

EFFECTS OF Cu SPACER THICKNESS ON THE INTERLAYER EXCHANGE COUPLING AND MAGNETIC PROPERTIES OF SPIN VALVES WITH PERPENDICULAR ANISOTROPY BASED ON [Co/Pd] MULTILAYERED THIN FILMS

Nguyen Thi Ngoc Anh^{1,2*}, Pham Quang Ngan¹, Do Khanh Tung¹, Nguyen Thanh Huong¹, Vu Hong Ky¹, Nguyen Thi Viet Ha³, Pham Thi Thuy Hang³, Dinh Hung Manh³

¹Institute of Materials Science – VAST, ²Graduate University of Science and Technology – VAST

³Hanoi National University of Education

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 24/6/2024	Spin-valve sandwiched structures (consisting of two ferromagnetic layers with a non-magnetic layer in between) play a significant role in many magnetic applications and modern spintronics technology. In this study, we focus on fabricating spin valve structures in which the ferromagnetic layers are [Co/Pd] multilayer films with perpendicular magnetic anisotropy and the separating layer is Cu with different thicknesses ($t_{Cu}=0.6-6$ nm). The effect of Cu layer thickness on magnetic properties in the developed spin valves are investigated in detail. The spin valves are fabricated using a magnetron sputtering system, structural characteristics are investigated by X-ray diffraction, and magnetic properties are investigated by a vibrating sample magnetometer system. The results show that the exchange interaction between ferromagnetic layers as well as the magnetic properties in spin valves clearly depends on the thickness of the Cu spacer. The research opens up the possibility of designing and optimizing perpendicular spin valves for next-generation spintronics devices.
Revised: 01/8/2024	
Published: 01/8/2024	
KEYWORDS	
Magnetic multilayered thin films	
Perpendicular magnetic anisotropy	
Spin valve	
Giant magnetoresistance	
RKKY interaction	

ẢNH HƯỞNG CỦA CHIỀU DÀY LỚP NGĂN CÁCH Cu LÊN TƯƠNG TÁC TRAO ĐỔI VÀ TÍNH CHẤT TỪ TRONG CÁC VAN SPIN CÓ DỊ HƯỚNG VUÔNG GÓC DỰA TRÊN CÁC MÀNG MỎNG ĐA LỚP [Co/Pd]

Nguyễn Thị Ngọc Anh^{1,2*}, Phạm Quang Ngan¹, Đỗ Khánh Tùng¹, Nguyễn Thanh Hương¹, Vũ Hồng Kỳ¹, Nguyễn Thị Việt Hà³, Phạm Thị Thúy Hằng³, Đinh Hùng Mạnh¹

¹Viện Khoa học vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

²Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, ³Trường Đại học Sư phạm Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 24/6/2024	Các cấu trúc van spin dạng bánh kẹp (bao gồm hai lớp sắt từ được ngăn bởi một lớp phi từ ở giữa) đóng vai trò quan trọng trong nhiều ứng dụng từ tính và công nghệ điện tử học spin hiện đại. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung vào chế tạo các cấu trúc van spin trong đó các lớp sắt từ là các màng đa lớp [Co/Pd] có dị hướng từ vuông góc và lớp ngăn cách là Cu có chiều dày khác nhau ($t_{Cu}=0,6-6$ nm). Ảnh hưởng của chiều dày lớp Cu lên tính chất từ trong các van spin đã chế tạo được khảo sát chi tiết. Các van spin được chế tạo bằng hệ phún xạ magnetron, đặc trưng cấu trúc được khảo sát bằng nhiễu xạ tia X, tính chất từ được khảo sát bằng hệ từ kế mẫu rung. Kết quả chỉ ra rằng tính chất từ trong các van spin phụ thuộc rõ rệt vào chiều dày của lớp ngăn cách Cu. Nghiên cứu mở ra khả năng thiết kế và tối ưu hóa các van spin vuông góc cho các thiết bị spintronics thế hệ mới.
Ngày hoàn thiện: 01/8/2024	
Ngày đăng: 01/8/2024	
TỪ KHÓA	
Màng mỏng đa lớp từ tính	
Dị hướng từ vuông góc	
Van spin	
Từ trở không lồ	
Tương tác trao đổi RKKY	

