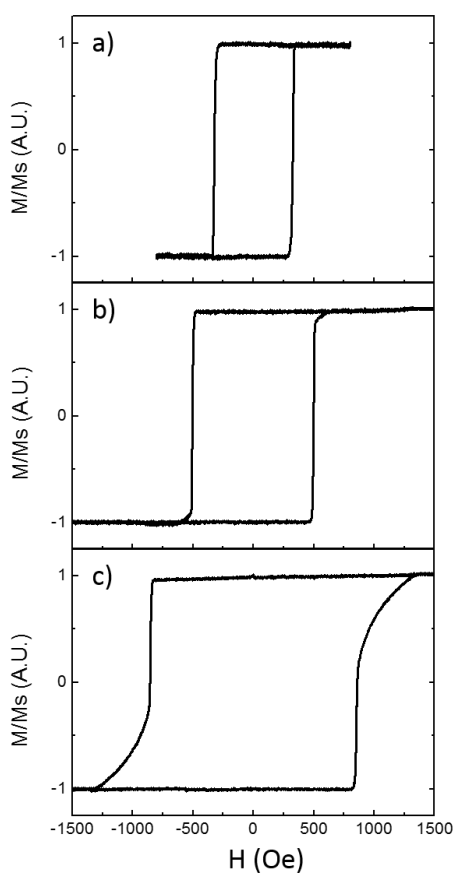
ảnh đô men từ của mẫu được chụp bằng kính hiển vi quang từ sử dụng chế độ polar Kerr, trong đó chùm sáng phân cực chiếu tới vuông góc với mặt phẳng mẫu. Kính hiển vi được điều khiển bằng máy tính thông qua phần mềm Labview. Các ảnh đô men từ được chụp tại các thời điểm khác nhau dưới tác dụng của từ trường vuông góc với mặt mẫu và được lưu trong bộ nhớ của máy tính. Sự phụ thuộc vào thời gian của từ độ ( $M$ ) được xác định từ phép phân tích định lượng các đô men từ chụp được. Đường cong từ trễ và đường cong hồi phục từ được xác định bằng cách lấy trung bình cường độ Kerr của hình ảnh đô men, sau đó chuẩn hoá bằng cường độ Kerr bão hoà ( $M_s$ ) để xác định từ độ chuẩn hoá  $M/M_s$ .

## 3 Kết quả và thảo luận

Hình 1 trình bày sự phụ thuộc của từ độ chuẩn hoá của các màng mỏng theo từ trường bên ngoài với sự thay đổi của độ dày lớp từ tính Co.

Kết quả cho thấy rằng dị hướng từ vuông góc đã được thiết lập trong tất cả các mẫu; trong đó, đường cong từ trễ có dạng vuông hơn với  $S_1$ . Với hai mẫu còn lại, các đường cong từ trễ xuất hiện các vùng nghiêng khi gần đạt đến từ trường bão hoà. Vùng nghiêng này rộng hơn khi độ dày lớp Co ( $t$ ) lớn hơn. Điều này tương tự như kết quả đã được quan sát thấy đối với đường cong  $M-H$  của các màng mỏng CoFeB/Pd khi tăng độ dày của lớp từ tính [10]. Kết quả phân tích cho thấy lực kháng từ của các mẫu  $S_1$ ,  $S_2$  và  $S_3$  lần lượt là 304, 484 và 825 Oe. Đường cong từ trễ còn cho phép xác định các giá trị từ trường mà tại đó bắt đầu xuất hiện các mầm đảo từ và trên đường cong từ trễ tương ứng khi từ độ bắt đầu giảm từ giá trị +1 xuống và được gọi là từ trường tạo mầm. Giá trị này của các mẫu  $S_1$ ,  $S_2$  và  $S_3$  lần lượt là 286, 449 và 726 Oe. Bên cạnh đó, các giá trị từ trường mà tại đó từ độ của mẫu giảm đến -1, gọi là từ trường bão hoà, lần lượt là 346, 605 và 1222 Oe.

