

NGHIÊN CỨU, CHẾ TẠO CẢM BIẾN TỪ DỰA TRÊN HIỆU ỨNG HALL PHẪNG (PHE)

Lê Khắc Quỳnh^{1,2*}, Nguyễn Xuân Toàn³, Bùi Đình Tú², Trần Tiến Dũng¹,
Đỗ Thị Hương Giang², Nguyễn Hữu Đức²

⁽¹⁾Trường Đại học Sư phạm Hà Nội 2, Số 32 Đường Nguyễn Văn Linh, Xuân Hòa, Phúc Yên, Vĩnh Phúc

⁽²⁾Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội, Số 144 Xuân Thủy, Cầu Giấy, Hà Nội.

⁽³⁾Trường Sĩ quan phòng hóa, Tân Phú, Sơn Đông, Sơn Tây, Hà Nội

Email: quynhlc@gmail.com

Tóm tắt:

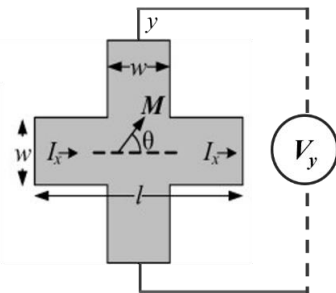
Hệ các cảm biến đo từ trường dạng chữ thập dựa trên hiệu ứng Hall phẳng (PHE), cấu trúc màng mỏng đơn lớp $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ đã được chúng tôi nghiên cứu và chế tạo dựa trên thiết bị phun xạ sputtering ATC-2000FC. Các nghiên cứu theo hướng tối ưu hóa cấu trúc, hình dạng cảm biến với mục đích tăng cường độ nhạy theo từ trường, bao gồm cảm biến có các kích thước: $1 \times 5 \text{ mm}^2$, $1 \times 7 \text{ mm}^2$, $1 \times 10 \text{ mm}^2$ và có độ dày lớp màng mỏng từ tính khác nhau 5, 10, 15 nm. Kết quả nghiên cứu cho thấy, độ nhạy của cảm biến phụ thuộc mạnh vào tính dị hướng hình dạng và bề dày của lớp NiFe. Tính dị hướng hình dạng càng lớn, bề dày lớp màng NiFe càng mỏng thì độ nhạy cảm biến càng cao. Độ nhạy lớn nhất đạt được trên cảm biến chữ thập có kích thước $1 \times 10 \text{ mm}^2$, có bề dày 5 nm cho giá trị $S(H)_{\max} = 0,1 \text{ mV/Oe}$, tại dòng cấp 5 mA, tương đương với độ nhạy $20 \text{ m}\Omega/\text{Oe}$. Với qui trình công nghệ chế tạo đơn giản, cấu trúc màng đơn lớp nhưng độ nhạy của cảm biến có thể so sánh được với các cảm biến có cùng loại, cùng chức năng được chế tạo từ màng đa lớp rất phức tạp như cảm biến cấu trúc van-spin (VS), cảm biến từ điện trở xuyên hầm (TMR), từ điện trở dị hướng (AMR) đã công bố.

Từ khóa: Hiệu ứng từ điện trở dị hướng (AMR), hiệu ứng Hall phẳng (PHE), cấu trúc van-spin, màng mỏng từ tính NiFe, cảm biến từ trường.