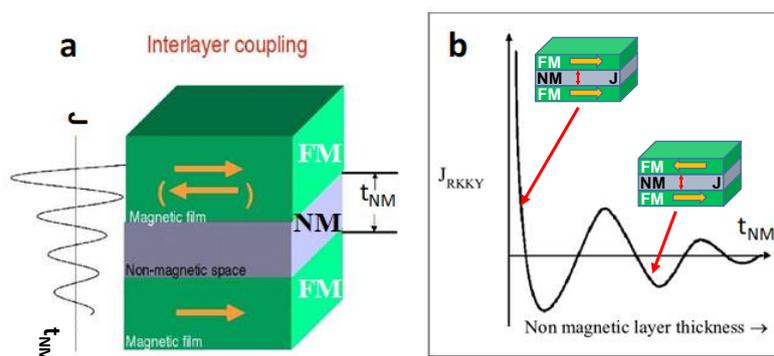
DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10656>

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

1. Giới thiệu

Van spin (tiếng Anh là spin valve, viết tắt là SV) là một linh kiện từ tính dựa trên từ tính của các màng mỏng đa lớp, gồm các lớp sắt từ (FM) ngăn cách bởi các lớp kim loại phi từ (NM). Nhờ vào tính chất từ và các hiện tượng, hiệu ứng vật lý thú vị như từ trở khổng lồ (GMR) mà các SV có vai trò quan trọng trong nhiều ứng dụng công nghệ điện tử học spin hiện đại [1], [2]. Những ứng dụng quan trọng của SV có thể kể đến như các đầu đọc, đầu ghi dữ liệu của ổ cứng máy tính, các thiết bị lưu trữ thông tin như ổ đĩa nhớ, bộ nhớ RAM từ trở, các cảm biến từ trường, mạch lọc spin,... [3].

Kể từ khi hiệu ứng từ GMR trong các màng mỏng đa lớp được phát hiện vào năm 1988 [1], [2], các nhà nghiên cứu đã tập trung vào việc tìm hiểu tương tác giữa các lớp vật liệu FM thông qua lớp NM trong các hệ màng mỏng dạng bánh kẹp 3 lớp FM/NM/FM hoặc các hệ màng mỏng đa lớp (FM/NM)_N [4] – [6]. Tương tác giữa các lớp FM thông qua lớp NM gọi là tương tác trao đổi (gián tiếp) giữa các lớp (interlayer exchange coupling, IEC), còn gọi là tương tác Ruderman–Kittel–Kasuya–Yosida (RKKY) [7] – [9]. Tương tác này là kết quả của tương tác trao đổi RKKY giữa các mô-men của các nguyên tử từ tính (các spin phân cực) ở các lớp FM thông qua các điện tử dẫn của lớp NM. Trong cấu trúc bánh kẹp 3 lớp FM/NM/FM, tương tác RKKY, đặc trưng bởi hằng số trao đổi cặp J_{RKKY} giữa hai lớp FM thể hiện tính chất dao động kiểu hình sin tắt dần theo chiều dày lớp NM (Hình 1). Ngoài ra, cấu hình mô-men từ trong hai lớp FM cũng biểu hiện tính dao động, từ cấu hình kiểu sắt từ trong đó mô-men từ trong hai lớp FM từ sắp xếp song song, tương ứng với giá trị $J_{\text{RKKY}} > 0$, sang cấu hình kiểu phản sắt từ trong đó mô-men từ trong hai lớp FM sắp xếp phản song, tương ứng với giá trị $J_{\text{RKKY}} < 0$ (Hình 1b). Nói cách khác, sự thay đổi của độ dày lớp NM có thể gây ra sự chuyển đổi cấu hình từ tính trong hai lớp FM, từ kiểu sắt từ (còn gọi tương tác trao đổi sắt từ) sang kiểu phản sắt từ (còn gọi là tương tác trao đổi phản sắt từ) và ngược lại, thể hiện hành vi dao động của tương tác RKKY giữa chúng (Hình 1b) [10], [11].



Hình 1. Liên kết trao đổi RKKY phụ thuộc vào độ dày lớp phi từ trong màng đa lớp dạng bánh kẹp FM/NM/FM