Để tìm hiểu nguyên nhân của sự khác biệt trên đường cong từ trễ của các mẫu, chúng tôi chụp dọc cấu trúc đô men từ của các mẫu theo các đường cong từ trễ (Hình 2). Sau khi mẫu vật liệu được bão hoà từ dưới từ trường dương cực đại (độ lớn tối thiểu bằng 2 lần lực kháng từ của từng mẫu) và hướng của từ trường là vuông góc với mặt phẳng màng thì quá trình đảo từ bắt đầu bằng việc giảm từ trường từ giá trị dương cực đại đến giá trị cực



Hình 1. Đường cong từ trễ của các mẫu a)  $S_1$ , b)  $S_2$ , c)  $S_3$

tiểu âm (có giá trị bằng từ trường dương cực đại), rồi lại tăng đến từ trường dương cực đại.

Đối với mẫu  $S_1$  ở gần pha bão hoà, không quan sát được vùng nghiêng trên đường cong từ trễ. Hình ảnh đô men từ chụp dọc theo các đường cong  $M-H$  cho thấy khi từ độ giảm, một đô men từ đảo ngược tương ứng biểu thị bằng điểm tối trên

nền sáng đã hình thành trong vùng quan sát. Khi từ trường giảm, sự đảo từ xảy ra do sự mở rộng vách đô men, trong đó miền tối có dạng tròn mở rộng dần biên của nó. Cấu trúc đô men từ và sự đảo từ tương tự đã được quan sát trước đây đối với các màng mỏng chứa Co có dị hướng từ vuông góc khác [13, 14]. Ngoài ra, có thể thấy biên đô men có dạng thô với một số vùng nhỏ không được đảo ngược gần rìa của nó khi đô men lớn hơn. Nếu tiếp tục giảm từ trường thì miền tối mở rộng và chiếm ưu thế trong vùng quan sát và quá trình đảo từ gần hoàn thành khi từ độ chuẩn hoá tiến đến  $-1$ . Sự phát triển của đô men từ và sự lan truyền của các vách đô men dường như ổn định, cho thấy mẫu này có hiệu ứng ghim từ yếu. Đặc điểm này có tiềm năng ứng dụng liên quan các thiết bị mô-men xoắn truyền spin (spin-transfer torque devices) điều khiển bằng vách đô men [13].

Đối với mẫu  $S_2$  (Hình 2b), sau khi tạo mầm ở  $-500$  Oe (sự xuất hiện của một đô men nhỏ ở trung tâm vùng quan sát) và với sự giảm từ trường, sự đảo từ cũng xảy ra do sự lan truyền vách đô men dẫn tới kích thước đô men tăng lên. Tuy nhiên, khi quan sát kỹ bên trong đô men đảo ngược (vùng tối), có thể thấy mặc dù đô men có dạng giống hình tròn nhưng nó có rất nhiều vùng nhỏ li ti với mô men từ chưa đảo ngược (sáng màu hơn) bên trong biên của nó. Với cường độ từ trường đạt giá trị gần với từ trường bão hoà, đô men đảo ngược (vùng tối) bao phủ tất cả miền khảo sát, nhưng vẫn có thể quan sát được có các đô men chưa đảo rất nhỏ xen kẽ bên trong. Trong mẫu này, ban đầu sự đảo từ xảy ra nhanh chóng khi giảm từ trường đến  $-515$  Oe do quá trình mở rộng vách đô men và sau đó là quá trình triệt tiêu chậm của các đô men nhỏ chưa đảo (do hiệu ứng ghim từ mạnh) khi giảm tiếp từ trường đến giá trị từ trường bão hoà ở  $-605$  Oe.

