

NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT TỪ PHỤ THUỘC VÀO BIẾN DẠNG CỦA MÀNG ĐA LỚP SẮT TỪ CoFeB/Pd TRÊN ĐỂ POLYIMIDE

Nguyễn Lê Thi¹, Phạm Thị Hà¹, Lương Thị Kim Phượng¹

TÓM TẮT

Trong những năm gần đây, màng mỏng từ được lắng đọng trên các đế mềm dẻo đã thu hút được sự quan tâm lớn từ cộng đồng nghiên cứu do khả năng điều chỉnh tính chất từ thông qua ứng suất/biến dạng. Nghiên cứu này trình bày kết quả khảo sát thực nghiệm trên màng mỏng đa lớp sắt từ CoFeB/Pd với các độ dày khác nhau là 0,4 nm và 1,3 nm. Biến dạng uốn được tạo ra bằng cách sử dụng các khuôn dạng hình cong có đường kính thay đổi, đồng thời kết hợp với phép đo hiệu ứng quang từ Kerr (Magneto-Optical Kerr Effect - MOKE) để quan sát sự biến đổi tính chất từ tính. Các tham số từ dư chuẩn hóa và lực kháng từ của màng đa lớp dưới các mức biến dạng khác nhau đã được phân tích chi tiết, kết quả cho thấy sự phụ thuộc rõ rệt của tính chất từ vào biến dạng cơ học trên đế mềm dẻo polyimide.

Từ khóa: Polyimide, màng mỏng từ, biến dạng, CoFeB/Pd, hiệu ứng quang từ.

DOI: <https://doi.org/10.70117/hdujs.84.2.2026.1021>

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

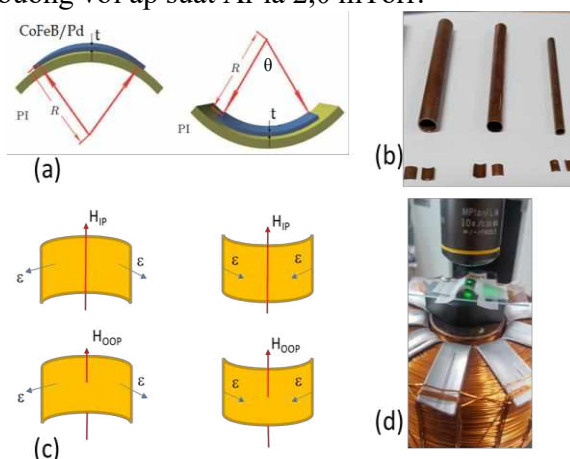
Màng mỏng đa lớp sắt từ với tính dị hướng từ vuông góc (Perpendicular Magnetic Anisotropy - PMA) đã thu hút được sự quan tâm đáng kể nhờ vào các đặc tính đầy hứa hẹn và tiềm năng ứng dụng của chúng trong lĩnh vực spintronics. Gần đây, các linh kiện điện từ được chế tạo trên các đế mềm dẻo có một số ưu điểm so với các linh kiện trên đế cứng thông thường như khối lượng nhẹ, mềm dẻo cơ học, độ bền được nâng cao và chi phí thấp [1-4]. Đối với các vật liệu từ, đặc trưng về đường cong từ trễ (M-H) là thông số vô cùng quan trọng để đánh giá tính chất của vật liệu và từ đó quyết định đến khả năng ứng dụng của vật liệu đó. Việc điều khiển các đặc tính từ thông qua biến dạng cơ học trong màng mỏng từ đa lớp trên đế mềm dẻo được xem là một hướng nghiên cứu hấp dẫn từ quan điểm nghiên cứu cơ bản lẫn tiềm năng ứng dụng. Nhiều nghiên cứu đã được tiến hành nhằm thay đổi và kiểm soát các tính chất từ trong màng đa lớp, đặc biệt là trên các đế mềm dẻo [5-7]. Màng mỏng CoFeB thể hiện sự phân cực spin cao, sự từ hóa bão hòa ở mức vừa phải, điều này cần thiết cho việc giảm mật độ dòng yêu cầu cho các chuyển mạch spin [8]. Sự kết hợp giữa lớp CoFeB và các lớp xen kẽ kim loại hiếm (Pd, Pt) nâng cao tính dị hướng từ vuông góc trong các màng đa lớp sắt từ, có lợi hơn trong bộ nhớ từ tính (Magnetoresistive Random Access Memory - MRAM) dựa vào cơ chế ghi từ vuông góc [9]. Các biến dạng cơ học của màng mỏng cũng đã được biết đến như biến dạng epitaxi [10], hay sử dụng vật liệu áp điện (Piezoelectric Crystal) [11]. Tuy nhiên, các loại biến dạng này chỉ được sử dụng cho các màng mỏng chế tạo trên đế cứng thông thường với độ