Tương tác RKKY giữa các lớp FM không chỉ phụ thuộc và được quyết định bởi độ dày của lớp NM mà còn phụ thuộc vào các yếu tố chủ quan như vật liệu lớp đệm, độ nhám bề mặt và chất lượng các lớp tiếp giáp FM/NM [12]. Các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, ngoài đặc trưng dao động trong cấu hình mô-men từ trong hai lớp FM, hay độ lớn và dấu của tương tác RKKY, một số tính chất từ và đặc trưng dẫn gắn với các cấu trúc đa lớp loại này như từ trở khổng lồ [13], [14], cảm ứng quang từ [15] và dị hướng từ [16], cũng thể hiện hành vi dao động theo độ dày của lớp NM. Gần đây, các vật liệu từ có dị hướng từ vuông góc thu hút được sự quan tâm lớn bởi chúng được kỳ vọng sẽ cung cấp các đặc tính vượt trội về mặt kỹ thuật như khả năng chịu nhiệt cao, độ ổn định từ tính tốt giúp nâng cao hiệu quả cho các thiết bị từ tính và thiết bị điện tử học spin (spintronics) thế hệ mới [17], [18]. Việc làm rõ tương tác từ và sự ảnh hưởng của độ dày lớp NM trong các hệ SV có dị hướng từ vuông góc là cần thiết.

Trong nghiên cứu này, các SV điển hình dạng bánh kẹp 3 lớp FM/Cu/FM trong đó FM là các màng đa lớp [Co/Pd] có dị hướng từ vuông góc và lớp ngăn cách Cu giữa chúng có chiều dày

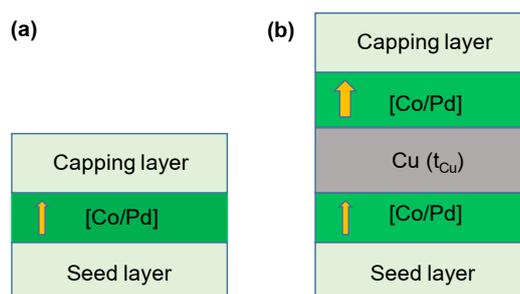
thay đổi ($t_{Cu}=0,6-6,0$ nm) được chế tạo. Sự ảnh hưởng của chiều dày lớp Cu lên tính chất từ của các SV được khảo sát một cách chi tiết.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Thực nghiệm

Các màng mỏng đa lớp được lắng đọng trên đế Si/SiO₂ bằng phún xạ magnetron trong chân không cao ($< 3 \times 10^{-8}$ Torr) với cấu trúc và độ dày danh định như sau:

- 1) Ta₃/Pd₃/[Co_{0,5}/Pd_{1,0}]₃/Pd₃/Ta₃ (ký hiệu [Co/Pd], mẫu đối chứng)
- 2) Ta₃/Pd₃/[Co_{0,5}/Pd_{1,0}]₃/Cu(t_{Cu})/[Co_{0,5}/Pd_{1,0}]₃/Pd₃/Ta₃ (ký hiệu [Co/Pd]/Cu(t_{Cu})/[Co/Pd]) ($t_{Cu}=0,3-6$ nm)



Hình 2. Cấu hình màng đa lớp (a) [Co/Pd] và (b) [Co/Pd]/Cu(t_{Cu})/[Co/Pd]

Mẫu màng [Co/Pd] (Hình 2a) được sử dụng như mẫu đối chứng để so sánh, làm rõ các tương tác từ và cơ chế đảo từ trong các SV (Hình 2b). Các thông số chiều dày trong tất cả các màng có đơn vị nm. Chiều dày của các lớp vật liệu và cấu trúc tối ưu được lựa chọn dựa trên các kết quả nghiên cứu của nhóm trước đó [19] trong đó độ dày của lớp Co là 0,5 nm, Pd là 1,0 nm [19], [20]. Lớp tạo mầm kép (seed layer) Ta (3 nm)/Pd (3 nm) được sử dụng nhằm tăng cường hướng mọc (111) cho các lớp vật liệu mọc phía trên và lớp phủ kép (capping layer) Pd (3 nm)/Ta (3 nm) được dùng để chống oxy hóa cho các lớp vật liệu phía dưới [19], [20].

Các thông số phún xạ được trình bày trong Bảng 1 là các thông số tối ưu đã được khảo sát một cách hệ thống để các màng đa lớp chế tạo được có dị hướng từ vuông góc tốt ở nhiệt độ phòng đồng thời đảm bảo sự lắng đọng đồng đều, lớp tiếp xúc giữa các lớp vật liệu là sắc nét và mức độ xen kẽ của Co/Pd là thấp [19], [20].