MỞ ĐẦU

Hiệu ứng Hall phẳng (Planar Hall effect - PHE) là một trường hợp của hiệu ứng từ điện trở, trong đó sự thay đổi điện trở của vật liệu dưới tác dụng của từ trường ngoài phụ thuộc vào góc giữa vector từ độ M và chiều dòng điện I [11]. Có nhiều loại cảm biến đo từ trường hoạt động dựa trên các hiệu ứng từ-điện trở khác nhau, trong đó, các cảm biến có hiệu ứng lớn thường được sử dụng với các cấu trúc dạng màng đa lớp khá phức tạp sử dụng các công nghệ hiện đại, thiết bị đắt tiền như hiệu ứng từ điện trở khổng lồ cấu trúc spin-van, từ điện trở xuyên ngầm (TMR), từ điện trở dị hướng (AMR) [3,4,8,10,12],... Khi nghiên cứu trên màng đa lớp NiFe/IrMn , $\text{NiFe}/\text{Cu}/\text{NiFe}$, $\text{NiFe}/\text{Cu}/\text{NiFe}/\text{IrMn}$, các cảm biến Hall dạng chữ thập cho độ nhạy lớn nhất đạt cỡ $15,6 \mu\text{V}/\text{Oe}$ [3,4,5], các cảm biến dạng mạch cầu cho độ nhạy lớn hơn cỡ 100 lần được công bố bởi A. D. Henriksen [1,2]. Việc đơn giản hóa qui trình công nghệ, giảm chi phí chế tạo mà vẫn đáp ứng được các yêu cầu ứng dụng đo từ trường thấp là mục đích của cảm biến hướng đến đích thương mại hóa sản phẩm. Tiếp cận theo mục tiêu này, nhóm nghiên cứu ở Phòng thí nghiệm Micro-

nano, Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc Gia Hà Nội đã khai thác thuộc tính từ mềm của vật liệu permalloy để chế tạo cảm biến đo từ trường thấp với cấu trúc chữ thập, sử dụng màng đơn lớp $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ dựa trên hiệu ứng Hall phẳng.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý cảm biến dựa trên hiệu ứng Hall phẳng

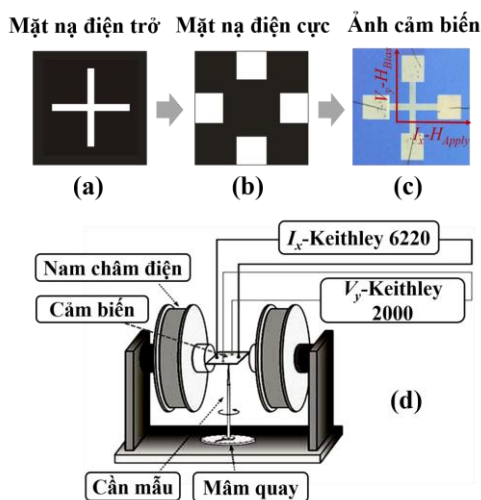
Trên hình 1 là sơ đồ cấu trúc cảm biến dạng chữ thập. Theo cách bố trí này, khi ta cấp một dòng điện theo phương x là I_x vào cảm biến thì hiệu điện thế lỏ ra của cảm biến là V_y theo phương vuông góc với trục x được xác định thông qua biểu thức [5,11]:

$$V_y = I_x \Delta R \sin \theta \cos \theta$$

trong đó, $\Delta R = (\rho_{//} - \rho_{\perp})/t$, với t là chiều dày của lớp màng từ tính, $\rho_{//}$ và ρ_{\perp} là điện trở suất khi đo theo phương song song và vuông góc với phương từ hóa dễ của mẫu, θ là góc giữa vector từ độ và chiều dòng điện.

THỰC NGHIỆM

Mỗi cảm biến gồm 2 thanh điện trở giống nhau đặt vuông góc dạng chữ thập. Các loại cảm biến có kích thước khác nhau, bao gồm: 1×5 ; 1×7 và $1 \times 10 \text{ mm}^2$ với chiều dày lớp màng từ tính NiFe là $t = 5, 10$ và 15 nm đã được chế tạo bằng thiết bị quang khắc MJB4 sử dụng mặt nạ polymer và thiết bị phún xạ catốt ATC-2000FC. Điện cực được chế tạo bằng vật liệu Cu. Quy trình chế tạo cảm biến được mô phỏng như hình 2 (a,b,c), hệ đo tín hiệu cảm biến được mô phỏng như hình 2 (d). Các phép khảo sát tính chất từ và tín hiệu Hall của cảm biến đã được thực hiện tại nhiệt độ phòng.