¹Khoa Kỹ thuật, Công nghệ và Truyền thông, Trường Đại học Hồng Đức; Email: nguyenlethi@hdu.edu.vn

biến dạng nhỏ. Do đó, đối với vật liệu từ được phủ trên đế mềm dẻo sẽ chịu được những biến dạng lớn hơn. Ứng suất của đế được truyền hoàn toàn cho màng mỏng từ [12][13]. Các đế mềm dẻo chứa màng mỏng từ đòi hỏi phải có độ ổn định về nhiệt và cấu trúc, với những yêu cầu này polyimide (PI) được sử dụng phổ biến làm đế mềm dẻo cho màng mỏng từ [14][15]. Khi vật liệu từ được phủ lên các đế mềm dẻo, bất kỳ biến dạng nào của đế đều có thể gây ra biến dạng kéo hoặc nén trong lớp từ, từ đó có thể làm thay đổi trường dị hướng của nó [16][17]. Tính dị hướng từ là một trong những thông số nội tại quan trọng của vật liệu từ tính, không chỉ xác định hướng mômen từ và lực kháng từ của vật liệu mà còn ảnh hưởng đến tần số làm việc và mức tiêu thụ điện năng của các thiết bị từ. Do đó, nghiên cứu cách điều chỉnh tính dị hướng từ và hiểu biết về cơ chế điều khiển của màng mỏng đa lớp CoFeB/Pd dưới tác dụng của biến dạng để ứng dụng trong các thiết bị spintronics linh hoạt trở thành vấn đề cốt lõi trong vật liệu từ. Cho đến nay, hầu như chưa có nghiên cứu về sự phụ thuộc của tính chất từ theo biến dạng của màng mỏng đa lớp sắt từ CoFeB/Pd. Trong công trình này, chúng tôi nghiên cứu một cách có hệ thống ảnh hưởng của biến dạng kéo và nén đến các thông số từ tính như từ dư (được miêu tả dưới dạng từ dư chuẩn hóa M_r/M_s) và lực kháng từ (H_C). Những kết quả này có ý nghĩa quan trọng đối với sự phát triển của các thiết bị spintronics linh hoạt.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

Màng mỏng đa lớp sắt từ bao gồm các lớp Ta (3 nm)/Pt (3 nm)/CoFeB (t nm)/Pd (1 nm)/Ta (2 nm) ($t = 0,4$ nm và 1,3 nm) được lắng đọng trên đế polyimide dày 50 μm bằng phương pháp phún xạ magnetron DC. Đế PI được sử dụng là loại polyimide thương mại (Kapton của Dupont). Thành phần CoFeB được chọn với tỷ lệ 40:40:20, do thành phần này thể hiện sự phân cực spin đáng kể [18]. Lớp đệm Ta (3 nm)/Pt (3 nm) dùng để tăng cường độ bám dính và đạt được hình thái bề mặt mong muốn. Ngoài ra, một lớp phủ Ta (2 nm) được dùng để ngăn ngừa quá trình oxy hóa. Trước khi tiến hành lắng đọng, đế PI được làm sạch bằng cách rửa siêu âm trong ethanol trong 5 phút. Quá trình phún xạ được thực hiện trong buồng với áp suất Ar là 2,0 mTorr.



Hình 1. (a) Biến dạng kéo và nén, (b) Các khuôn đồng có đường kính khác nhau, (c) Hướng của từ trường tác dụng vào bề mặt mẫu dưới biến dạng cong, (d) Phép đo MOKE

Dựa vào định nghĩa của biến dạng, độ biến dạng ε có thể được biểu diễn như sau:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1)$$

Trong đó, l là độ dài trên bề mặt sau biến dạng, l_0 là độ dài ban đầu trước khi biến dạng. Mỗi quan hệ hình học trong thiết bị thực nghiệm được biểu diễn trên hình 1(a). Do vậy, độ biến dạng có thể được biểu diễn là:

$$\varepsilon = \frac{R2\theta - \left(R - \frac{1}{2}d\right)2\theta}{\left(R - \frac{1}{2}d\right)2\theta} = \frac{d}{2R - d} \quad (2)$$

Do đó, chúng ta có thể thu được: $\varepsilon_{\pm} = \frac{d}{2R \pm d}$, ε_+ kí hiệu cho biến dạng kéo, ε_- kí hiệu cho biến dạng nén, tham số R là bán kính cong của khuôn, θ là góc quét trên bán kính cong R , d là độ dày của màng mỏng và để [19-22]. Để tạo ra biến dạng kéo và nén, màng mỏng mềm dẻo CoFeB/Pd đã được gắn vào các khuôn lồi, lõm bằng cách sử dụng băng dính Kapton.

Một bộ ba khuôn đồng bao gồm cả khuôn lồi và lõm được tạo ra bằng cách sử dụng các ống đồng hình trụ. Các khuôn này tạo ra các biến dạng kéo và nén khác nhau ($\varepsilon_+ = 0,31\%, 0,44\%, 0,62\%$ và $\varepsilon_- = -0,31\%, -0,44\%, -0,62\%$), như được mô tả trong hình 1(b) và bảng 1. Ứng suất gây ra trên màng mỏng có thể được tính toán bằng định luật Hooke (công thức 3), mô tả mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trong màng mỏng.

$$\sigma = \varepsilon \times E_f / (1 - \nu^2) \quad (3)$$

Trong đó E_f là mô-đun Young ($E_f = 160$ GPa đối với CoFeB), ν hệ số Poisson ($\nu = 0,3$ đối với kim loại) và σ là ứng suất [22]. Từ trường tác dụng lên màng mỏng theo các hướng vuông góc và song song như trên hình 1(c). Hệ đo hiệu ứng quang từ Kerr được sử dụng để xác định tính chất từ phụ thuộc vào biến dạng của màng mỏng.