Bảng 1. Thông số phún xạ

STT	Bia phún xạ	Thông số phún xạ		
		Công suất (mT)	Áp suất (W)	Tốc độ phún xạ (Å/s)
1	Ta	2,5	175	0,72
2	Cu	2,5	175	1,48
2	Co	5	37,5	0,18
3	Pd	5	37,5	0,31

2.2. Các phương pháp đo đạc, khảo sát

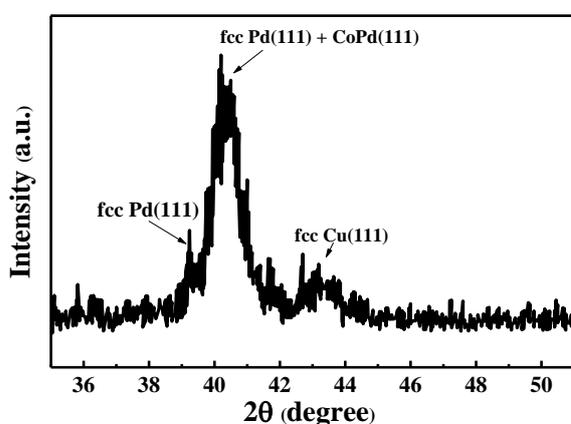
Sau khi lắng đọng, các mẫu được từ hóa trong từ trường vuông góc với mặt phẳng mẫu bằng hệ từ kế mẫu rung (VSM – VersaLab) với giá trị từ trường lớn nhất đạt được là 3 Tesla. Cấu trúc tinh thể của các mẫu được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ bột trên hệ nhiễu xạ tia X D8-ADVANCE của hãng Bruker (Đức) với điện áp 40 kV và dòng điện 40 mA sử dụng bức xạ Cu-K α ($\lambda = 1,5406$ Å), góc quét 2θ trong khoảng từ 20° đến 80°, tốc độ quét chậm với bước đo là 0,005 °/giây. Các phép đo được thực hiện ở nhiệt độ phòng.

3. Kết quả và bàn luận

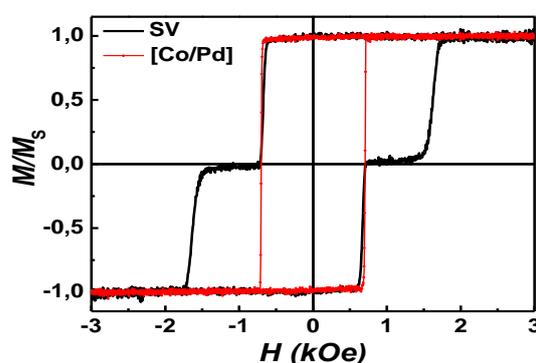
3.1. Đặc trưng cấu trúc của SV [Co/Pd]/Cu/[Co/Pd]

Hình 3 là giản đồ XRD của mẫu màng [Co/Pd]/Cu6/[Co/Pd]. Kết quả cho thấy có sự xuất hiện đỉnh nhiễu xạ có cường độ lớn ở khoảng $2\theta = 40,5^\circ$, đây là đỉnh tạo bởi sự chồng chập của các đỉnh nhiễu xạ fcc Pd(111) và CoPd(111), ngoài ra còn có thể quan sát được một đỉnh nhiễu xạ cường độ nhỏ, ở góc $2\theta = 39,9^\circ$ của Pd (111), và một đỉnh nhiễu xạ ở góc $42,5^\circ$ tương ứng với lớp ngăn cách Cu(111).

Có thể thấy rằng các vật liệu tạo thành SV bao gồm: lớp vật liệu chính [Co/Pd], lớp ngăn cách Cu, lớp đệm Ta, Pd và lớp phủ Pd, Ta đều có cấu trúc lập phương tâm mặt (fcc) với định hướng (111), định hướng này đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành màng đa lớp [Co/Pd] có định hướng từ vuông góc với tính ổn định từ cao [19], [20].



Hình 3. Giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu SV [Co/Pd]/Cu6/[Co/Pd]