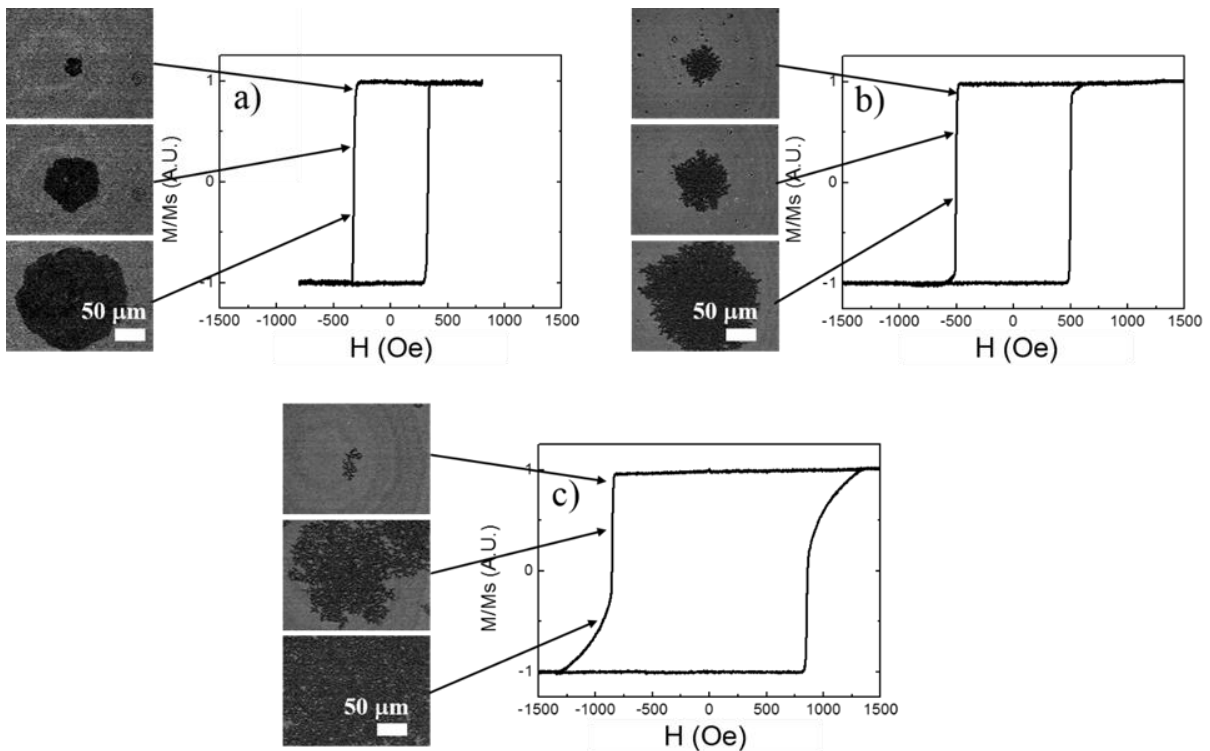
Hiện tượng tương tự như trên xảy ra đối với mẫu  $S_3$  (Hình 2c). Tuy nhiên, khi từ trường mạnh hơn lực kháng từ của mẫu  $\sim 3\%$ , tức là ở giá trị khoảng  $-850$  Oe thì vùng tối đã bao phủ toàn bộ miền quan sát. Đồng thời, các vùng sáng li ti (tương

ứng với các mô men từ chưa đảo) bên trong vùng tối có kích thước lớn hơn so với mẫu S<sub>2</sub>. Quá trình triệt tiêu chậm các vùng sáng này xảy ra lâu hơn ở mẫu S<sub>2</sub> khi giảm từ trường từ -850 đến khoảng -1300 Oe. Kết quả là vùng nghiêng trên đường cong từ trở ở mẫu S<sub>3</sub> rộng hơn so với ở mẫu S<sub>2</sub>.