Bảng 1. Bán kính cong của khuôn, giá trị tính toán của ứng suất và biến dạng

R (mm)	ε (%)	σ (GPa)
8	0,31	0,55
5,7	0,44	0,77
4,02	0,62	1,09

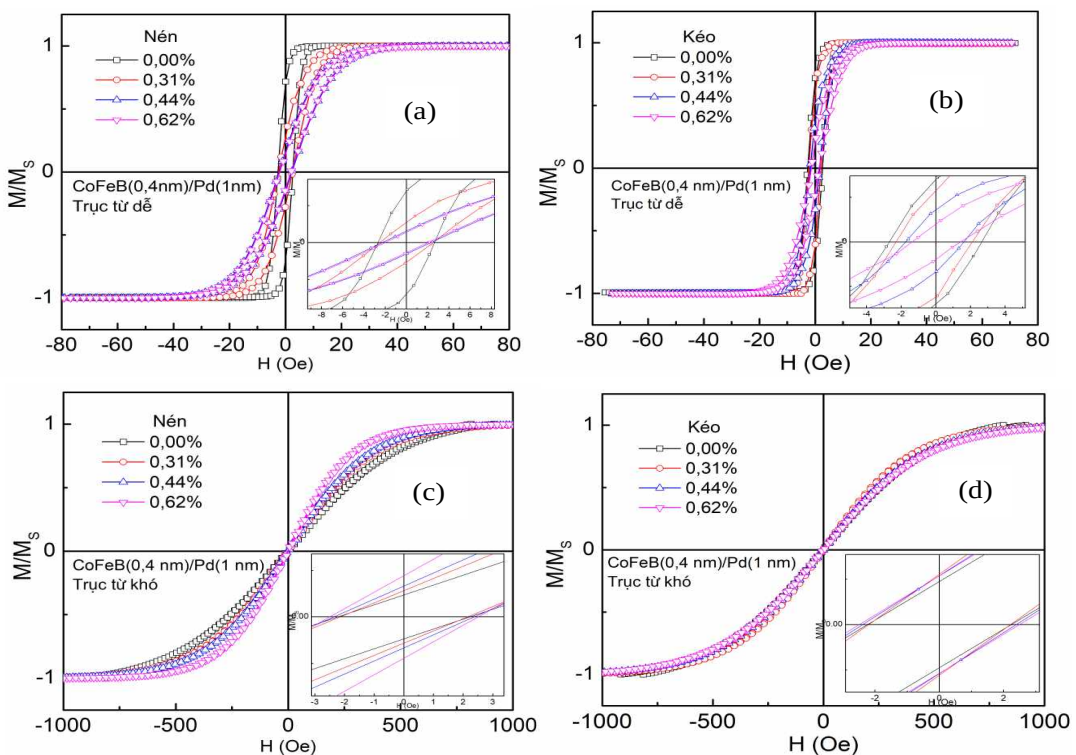
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đường cong từ trễ của màng đa lớp CoFeB (0,4 nm)/Pd (1 nm) dưới biến dạng khác nhau theo các trục từ dễ và trục từ khó

Hình 2 (a-d) mô tả đường cong từ trễ cho màng đa lớp CoFeB (0,4 nm)/Pd (1 nm) chịu biến dạng theo cả trục từ dễ (Easy Axis - EA) và trục từ khó (Hard Axis - HA). Các mức biến dạng được thay đổi tăng dần tại các giá trị 0,31%, 0,44% và 0,62% bằng cách thay đổi bán kính cong của khuôn. Khi mẫu chịu biến dạng nén và kéo dọc theo EA như

trong hình 2 (a, b), dạng đường cong từ trễ vuông góc bị thay đổi. Đường cong từ trễ dưới biến dạng nén thay đổi nhiều hơn đường cong từ trễ dưới biến dạng kéo, hình dạng đường cong từ trễ nghiêng đi một cách đồng đều từ hình dạng vuông góc ban đầu, cho thấy sự thay đổi theo hướng EA xảy ra dễ dàng, điều này có thể do sự thay đổi cấu trúc hoặc tương tác từ trong lớp màng dưới tác động cơ học làm ảnh hưởng đến trường dị hướng. Ngược lại, khi đo dọc theo trục từ khó biểu diễn trong hình 2 (c, d), các hình dạng đường cong từ trễ cũng gần như không thay đổi đáng kể đối với các biến dạng tác dụng khác nhau, cho thấy tính dị hướng theo HA ổn định hơn dưới tác động của ứng suất cơ học. Đồng thời, việc cần từ trường lớn hơn để đường từ hóa đạt bão hòa theo trục từ khó chứng tỏ hướng này vốn là hướng khó từ hóa, ít bị ảnh hưởng sự biến đổi cơ học hơn, có khả năng duy trì cấu trúc từ ổn định hơn.