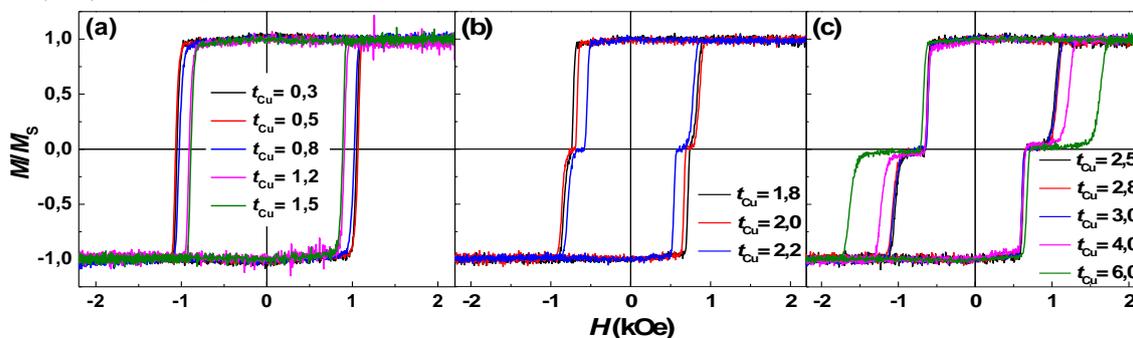
Hình 4. Đường cong từ hóa $M(H)$ chuẩn hóa theo M_s của màng mỏng đa lớp [Co/Pd] và SV [Co/Pd]/Cu6/[Co/Pd] đo theo phương vuông góc với mặt phẳng mẫu

3.2. Tính chất từ của màng [Co/Pd] và [Co/Pd]/Cu/[Co/Pd]

Đường cong từ hóa $M(H)$ chuẩn hóa theo M_s của màng mỏng đa lớp FM [Co/Pd] (màng đối chứng) và cấu trúc SV [Co/Pd]/Cu6/[Co/Pd] đo theo phương vuông góc ở nhiệt độ phòng được trình bày trên Hình 4. Kết quả cho thấy đường cong từ hóa theo phương vuông góc của màng đa lớp [Co/Pd] có dạng vuông, với độ vuông $S \sim 1$, trường khử từ H_C vào khoảng 675 Oe, điều này khẳng định rằng màng đa lớp [Co/Pd] đã chế tạo có tính dị hướng vuông góc cao ở nhiệt độ phòng. So với màng đa lớp [Co/Pd], đường cong từ hóa $M(H)$ của SV [Co/Pd]/Cu6/[Co/Pd] có dạng đảo từ 2 bậc (two-step switching), cho thấy sự đảo từ của hai lớp FM [Co/Pd] (lớp [Co/Pd] phía trên Cu và lớp [Co/Pd] phía dưới Cu) là độc lập, trong đó, tính chất từ của lớp [Co/Pd] nằm dưới lớp Cu (mọc trên lớp đệm Ta3/Pd3) là tương đương với màng đối chứng, lớp này đảo từ ở từ trường thấp $H_C = 675$ Oe, trong khi lớp [Co/Pd] nằm trên lớp Cu (mọc trên lớp Cu 6 nm) xảy ra đảo ở từ trường cao hơn nhiều $H_C = 1630$ Oe (Hình 4). Việc giá trị H_C của lớp [Co/Pd] nằm dưới lớp Cu trong SV [Co/Pd]/Cu6/[Co/Pd] và H_C của màng [Co/Pd] đối chứng như nhau cho thấy rằng sự có mặt của lớp [Co/Pd] nằm phía trên lớp Cu có độ dày 6 nm không ảnh hưởng đến tính chất từ và các thông số đảo từ của lớp [Co/Pd] phía dưới ở nhiệt độ phòng. Nói cách khác với chiều dày 6 nm, lớp ngăn cách Cu được coi là đủ dày để ngăn hai lớp [Co/Pd] tương tác nhau. Cũng có thể nói, dù cả hai lớp đệm Ta3/Pd3 và Cu6 đều phù hợp để tạo màng đa lớp [Co/Pd] có cấu trúc mạng lập phương tâm mặt (fcc) với hướng ưu tiên (111), vốn cần thiết cho việc hình thành màng [Co/Pd] có dị hướng từ vuông góc [19], [20], nhưng so với màng [Co/Pd] lắng đọng trên lớp Ta3/Pd3, màng [Co/Pd] hình thành trên Cu với cùng chiều dày là 6 nm cho thấy có sự gia tăng đáng kể giá trị H_C đồng nghĩa với sự gia tăng đáng kể tính dị hướng vuông góc của màng.

3.3. Tính chất từ của SV [Co/Pd]/Cu/[Co/Pd] ảnh hưởng bởi độ dày lớp ngăn cách Cu

Để nghiên cứu ảnh hưởng của độ dày lớp ngăn cách Cu đến tương tác trao đổi trong cấu trúc SV [Co/Pd]/Cu(t_{Cu})/[Co/Pd], tính chất từ của các SV với chiều dày lớp Cu thay đổi trong khoảng từ 0,3-6,0 nm được khảo sát.