Hình 2. (a) Quy trình chế tạo cảm biến sử dụng các mặt nạ điện trở (a), mặt nạ điện cực (b), ảnh chụp cảm biến (c) và hệ đo tín hiệu cảm biến (d)

Trong nghiên cứu của mình, để tạo ra phương từ hóa dễ, màng từ tính được tạo ra bằng phương pháp phún xạ và được nuôi bởi từ trường ghim H_{bias} dọc theo phương y của cảm biến trong suốt quá trình chế tạo. Khi khảo sát tín hiệu, từ trường ngoài H_{apply} được đặt dọc theo trục x của cảm biến. Dưới tác dụng của từ trường ngoài, sự thay đổi từ độ theo từ trường dẫn đến sự thay đổi điện trở do hiệu ứng Hall sẽ tạo ra sự thay đổi điện áp lồi ra V_y phụ thuộc vào từ trường. Đây chính là nguyên lý hoạt động của cảm biến trong báo cáo này. Các nghiên cứu đã được thực hiện theo hướng chuẩn hóa quy trình công nghệ chế tạo, tối ưu chiều dày màng, kích thước thanh

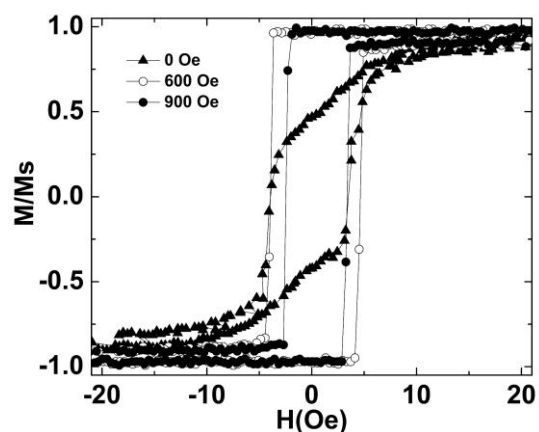
điện trở để tăng cường dị hướng hình dạng cho ra các sản phẩm cảm biến có độ nhạy cao trong vùng từ trường thấp.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tính chất từ của lớp màng NiFe

3.1.1. Tính chất từ của màng phụ thuộc vào từ trường ghim

Để tạo ra tính dị hướng từ đơn trục của cảm biến, chúng tôi đặt một từ trường H_{Bias} tạo bởi 2 thanh nam châm vĩnh cửu dọc theo trục cảm biến trong suốt quá trình phún xạ tạo màng. Chúng tôi khảo sát tính chất từ của cảm biến phụ thuộc vào từ trường ngoài với 3 giá trị từ trường ghim khác nhau là $H_{Bias} = 900, 600, 0 \text{ Oe}$. Kết quả nghiên cứu trên các cảm biến ở cùng một điều kiện cho thấy, với giá trị từ trường ghim bằng 900 Oe , cảm biến cho tính dị hướng từ mạnh nhất, thể hiện thông qua lực kháng từ nhỏ nhất và đường cong từ trễ dốc nhất so với hai đường còn lại. Kết quả nghiên cứu này phù hợp với các kết quả đã được công bố trước đây của Nhóm [10]. Đường cong từ trễ khi đo theo phương từ hóa dễ của các mẫu được thể hiện như trên hình 3. Từ kết quả thu được, ta sẽ chọn từ trường ghim là 900 Oe cho các nghiên cứu tiếp theo.