Sự khác biệt này là đặc trưng cho các màng mỏng từ có dị hướng từ vuông góc, ở đó trục từ dễ là hướng mà mômen từ hóa có thể định hướng và thay đổi dễ dàng hơn, trong khi trục từ khó tạo ra rào cản lớn hơn cho sự thay đổi mômen từ dưới tác dụng của từ trường và ứng suất. Kết quả này nhấn mạnh tầm quan trọng trong việc kiểm soát và thiết kế cấu trúc dị hướng từ, đặc biệt khi ứng dụng trong thiết bị spintronics trên đế mềm dẻo, nơi mà biến dạng cơ học là điều không tránh khỏi nhưng cần duy trì tính chất từ ổn định theo từng hướng cụ thể.

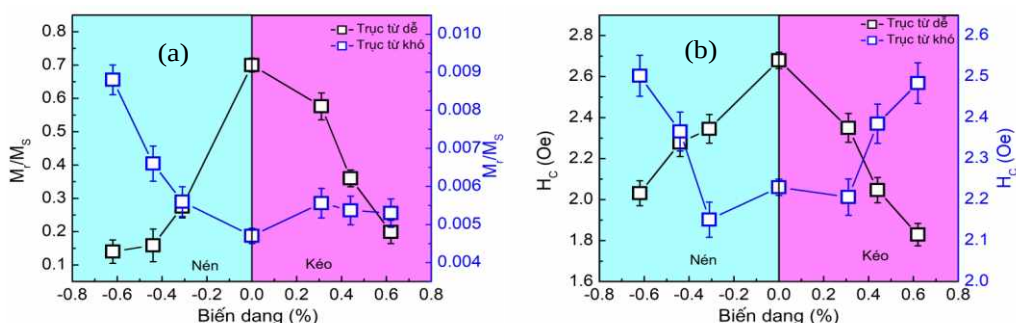


Hình 2. Các đường cong từ trễ của màng mỏng đa lớp dưới biến dạng khác nhau: (a) Biến dạng nén dọc theo EA, (b) Biến dạng kéo dọc theo EA, (c) Biến dạng nén dọc theo HA, (d) Biến dạng kéo dọc theo HA

Khi màng mỏng đa lớp sắt từ CoFeB/Pd chịu biến dạng nén, đặc biệt dọc theo trục từ dễ, đường cong từ trễ có xu hướng trở nên nghiêng và không còn giữ nguyên hình dạng vuông góc ban đầu. Điều này cho thấy rằng biến dạng nén làm tăng sự tương tác nội tại trong lớp từ, có thể gây biến đổi trường dị hướng từ và ảnh hưởng lên năng lượng từ hóa. Biến dạng nén làm tăng lực kháng từ và có thể làm cho sự chuyển pha hay dịch chuyển vách đômen trở nên khó hơn, từ đó làm giảm tính từ hóa nhanh của màng. Ngược lại, khi chịu biến dạng kéo, đường cong từ trễ cũng biến đổi nhưng mức độ thay đổi nhỏ hơn so với biến dạng nén. Điều này cho thấy rằng ứng suất kéo có tác động nhẹ nhàng hơn lên cấu trúc từ, có thể làm giảm nhẹ trường dị hướng mà không gây thay đổi lớn như biến dạng nén. Do đó, màng vẫn giữ được tính chất từ gần với trạng thái ban đầu hơn khi chịu biến dạng kéo. Ở trục từ khó, biến dạng kéo và nén gần như không làm ảnh hưởng đáng kể đến hình dạng và độ rộng đường cong từ trễ, đồng thời từ trường cần thiết để đạt bão hòa từ hóa lớn, thể hiện rằng màng có sự ổn định từ cao ở hướng này bất kể biến dạng. Sự khác biệt giữa tác động của biến dạng kéo và nén trên đường cong từ trễ có thể được giải thích dựa trên cơ chế ứng suất nội trong màng mỏng từ, ảnh hưởng đến sự liên kết và hướng dị hướng từ. Biến dạng nén kích thích những thay đổi cấu trúc tinh thể, hoặc làm tăng mật độ vách đômen, dẫn đến tăng cường năng lượng dị hướng. Biến dạng kéo có thể làm giãn nở cấu trúc nhưng không làm tăng cường tương tác từ phức tạp như biến dạng nén.