Hình 5. Đường cong từ hóa $M(H)$ chuẩn hóa theo M_S của SV [Co/Pd]/Cu(t_{Cu})/[Co/Pd] với các độ dày lớp Cu khác nhau, $t_{Cu} = 0,3-6,0$ nm, đo theo phương vuông góc ở nhiệt độ phòng

Hình 5 thể hiện đường cong từ hóa $M(H)$ chuẩn hóa theo M_S của các SV [Co/Pd]/Cu(t_{Cu})/[Co/Pd] đo theo phương vuông góc ở nhiệt độ phòng. Hình 5a cho thấy khi $t_{Cu} \leq 1,5$ nm, đường cong từ hóa trơn tru, không có dạng bậc, điều này có thể được giải thích là do khi lớp Cu rất mỏng, tương tác giữa hai lớp FM là mạnh, tương ứng với kiểu tương tác trao đổi sắt từ mạnh, khi đó hai lớp FM được coi là gắn chặt vào nhau (rigid couple), khi đảo từ cũng sẽ có hiện tượng đảo từ đồng thời, giá trị H_C lớn. Nói cách khác khi lớp ngăn cách Cu rất mỏng $\sim 0,3-1,5$ nm, độ nhám của các mặt phân cách có thể lớn hơn độ dày của lớp Cu, vì vậy lớp Cu có thể không liên tục, hai lớp FM khi đó có thể coi là tiếp xúc trực tiếp với nhau qua các lỗ kim (pinholes), gần như không có sự phân cách. Với lớp Cu dày hơn, t_{Cu} trong khoảng 1,8-2,2 nm, tương tác trao đổi RKKY giữa hai lớp [Co/Pd] giảm dần theo t_{Cu} , tương tác giữa hai lớp FM yếu dần hai lớp không còn được gắn chặt vào nhau, dẫn đến quá trình đảo từ của hai lớp xảy ra ở hai giá trị từ trường khác nhau, đường cong từ hóa biểu hiện dạng 2 bậc (Hình 5b). Khi độ dày lớp Cu tiếp tục tăng, $t_{Cu} \geq 2,5$ nm tương tác giữa hai lớp FM trở nên rất yếu, thậm chí có thể coi là không có tương tác (Hình 5c), hai lớp FM khi đó thể hiện sự đảo từ hoàn toàn độc lập, đường cong từ hóa khi đó có dạng 2 bậc rõ rệt.

Các giá trị H_C của lớp [Co/Pd] trên và dưới trong SV được thống kê trong Hình 6, trong đó hiển thị thêm các giá trị H_C cho các SV trong trường hợp liên kết RKKY kiểu sắt từ mạnh và đảo từ xảy ra đồng thời ($t_{Cu} \leq 1,5$ nm).

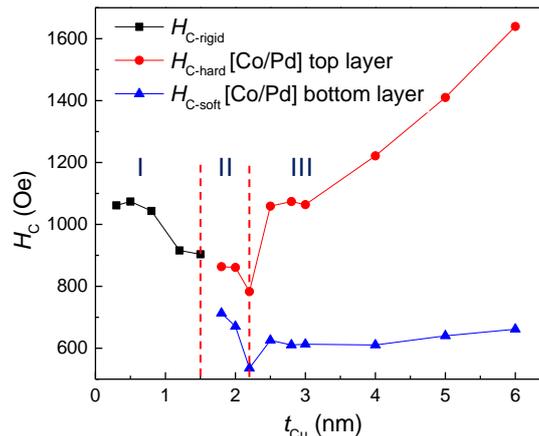
Có thể thấy rõ sự phụ thuộc H_C vào t_{Cu} là không đơn điệu (Hình 6) và chia thành 3 vùng rõ rệt:

Vùng I: với $t_{Cu} \leq 1,5$ nm (tương ứng với Hình 5a), hai lớp FM liên kết mạnh và gắn chặt với nhau, quá trình đảo từ trong hai lớp xảy ra đồng thời, tương ứng với giá trị H_C cao. Khi t_{Cu} tăng, tương tác trao đổi giữa 2 lớp FM giảm dần, H_C giảm dần.