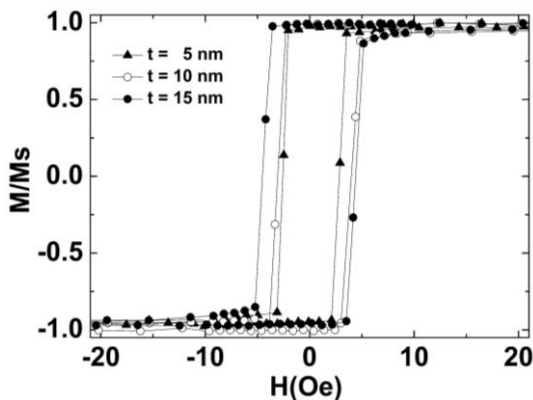


Hình 3. Đường cong từ trễ tỉ đối của các cảm biến được chế tạo với các từ trường ghim khác nhau: 900, 600 và 0 Oe

3.1.2. Tính chất từ của màng phụ thuộc vào bề dày

Tính chất từ được nghiên cứu trên loại cảm biến có kích thước $1 \times 10 \text{ mm}^2$, các điều kiện công nghệ giống nhau nhưng bề dày lớp màng NiFe khác nhau là $t = 5, 10, 15 \text{ nm}$. Đường cong từ trễ tỉ đối M/M_s đo theo phương từ hóa dễ của các mẫu được thể hiện trên hình 4.

Kết quả cho thấy, các cảm biến đều thể hiện tính chất từ mềm rất tốt thể hiện bởi đường cong từ trễ tỉ đối dốc, từ trường bão hòa nhỏ ($H_s \sim 5$ Oe), lực kháng từ nhỏ ($H_c < 5$ Oe). Tính chất từ mềm trên các màng có bề dày khác nhau thì khác nhau. Lớp màng NiFe có bề dày thấp nhất $t = 5$ nm cho tính chất từ tốt nhất thể hiện bởi đường cong từ trễ tỉ đối dốc nhất, mômen từ bão hòa nhỏ nhất và lực kháng từ thấp nhất. Tính chất dị hướng từ phụ thuộc vào hình dạng, kích thước và chiều dày lớp màng NiFe đã chỉ ra phù hợp với các nghiên cứu trên cùng hệ vật liệu đã được công bố bởi Nhóm [9,10]. Kết quả này là cơ sở cho việc tối ưu chiều dày lớp màng NiFe để chế tạo các cảm biến cho độ nhạy cao trong vùng từ trường nhỏ. Do đó, khi chế tạo cảm biến, chúng tôi cố định chiều dày lớp màng NiFe, $t = 5$ nm trong các nghiên cứu của mình.



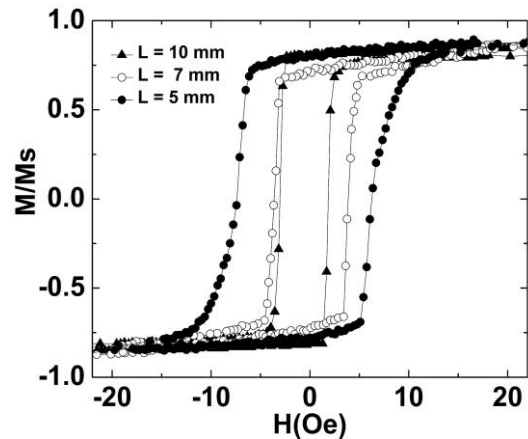
Hình 4. Đường cong từ hóa tỉ đối M/M_s của màng NiFe đo theo phương từ hóa dễ trên các cảm biến có bề dày khác nhau $t = 5, 10, 15$ nm

3.1.3. Tính chất từ phụ thuộc vào tính dị hướng hình dạng cảm biến

Các cảm biến được khảo sát có cùng một điều kiện từ trường ghim 900 Oe và cùng bề dày $t = 5$ nm nhưng có tỉ số dài/rộng khác nhau. Các thanh điện trở của cảm biến có bề rộng $W = 1$ mm nhưng chiều dài thay đổi $L = 5, 7$ và 10 mm. Đường cong từ trễ của các mẫu được thực hiện với từ trường theo phương song song với trục cảm biến được mô tả trên hình 5.