3.2. Sự phụ thuộc vào biến dạng của từ dư chuẩn hóa và lực kháng từ của màng đa lớp CoFeB (0,4 nm)/Pd (1 nm)

Tỷ lệ từ dư M_r/M_s và lực kháng từ dọc theo EA và HA thu được từ hình 2 được thể hiện trên đồ thị hình 3. Theo trục từ dễ, màng mỏng CoFeB/Pd phản ứng mạnh hơn với biến dạng nén so với biến dạng kéo. Cụ thể, M_r/M_s giảm từ 0,7 xuống còn 0,14 dưới biến dạng nén tối đa -0,62%, trong khi dưới biến dạng kéo tối đa 0,62%, M_r/M_s giảm nhẹ hơn đến khoảng 0,2. Tương tự, lực kháng từ giảm từ 2,7 Oe xuống còn 2 Oe tại biến dạng nén tối đa và còn 1,4 Oe tại biến dạng kéo tối đa. Điều này chứng tỏ biến dạng nén làm giảm đáng kể từ dư và lực kháng từ của màng theo hướng EA, có thể do sự thay đổi mạnh trường dị hướng từ và cấu trúc đômen từ trong màng. Theo trục từ khó, hiện tượng trái ngược xảy ra khi M_r/M_s gia tăng nhẹ từ 0,0047 đến 0,0088 và 0,0053 đối với biến dạng nén và kéo tương ứng. H_c cũng tăng từ 2,2 Oe lên gần 2,5 Oe với mức biến dạng cao nhất. Hiện tượng này cho thấy biến dạng cơ học làm tăng cường tính dị hướng theo hướng HA, thể hiện sự thay đổi của trường dị hướng do hiệu ứng liên kết cơ - từ giữa lớp màng CoFeB và Pd [19].

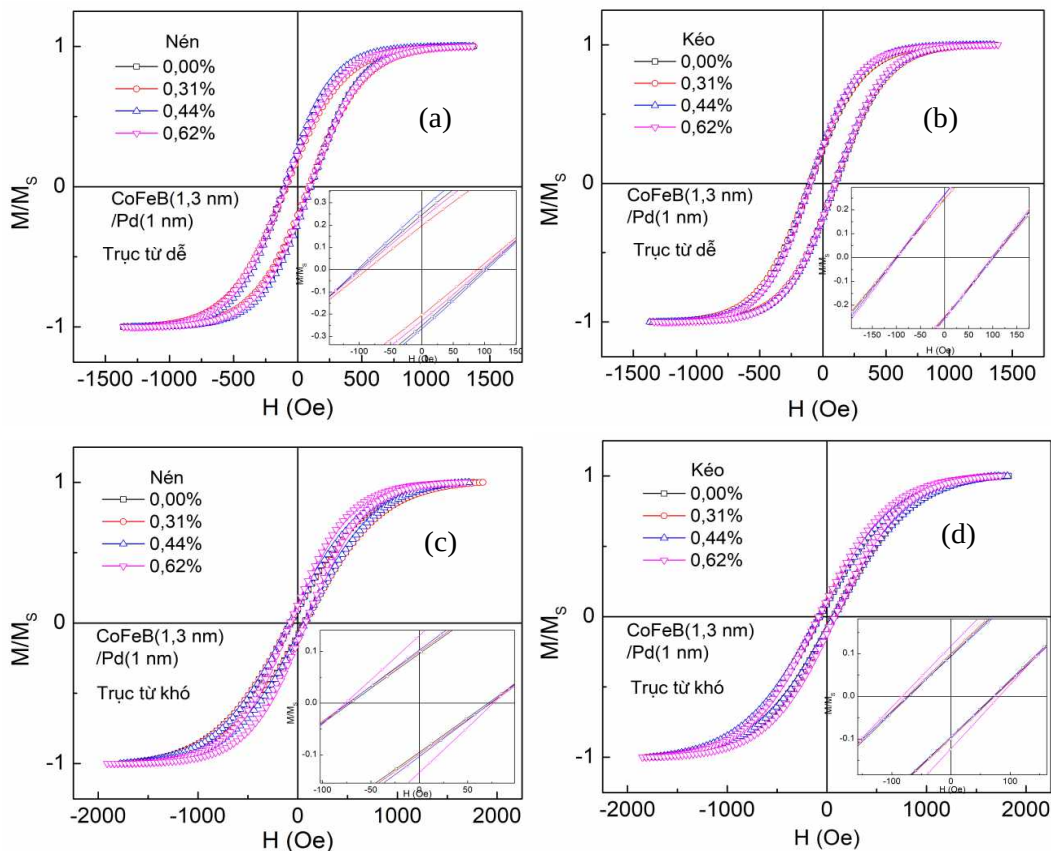


Hình 3. Tính chất từ của màng đa lớp CoFeB/Pd dưới biến dạng: (a) Tỷ lệ từ dư M_r/M_s theo EA và HA, (b) Lực kháng từ theo trục từ dễ và trục từ khó

Kết quả cho thấy biến dạng tác động đến trường dị hướng một cách có hệ thống, làm thay đổi đáng kể từ dư và lực kháng từ theo cả hai trục từ dễ và khó. Điều này cung cấp bằng chứng cho khả năng điều chỉnh linh hoạt trường dị hướng, có khả năng biến đổi từ từ dễ thành trục từ khó và ngược lại dưới biến dạng cơ học. Những kết quả này có ý nghĩa quan trọng trong việc điều khiển các tính chất từ của màng mỏng trong thiết bị spintronics linh hoạt, nơi biến dạng cơ học không thể tránh khỏi mà vẫn cần duy trì hoặc điều chỉnh hiệu suất từ mong muốn trong ứng dụng thực tế.