Vùng II: $1,6 \text{ nm} < t_{Cu} \leq 2,2$ nm (tương ứng với Hình 5b), tương tác giữa hai lớp FM giảm dần khi t_{Cu} tăng, liên kết giữa hai lớp FM trở lên yếu dần, hai lớp không còn gắn chặt với nhau, đường từ hóa khi đó có đặc trưng 2 bậc, thể hiện sự đảo từ tương đối độc lập của hai lớp [Co/Pd]. Trong khoảng chiều dày này, $t_{Cu} = 1,6 \text{ nm} - 2,2$ nm, liên kết/tương tác giữa hai lớp FM dù yếu nhưng vẫn còn tồn tại do đó khi t_{Cu} tăng, H_C của cả hai lớp FM đều giảm và đạt các giá trị nhỏ nhất khi $t_{Cu} = 2,2$ nm, thể hiện sự giảm dần của tương tác trao đổi khi lớp ngăn cách Cu tăng lên.

Vùng III: khi $t_{Cu} > 2,2$ nm (tương ứng với Hình 5c), giá trị H_C tăng đáng kể đối với lớp [Co/Pd] phía trên nhưng hầu như không thay đổi đối với lớp [Co/Pd] phía dưới, điều này cho thấy các lớp FM có thể coi là không còn tương tác trao đổi. Các lớp [Co/Pd] trên và dưới trong trường hợp này được coi như hoàn toàn độc lập nhau, quá trình từ hóa trong hai lớp cũng diễn ra độc lập nhau. Giá trị H_C của lớp FM phía trên tăng theo chiều dày lớp Cu đơn thuần là do lớp Cu,

trong trường hợp, này ngoài vai trò là lớp ngăn cách, còn đóng vai trò là lớp tạo mầm cho lớp [Co/Pd] phía trên để hình thành cấu trúc fcc (111), định hướng cần thiết để màng [Co/Pd] có dị hướng từ vuông góc cao [19], [20]. Lớp Cu càng dày thì màng [Co/Pd] mọc trên nó có cấu trúc (111) càng hoàn hảo, tính dị hướng vuông góc của màng càng cao, do đó giá trị H_C đạt được càng lớn, điều này cũng phù hợp với các báo cáo trước đây [21]. Trong khi đó tính chất từ của lớp FM bên dưới, cụ thể là giá trị H_C , hầu như không phụ thuộc vào sự thay đổi của chiều dày lớp Cu khi $t_{Cu} > 2,2$ nm, điều này có thể giải thích là do chất lượng tinh thể của lớp FM phía dưới phụ thuộc chủ yếu vào lớp tạo mầm Ta5/Pd3 mà không phụ thuộc vào lớp Cu phủ trên nó.



Hình 6. Sự phụ thuộc của H_C của lớp FM trên và dưới trong SV [Co/Pd]/Cu(t_{Cu})/[Co/Pd] vào độ dày của Cu đo theo phương vuông góc ở nhiệt độ phòng

4. Kết luận

Màng đa lớp có cấu trúc SV [Co/Pd]/Cu(t_{Cu})/[Co/Pd] ($t_{Cu}=0,6-6$ nm) với dị hướng từ vuông góc ở nhiệt độ phòng đã được chế tạo và khảo sát một cách hệ thống. Kết quả khảo sát cho thấy các lớp FM [Co/Pd] (cả lớp trên và lớp dưới), đều có cấu trúc mạng lập phương tâm mặt (fcc) với định hướng (111), định hướng này là cần thiết cho việc hình thành màng [Co/Pd] có dị hướng từ vuông góc cao. Chiều dày lớp ngăn cách Cu có ảnh hưởng rõ rệt tới tương tác từ cũng như trường đảo từ trong các SV. Kết quả nghiên cứu chỉ ra khả năng thiết kế cấu trúc SV bằng cách thay đổi độ dày lớp ngăn cách, điều này mở ra khả năng điều biến các tương tác từ cũng như tính chất từ và từ trở trong các SV có cấu trúc đa lớp loại này nhằm ứng dụng cho các linh kiện Spintronics thế hệ mới với dị hướng từ vuông góc.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện với sự hỗ trợ về kinh phí của Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam thông qua Nhiệm vụ HTQT mã số QTBY01.02/23-24.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, *et al.*, "Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices," *Physical Review Letters*, vol. 61, p. 2472, 1988.
- [2] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange," *Physical Review B*, vol. 39, p. 4828, 1989.
- [3] B. Dieny, V. S. Speriosu, S. S. P. Parkin, *et al.*, "Giant magnetoresistive in soft ferromagnetic multilayers," *Physical Review B*, vol. 43, p. 1297, 1991.
- [4] C. Safranski, E. A. Montoya, and I. N. Krivorotov, "Spin-orbit torque driven by a planar Hall current," *Nature Nanotechnology*, vol. 14, no. 1, pp. 27-30, 2019.