So sánh đường cong từ trễ của 3 mẫu, ta thấy rõ vai trò của dị hướng hình dạng đóng góp vào việc tăng cường dị hướng đơn trục của thanh điện trở thể hiện ở thiết kế 1×10 mm² với tỉ số kích thước dài/rộng là $L/W = 10$ cho tính chất từ mềm với lực kháng từ nhỏ nhất. Với kết quả này, cảm biến được chế tạo khi kết hợp với ý tưởng tăng cường dị hướng đơn trục theo hướng này được trông đợi sẽ cho tín hiệu cảm biến rất

nhạy trong vùng từ trường thấp. Tính từ mềm này được trông đợi sẽ cho thể lõi ra của cảm biến lớn trong vùng từ trường nhỏ.



Hình 5. Đường cong từ hóa tỉ đối M/M_s của các cảm biến có cùng chiều rộng 1 mm nhưng chiều dài khác nhau 5, 7 và 10 mm với từ trường ngoài song song với phương từ hóa dễ

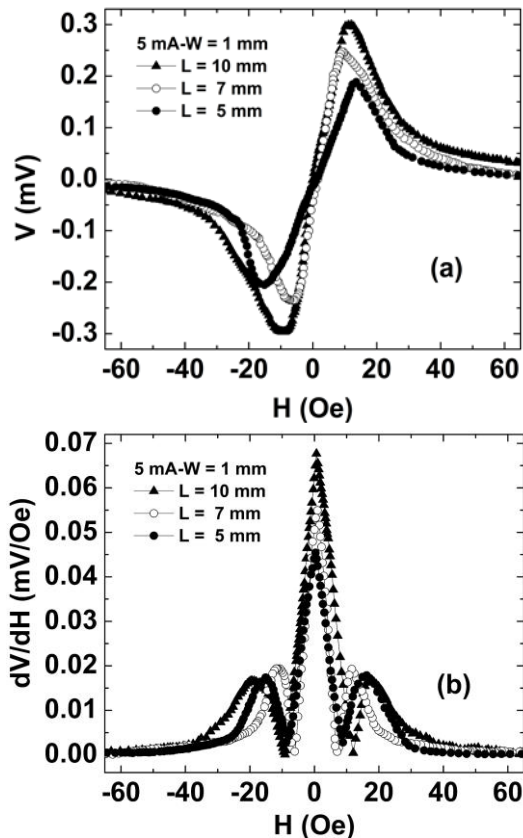
3.2. Khảo sát tín hiệu Hall của các cảm biến

3.2.1. Tín hiệu Hall phụ thuộc vào hình dạng cảm biến

Từ việc nghiên cứu tính chất từ ở mục 3.1.3, chúng tôi khảo sát tín hiệu Hall phẳng theo từ trường một chiều với các cảm biến có kích thước khác nhau là $1 \times 5, 1 \times 7$ và 1×10 mm², bề dày lớp màng NiFe là 15 nm. Dòng điện cấp cho các cảm biến là 5 mA theo phương vuông góc với trục cảm biến và song song với từ trường ngoài như hình 2c. Kết quả đường cong tín hiệu $V(H)$ của các cảm biến khác nhau được chỉ ra trên hình 6a. Từ hình vẽ ta thấy, với các cảm biến có cùng kích thước chiều rộng của các thanh điện trở ($W = 1$ mm) nhưng kích thước chiều dài (L) càng lớn thì tín hiệu thể lõi ra càng lớn. Độ lệch thế Hall cực đại $\Delta V_{max} = 0,6$ mV thu được trên cảm biến có $L = 10$ mm gấp 1,6 lần độ lệch thế Hall cực đại $\Delta V_{max} = 0,38$ mV thu được trên cảm biến có $L = 5$ mm. Ngoài ra, độ dốc của đường cong $V(H)$ cho biết độ nhạy của cảm biến theo từ trường ngoài. Cụ thể hơn, bằng cách đạo hàm $V(H)$ theo công thức $S(H) = \frac{dV}{dH}$ (mV/Oe) với các