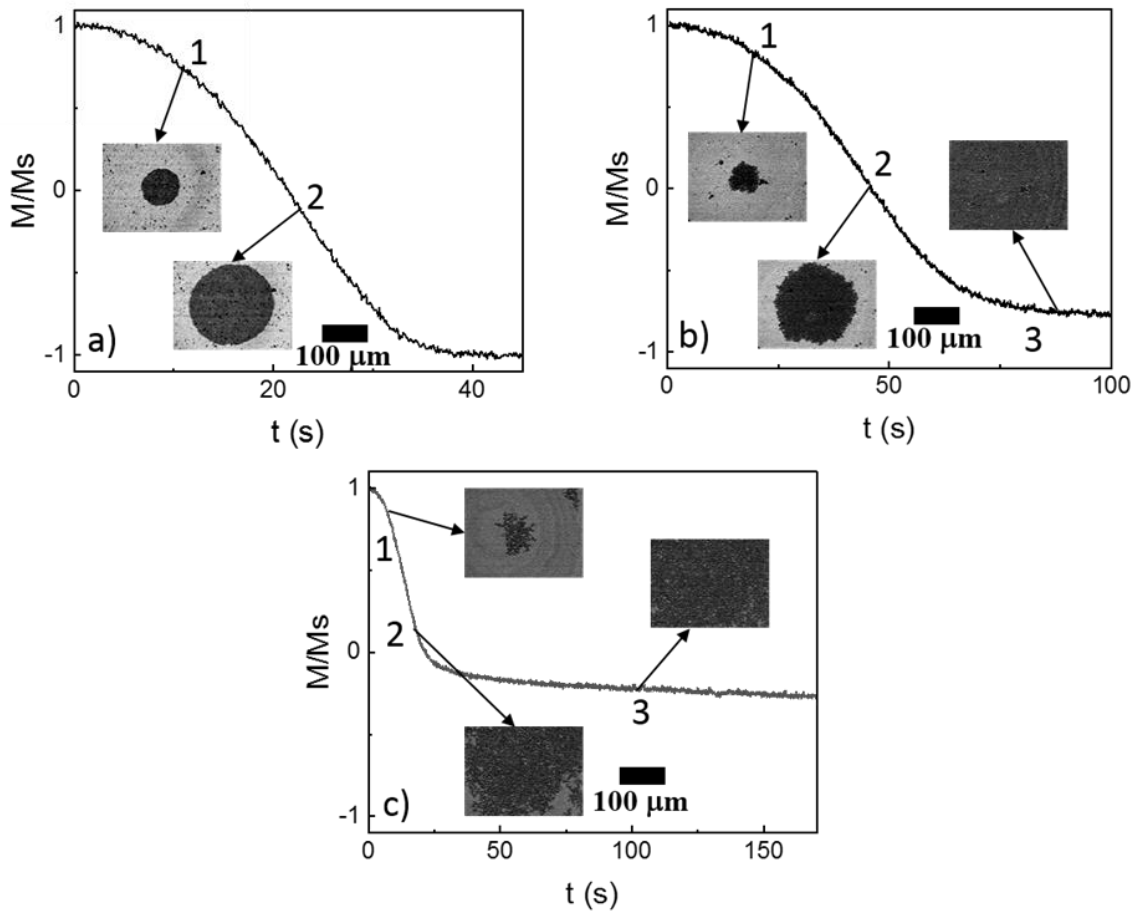
Để tìm hiểu rõ hơn về tính chất từ của các màng mỏng đa lớp Co/Pt, chúng tôi tiến hành đo đường cong phục hồi từ. Đầu tiên, mỗi mẫu được bão hoà từ dương dưới từ trường dương cực đại. Sau đó, từ trường được đảo ngược thành từ trường âm với giá trị bằng khoảng 80% của lực kháng từ của mẫu và cố định giá trị đó rồi ghi lại sự biến đổi của từ độ tỉ đối  $M/M_s$  và hình ảnh đô men từ. Kết quả được trình bày trên Hình 3.

Với mẫu S<sub>1</sub> (Hình 3a), sau khi đảo từ trường, từ độ giảm dần từ giá trị từ độ bão hoà âm (+1) sang từ độ bão hoà âm (-1) trong

khoảng 40 s. Trong đó, mất khoảng 20 s để từ độ đảo ngược một nửa (thời gian này được gọi là thời gian đảo một nửa,  $t_{1/2}$ ). Quá trình đảo từ diễn ra thông qua sự mở rộng vách đô men như quan sát tại các điểm 1 và 2 trên Hình 3a. Đáng chú ý là trong mẫu này, từ độ bão hoà âm có thể đạt được hoàn toàn chỉ sau hai lần  $t_{1/2}$ . Trong khi đó, với mẫu S<sub>2</sub> (Hình 2b), trước hết sự đảo từ xảy ra do sự lan truyền vách đô men từ 0 đến 75 s; biên đô men mở rộng dần ra (điểm 1 và 2). Sau thời gian đó, vùng đô men đã đảo chiếm toàn bộ không gian của vùng quan sát, mặc dù từ độ khi đó chỉ đạt 80% mức bão hoà âm. Thời gian để từ độ bị đảo ngược một nửa là khoảng 45 s ( $= t_{1/2}$ ). Kết quả thực nghiệm (không trình bày ở đây) cho thấy rằng ngay cả sau khoảng năm lần  $t_{1/2}$ , từ độ cũng không thể đảo ngược đến mức bão hoà âm hoàn toàn. Điều đó có nghĩa là quá trình phục hồi từ trong mẫu này là một quá trình lâu dài do hiệu ứng ghim từ mạnh.