- [5] R. Mardani, "Fabrication of FM/NM/FM hetero-structure multilayers and investigation on structural and magnetic properties: application in GMI magnetic sensors," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 33, pp. 503-509, 2020.
- [6] M. L. Pankratova and A. S. Kovalev, "Model of exchange bias in a trilayer FM/AFM/FM structure," *Low Temperature Physics*, vol. 41, pp. 838-844, 2015.
- [7] T. Kasuya, "A theory of metallic ferro- and antiferromagnetism on Zener's model," *Progress of Theoretical Physics*, vol. 16, no. 1, pp. 45-57, 1956.
- [8] M. A. Ruderman and C. Kittel, "Indirect Exchange Coupling of Nuclear Magnetic Moments by Conduction Electrons," *Physical Review*, vol. 96, p. 99, 1954.
- [9] K. Yosida, "Magnetic Properties of Cu-Mn Alloys," *Physical Review*, vol. 106, p. 893, 1957.
- [10] P. Bruno and C. Chappert, "Ruderman-Kittel theory of oscillatory interlayer exchange coupling," *Physical Review B*, vol. 46, p. 261, 1992.
- [11] S. S. P. Parkin, "Systematic variation of the strength and oscillation period of indirect magnetic exchange coupling through the 3d, 4d, and 5d transition metals," *Physical Review Letters*, vol. 67, p. 3598, 1991.
- [12] Y. Pennec, J. Camarero, J. C. Toussaint, *et al.*, "Switching-mode-dependent magnetic interlayer coupling strength in spin valves and magnetic tunnel junctions," *Physical Review B*, vol. 69, p. 180402, 2004.
- [13] R. Coehoorn, M. T. Johnson, W. Folkerts, S. T. Purcell, N. W. E. McGee, A. D. Veirman, and P. J. H. Bloemen, "Oscillatory Interlayer Exchange Interaction and Magnetoresistance in Co/Cu and Fe/Cu Systems," *Magnetism and Structure in Systems of Reduced Dimension*, NATO ASI Series, Springer, vol. 309, pp. 295-308, 1993.
- [14] J. X. Li, M. W. Jia, L. Sun, *et al.*, "Oscillatory Anisotropic Magnetoresistance Arising From Quantum Well States in Au/Fe(001) Bilayers," *IEEE Magnetics Letters*, vol. 6, pp. 1-4, 2015.
- [15] H. A. Wierenga, W. D. Long, M. W. J. Prins, *et al.*, "Interface magnetism and possible quantum well oscillations in ultrathin Co/Cu films observed by magnetization induced second harmonic generation," *Physical Review Letters*, vol. 74, no. 8, pp. 1462-1465, 1995.
- [16] W. Weber, C. H. Back, A. Bischof, C. Würsch, and R. Allenspach, "Morphology-Induced Oscillations of the Magnetic Anisotropy in Ultrathin Co Films," *Physical Review Letters*, vol. 76, p. 1940, 1996.
- [17] C. D. Stanciu, F. Hansteen, A. V. Kimel, *et al.*, "All-Optical Magnetic Recording with Circularly Polarized Light," *Physical Review Letters*, vol. 99, p. 47601, 2007.
- [18] T. Li, A. Patz, L. Mouchliadis, J. Yan, *et al.*, "Femtosecond switching of magnetism via strongly correlated spin-charge quantum excitations," *Nature*, vol. 496, pp. 69-73, 2013.
- [19] T. T. H. Cao, H. K. Vu, T. T. T. Nguyen, T. H. Nguyen, *et al.*, "Tailoring perpendicular magnetic anisotropy in [Co/Pd] multilayers," (in Vietnamese), *Journal of Military Science and Technology*, vol. 66, no. 4, pp. 173-177, 2020.
- [20] W.-B Wu, J. Kasiuk, J. Przewoźnik, *et al.*, "Fundamentally Different Magnetoresistance Mechanisms in Related Co/Pd and Co/Pt Multilayers for Spintronic Applications," *Materials Transactions*, vol. 64, no. 9, pp. 2124-2127, 2023.
- [21] S. Tsunashima, M. Hasegawa, K. Nakamura, and S. Uchiyama, "Perpendicular magnetic anisotropy and coercivity of Pd/Co and Pt/Co multilayers with buffer layers," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 93, pp. 465-468, 1991.