3.3. Đường cong từ trễ của màng đa lớp CoFeB (1,3 nm)/Pd (1 nm) dưới biến dạng khác nhau theo các trục từ dễ và trục từ khó

Dựa trên quá trình khảo sát tương tự như đối với màng mỏng đa lớp CoFeB (0,4 nm)/Pd (1 nm) có dị hướng từ vuông góc, màng đa lớp CoFeB (1,3 nm)/Pd (1 nm) cũng thể hiện tính dị hướng từ trong mặt phẳng. Các đường cong từ trễ theo trục từ dễ và trục từ khó dưới các mức biến dạng khác nhau được trình bày trong hình 4 (a-d). Kết quả cho thấy hình dạng đường cong từ trễ hầu như không thay đổi khi chịu các biến dạng khác nhau, đặc biệt đối với biến dạng kéo, các đường cong từ trễ gần như chồng lên nhau ở các mức biến dạng khác nhau.

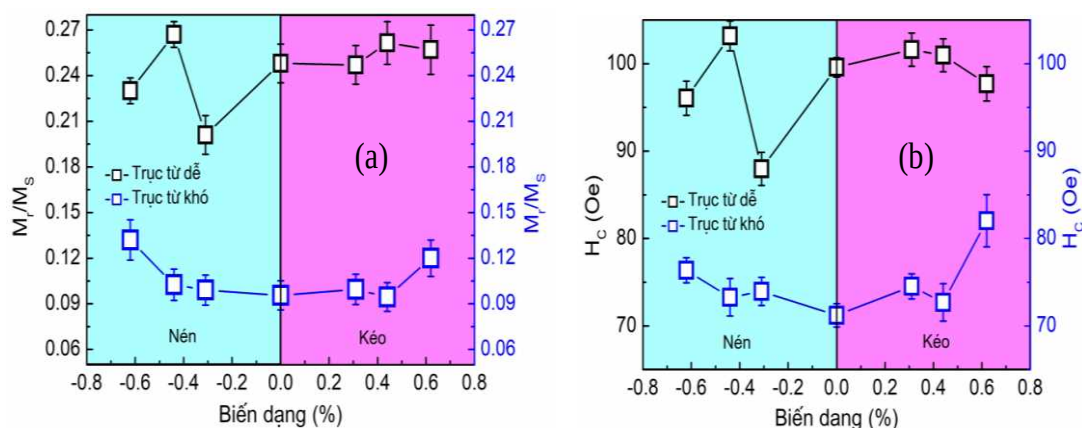


Hình 4. Các đường cong từ trễ của màng mỏng đa lớp dưới biến dạng khác nhau: (a) Biến dạng nén dọc theo EA, (b) Biến dạng kéo dọc theo EA, (c) Biến dạng nén dọc theo HA, (d) Biến dạng kéo dọc theo HA

Kết quả trên cho thấy tính ổn định từ tính của màng mỏng CoFeB (1,3 nm)/Pd (1 nm) dưới ảnh hưởng biến dạng cơ học khác nhau, đặc biệt với tính dị hướng từ trong mặt phẳng. Việc biến dạng không làm thay đổi đáng kể từ dư chuẩn hóa M_r/M_s cũng như lực kháng từ H_C thể hiện khả năng duy trì trạng thái từ hóa và cấu trúc đômên từ khá ổn định. Điều này có thể được lý giải bởi độ dày lớn hơn của lớp CoFeB (1,3 nm so với 0,4 nm) dẫn đến từ tính mạnh và ít bị ảnh hưởng bởi sự biến dạng cơ học so với lớp màng mỏng hơn. Ngoài ra, tính dị hướng từ trong mặt phẳng cũng ít nhạy hơn với biến dạng cơ học so với dị hướng từ vuông góc.

3.4. Sự phụ thuộc vào biến dạng của từ dư chuẩn hóa và lực kháng từ của màng đa lớp CoFeB (1,3 nm)/Pd (1 nm)

Các thông số từ tính từ dư chuẩn hóa M_r/M_s và lực kháng từ H_C của màng mỏng CoFeB (1,3 nm)/Pd (1 nm) được mô tả trong hình 5 (a,b) cho thấy sự phụ thuộc vào biến dạng cơ học dọc theo trục từ hóa dễ (mặt phẳng). Màng mỏng từ biểu hiện khả năng đáp ứng tốt hơn với biến dạng nén so với biến dạng kéo. Cụ thể, M_r/M_s và H_C đều tăng nhẹ khi biến dạng nén tăng lên, phản ánh sự gia tăng của trường dị hướng từ và sự ổn định từ hóa trong màng dưới tác dụng biến dạng nén. Ngược lại, dưới biến dạng kéo, các thay đổi của M_r/M_s và H_C rất nhỏ, gần như không đáng kể, cho thấy màng duy trì tính chất từ gần như không thay đổi. Kết quả quan sát này được giải thích bằng ảnh hưởng của hiệu ứng liên kết cơ - từ, trong đó biến dạng nén có xu hướng làm tăng năng lượng dị hướng dẫn đến tăng lực kháng từ. Biến dạng kéo ít ảnh hưởng đến cấu trúc từ và trường dị hướng nên các tham số từ thay đổi không đáng kể.