**Hình 2.** Đô men từ dọc theo đường cong từ trở của các mẫu a) S<sub>1</sub>, b) S<sub>2</sub>, c) S<sub>3</sub>

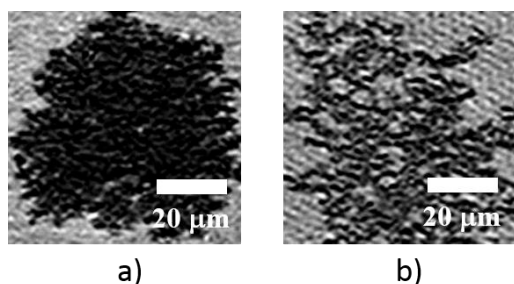


**Hình 3.** Đường cong phục hồi từ và hình ảnh đô men từ của các mẫu a)  $S_1$ , b)  $S_2$ , c)  $S_3$

Đối với mẫu  $S_3$  (Hình 3c), kết quả cũng tương tự mẫu như đối với  $S_2$ , trong đó cần khoảng 21 s để từ độ đảo một nửa. Quá trình cũng xảy ra bằng cách mở rộng dần biên của đô men (điểm 1 và 2 trên Hình 3c). Đối với mẫu này, sau 10 lần  $t_{1/2}$  thì từ độ chỉ đạt đến 30% của từ độ bão hoà âm. Điều đó chứng tỏ rằng khi tăng độ dày của lớp Co, hiệu ứng ghim trở nên mạnh hơn do sự gia tăng số lượng các vị trí ghim từ. Điều này xảy ra khi độ dày của lớp vật liệu tăng lên và số lượng các điểm sai hỏng cũng tăng lên theo và do đó dẫn đến sự tồn tại của các đô men từ rất nhỏ chưa đảo từ bên trong ranh giới đô men lớn. Kết quả là khi tăng độ dày của lớp Co, quá trình đảo từ diễn ra khó khăn hơn vì cần nhiều năng lượng hơn để vượt qua năng lượng ghim từ, tức là cần từ trường lớn hơn để bão hoà từ hoàn toàn. Điều này dẫn đến các đường

cong từ trở có đoạn nghiêng khi gần đạt trạng thái bão hoà như ở Hình 1b và 1c.

Hình 4 trình bày hình ảnh đô men từ của hai mẫu  $S_2$  và  $S_3$  tại các vị trí 1 trên Hình 3b và 3c với độ phóng đại lớn hơn. Kết quả cho thấy rõ trong vùng đô men đã đảo (vùng tối) của mẫu  $S_2$  tồn tại các vùng li ti chưa đảo từ bên trong biên của đô men lớn. Cấu trúc này được gọi là dendritic, tương tự như đã được quan sát thấy với hệ CoFeB/Pd [14]. Trong khi đó, các vùng chưa đảo bên trong biên đô men của mẫu  $S_3$  có kích thước lớn hơn nhiều so với các vùng của mẫu  $S_2$ , dẫn tới đô men đã đảo có dạng là tập hợp của các dải hẹp. Đối với mẫu  $S_1$  thì hoàn toàn không quan sát được các vùng chưa đảo bên trong biên đô men dù quan sát ở độ phân giải cao nhất của hệ kính hiển vi.



Hình 4. Cấu trúc đốm từ tại vị trí 1 trên đường cong từ trễ (hình 2) của các mẫu a)  $S_2$  và b)  $S_3$

#### 4 Kết luận

Chúng tôi đã khảo sát tính chất từ và cấu trúc đốm từ của hệ màng mỏng đa lớp (Co-t nm/Pt-0,8 nm)<sub>5</sub> với chiều dày từ 0,3 đến 0,6 nm bằng cách sử dụng kính hiển vi quang từ trong từ trường ngoài vuông góc với mặt phẳng mẫu. Tất cả các màng mỏng đều có dị hướng từ vuông góc. Khi  $t = 0,3$ , đường cong  $M-H$  có dạng hình vuông và quá trình đảo từ dễ dàng xảy ra hoàn toàn. Trong khi với  $t$  lớn hơn, các đường  $M-H$  có đoạn nghiêng khi gần trạng thái bão hòa, đồng thời từ độ khó có thể đảo hoàn toàn. Khi độ dày của lớp Co tăng lên, các thông số như bề rộng đường từ trễ, lực kháng từ, từ trường tạo mầm và từ trường bão hòa đều tăng lên. Lực kháng từ của các mẫu với  $t = 0,3$  và  $0,5$  là 304 và 484 Oe. Các giá trị này phù hợp cho các ứng dụng ghi từ không yêu cầu từ trường cao. Đồng thời, có sự biến đổi về cấu trúc đốm từ dạng hình tròn khi  $t = 0,3$  sang dạng cấu trúc có các dải nhỏ khi  $t = 0,6$ .

#### Thông tin tài trợ

Nghiên cứu này được Trường Đại học Giao thông Vận tải tài trợ trong đề tài NCKH, mã số T2023-CB-012.

#### Xung đột lợi ích

Tôi (tác giả của bài báo) tuyên bố không có xung đột lợi ích nào liên quan đến việc xuất bản bài báo này.

#### Tài liệu tham khảo

1. Chappert C, Fert A, Van Dau FN. The emergence of spin electronics in data storage. *Nature Materials*. 2007;6(11):813-23.
2. Sbiaa R, Meng H, Piramanayagam SN. Materials with perpendicular magnetic anisotropy for magnetic random access memory. 2011;5(12):413-9.
3. Mangin S, Ravelosona D, Katine JA, Carey MJ, Terris BD, Fullerton EE. Current-induced magnetization reversal in nanopillars with perpendicular anisotropy. *Nature Materials*. 2006;5(3):210-5.
4. Iunin YL, Kabanov YP, Nikitenko VI, Cheng XM, Clarke D, Tretiakov OA, et al. Asymmetric Domain Nucleation and Unusual Magnetization Reversal in Ultrathin Co Films with Perpendicular Anisotropy. *Physical Review Letters*. 2007;98(11):117204.
5. Kisielewski M, Maziewski A, Tekielak M, Ferré J, Lemerle S, Mathet V, et al. Magnetic anisotropy and magnetization reversal processes in Pt/Co/Pt films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2003;260(1):231-43.
6. Iunin YL, Kabanov YP, Nikitenko VI, Cheng XM, Chien CL, Shapiro AJ, et al. Magnetic field dependence of asymmetry in the magnetization reversal of ultrathin Co films and Co/Pt multilayers with perpendicular anisotropy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008;320(15):2044-8
7. Berger A, Mangin S, McCord J, Hellwig O, Fullerton EE. Cumulative minor loop growth in Co/Pt and Co/Pd multilayers. *Physical Review B*. 2010;82(10):104423.
8. Truong QD. Magnetic properties and domain structure of CoFeB/Pd multilayers with perpendicular magnetic anisotropy. *Vietnam Journal of Science and Technology*. 2019;57(6):685-92.
9. Quach DT, Lee SH, Kim DH. Investigation of Microscopic Demagnetization Process Using

- Magneto-Optical Microscopy. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014;50(6):1-4.
10. Ngo D-T, Quach D-T, Tran Q-H, Møhave K, Phan T-L, Kim D-H. Perpendicular magnetic anisotropy and the magnetization process in CoFeB/Pd multilayer films. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014;47(44):445001.
  11. Burrowes C, Vernier N, Adam J-P, Herrera Diez L, Garcia K, Barisic I, et al. Low depinning fields in Ta-CoFeB-MgO ultrathin films with perpendicular magnetic anisotropy. *Applied Physics Letters*. 2013;103(18).
  12. Jaiswal S, Lee K, Langer J, Ocker B, Kläui M, Jakob G. Tuning of interfacial perpendicular magnetic anisotropy and domain structures in magnetic thin film multilayers. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2019;52(29):295002.
  13. Jamali M, Narayanapillai K, Qiu X, Loong LM, Manchon A, Yang H. Spin-Orbit Torques in Co/Pd Multilayer Nanowires. *Physical Review Letters*. 2013;111(24):246602.
  14. Sbiaa R, Ranjbar M, Åkerman J. Domain structures and magnetization reversal in Co/Pd and CoFeB/Pd multilayers. *Journal of Applied Physics*. 2015;117(17).