Hình 5. Tính chất từ của màng đa lớp CoFeB/Pd dưới biến dạng: (a) Tỷ lệ từ dư M_r/M_s theo EA và HA, (b) Lực kháng từ theo trục từ dễ và trục từ khó

So với màng mỏng đa lớp CoFeB (0,4 nm)/Pd (1 nm) đã được nghiên cứu ở trên, màng dày hơn (1,3 nm) thể hiện sự ổn định từ tính cao hơn dưới các điều kiện biến dạng cơ học. Ở màng mỏng CoFeB (0,4 nm), các biến dạng nén và kéo đều gây ra những thay đổi đáng kể về M_r/M_s và H_C , cho thấy tính dị hướng từ dễ dàng bị điều chỉnh thông qua biến dạng. Trong khi đó, màng dày hơn ít nhạy với biến dạng, đặc biệt là biến dạng kéo, thể hiện tính chất vật liệu bền vững hơn trước các tác động cơ học. Kết quả thu được cung cấp dữ liệu quan trọng cho việc thiết kế và tối ưu hóa vật liệu màng mỏng từ trong các ứng dụng spintronics linh hoạt.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã khảo sát ảnh hưởng của biến dạng cơ học (kéo và nén) đến tính chất từ của màng mỏng đa lớp CoFeB/Pd được lắng đọng trên đế polyimide mềm dẻo. Các kết quả thực nghiệm cho thấy:

1) Với màng mỏng sắt từ CoFeB (0,4 nm), các biến dạng ảnh hưởng mạnh đến đường cong từ trễ, tỷ lệ từ dư chuẩn hóa M_r/M_s và lực kháng từ H_C , đặc biệt theo trục từ dễ. Biến dạng nén gây ảnh hưởng rõ rệt hơn so với biến dạng kéo, thể hiện khả năng điều chỉnh dị hướng từ thông qua ứng suất cơ học.

2) Với màng mỏng sắt từ CoFeB dày hơn (1,3 nm), tính chất từ thể hiện sự ổn định cao hơn, ít bị biến đổi khi chịu tác động biến dạng, phản ánh sự bền vững từ tính trong cấu trúc có độ dày lớn hơn.

3) Sự khác biệt giữa hai mẫu nghiên cứu cho thấy độ dày lớp sắt từ CoFeB đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định mức độ nhạy của màng mỏng trước biến dạng cơ học.

Nghiên cứu của chúng tôi cho thấy có thể điều chỉnh các tham số từ thông qua biến dạng cơ học. Những phát hiện này có ý nghĩa quan trọng trong việc nâng cao hiệu suất của bộ nhớ MRAM, mở ra hướng ứng dụng tiềm năng cho màng mỏng từ CoFeB/Pd trên đế mềm dẻo trong các thiết bị spintronic linh hoạt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Zhang, Y., Zhang, T., Huang, Z., Yang, J. (2022), *A new class of electronic devices based on flexible porous substrate*, Advanced Science, 9(7) 2105084.
- [2] Han, Y., Cui, Y., Liu, X., Wang, Y. (2023), *A review of manufacturing methods for flexible devices and energy storage devices*, Biosensors, 13(9), 896.
- [3] Omiyale, B. O., Ogbeyemi, A., Ashraf, M. A., Song, K. Y., Zhang, W. C. (2025), *Towards robust flexible electronics: Fabrication approaches and ongoing research challenges*, Sensors and Actuators A: Physical, 395, 117053.
- [4] Nair, N. M., Zumeit, A., Dahiya, R. (2025), *Transparent and Transient Flexible Electronics*, Advanced Science, 12(31) e05133.
- [5] Li, H., Ma, Y., Huang, Y. (2021), *Material innovation and mechanics design for substrates and encapsulation of flexible electronics: A review*, Materials Horizons, 8(2) 383-400.
- [6] Liu, J., Chen, J., Zhang, Y., Fu, S., Chai, G., Cao, C., Zhan, Q. (2021), *Stretching-tunable high-frequency magnetic properties of wrinkled CoFeB films grown on PDMS*, ACS Applied Materials & Interfaces, 13(25) 29975-29983.
- [7] Hassan, M., Laureti, S., Rinaldi, C., Fagiani, F., Varotto, S., Barucca, G., ... Albrecht, M. (2021), *Perpendicularly magnetized Co/Pd-based magneto-resistive heterostructures on flexible substrates*, Nanoscale Advances, 3(11) 3076-3084.
- [8] Bano, N., Tripathy, A., Joshi, R., Shukla, D. K. (2025), *Intrinsic anomalous transverse electrical and thermoelectric effects in amorphous CoFeB thin films*, Physical Review B, 111(16) 165401.

- [9] Quach Duy Truong (2023), *Magnetic properties of Co/Pt multilayers based on magneto-optical effect*, Hue University Journal of Science, 132(1C) 61-67.
- [10] Chen, X., Mi, W. (2021), *Mechanically tunable magnetic and electronic transport properties of flexible magnetic films and their heterostructures for spintronics*, Journal of Materials Chemistry C, 9(30) 9400-9430.
- [11] Li, F., Wang, B., Gao, X., Damjanovic, D., Chen, L. Q., Zhang, S. (2025), *Ferroelectric materials toward next-generation electromechanical technologies*, Science, 389(6755), eadn4926.
- [12] Zhang, H., Li, Y. Y., Yang, M. Y., Zhang, B., Yang, G., Wang, S. G., Wang, K. Y. (2015), *Tuning the magnetic anisotropy of CoFeB grown on flexible substrates*, Chinese Physics B, 24(7) 077501.
- [13] Ota, S., Hirai, T., Ochi, K., Namazu, T., Ina, T., Koyama, T., Chiba, D. (2020), *Extended x-ray absorption fine structure spectroscopy of stretched magnetic films on flexible substrate*, Journal of Applied Physics, 127(17) 173901.
- [14] Madani, M., Heydari, Z., Poursafar, J., Sharifpour, N., Kolahdouz, M., Asl-Soleimani, E., Aghababa, H. (2024), *A study of kapton as a flexible substrate for perovskite solar cells; advantages and disadvantages*, Optical Materials, 154, 115697.
- [15] Dong, Z., He, Q., Shen, D., Gong, Z., Zhang, D., Zhang, W., Jiang, Y. (2023), *Microfabrication of functional polyimide films and microstructures for flexible MEMS applications*, Microsystems & Nanoengineering, 9(1) 31.
- [16] He, Z., Li, Z., Ma, Z., Chen, C., Wang, C., Wu, C., Sun, K. (2023), *Microstructure, magnetic domains and magnetic properties of Ti/Fe/Ni₈₁Fe₁₉/Fe/Ti multilayer films by obliquely deposition*, Journal of Alloys and Compounds, 933, 167788.
- [17] Zighem, F., Faurie, D. (2021), *A review on nanostructured thin films on flexible substrates: links between strains and magnetic properties*, Journal of Physics: Condensed Matter, 33(23) 233002.
- [18] Quach, D. T., Tran, Q. H., Møhave, K., Kim, D. H. (2014), *Perpendicular magnetic anisotropy and the magnetization process in CoFeB/Pd multilayer films*, Journal of Physics D: Applied Physics, 47(44) 445001.
- [19] Tang, Z., Wang, B., Yang, H., Xu, X., Liu, Y., Sun, D., Li, R. W. (2014), *Magneto-mechanical coupling effect in amorphous Co₄₀Fe₄₀B₂₀ films grown on flexible substrates*, Applied Physics Letters, 105(10) 103504.
- [20] Dai, G., Zhan, Q., Liu, Y., Yang, H., Zhang, X., Chen, B., Li, R. W. (2012), *Mechanically tunable magnetic properties of Fe₈₁Ga₁₉ films grown on flexible substrates*, Applied Physics Letters, 100(12) 122407.
- [21] Zhao, S., Wan, J. G., Yao, M., Liu, J. M., Song, F., Wang, G. (2010), *Flexible Sm-Fe/polyvinylidene fluoride heterostructural film with large magnetoelectric voltage output*, Applied Physics Letters, 97(21) 212902.
- [22] Wang, D., Nordman, C., Qian, Z., Daughton, J. M., Myers, J. (2005), *Magnetostriction effect of amorphous CoFeB thin films and application in spin-dependent tunnel junctions*, Journal of Applied Physics, 97(10) 10C906.

STUDY OF STRAIN-DEPENDENT MAGNETIC PROPERTIES OF CoFeB/Pd MULTILAYER FILMS ON POLYIMIDE SUBSTRATE

Nguyen Le Thi, Pham Thi Ha, Luong Thi Kim Phuong

ABSTRACT

Recently, magnetic thin films deposited on flexible substrates have attracted significant interest from the scientific community due to their ability to tune magnetic properties through stress/strain. This work presents experimental results on CoFeB/Pd multilayer ferromagnetic thin films with different thicknesses of 0.4 nm and 1.3 nm. Bending strain was generated using curved molds with varying diameters, combined with magneto-optical Kerr effect measurements to observe changes in magnetic properties. The normalized remanent magnetization and coercivity parameters of the multilayer films under different strain levels were analyzed in detail, revealing a pronounced dependence of magnetic properties on the strain applied to the flexible polyimide substrate.

Keywords: Polyimide, magnetic thin films, strain, CoFeB/Pd, magneto-optical Kerr effect.

* Ngày nộp bài: 30/09/2025; Ngày gửi phản biện: 09/10/2025; Ngày duyệt đăng: 28/02/2026

* Bài báo là kết quả nghiên cứu từ đề tài NCKH cấp sơ sở (mã số ĐT-2024-16) của Trường Đại học Hồng Đức