mẫu khác nhau, ta sẽ vẽ được đường cong $S(H)$ theo từ trường ngoài (hình 6b). Từ đường cong ta thấy, cảm biến có chiều dài $L = 10$ mm cho độ nhạy lớn nhất ($S(H)_{max} = 0,07$ mV/Oe) gấp 1,5 lần độ nhạy của cảm biến có $L = 5$ mm ($S(H)_{max} = 0,045$ mV/Oe). Kết quả này giống với quy luật nghiên cứu tính chất từ phụ thuộc vào tính dị hướng hình dạng của cảm biến đã chỉ ra ở phần trên. Giá trị độ lệch thế và độ nhạy của các cảm

biên Hall được chỉ ra chi tiết ở bảng 1. Kết quả nghiên cứu này là cơ sở để thực hiện các khảo sát tiếp theo.

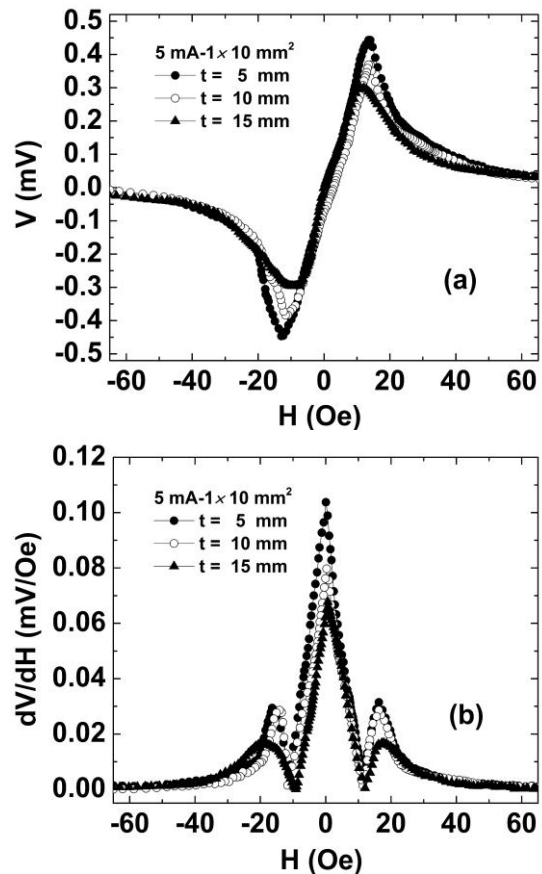


Hình 6. (a) Đường cong độ lệch thế và (b) Đường cong độ nhạy của các cảm biến với kích thước khác nhau, bề dày 15 nm, tại dòng cấp 5 mA

3.2.2. Tín hiệu Hall phụ thuộc vào bề dày màng

Từ kết quả nghiên cứu tín hiệu Hall phụ thuộc vào tính dị hướng hình dạng ở trên, ta sẽ chọn cảm biến loại 1×10 mm² để khảo sát sự phụ thuộc vào bề dày lớp màng NiFe. Các cảm biến được chọn có bề dày là $t = 5, 10, 15$ nm. Dòng điện cấp cho các cảm biến vẫn là 5 mA theo phương vuông góc với trục cảm biến và song song với từ trường ngoài. Kết quả đường cong tín hiệu $V(H)$ của các cảm biến khác nhau được chỉ ra trên hình 7a. Từ hình vẽ ta thấy, vùng tuyến tính của tín hiệu nằm trong dải từ trường rất nhỏ cỡ -10 Oe đến +10 Oe và các cảm biến có bề dày càng mỏng thì tín hiệu thế lồi ra càng lớn. Độ lệch thế Hall cực đại $\Delta V_{max} = 0,9$ mV thu được trên cảm biến có $t = 5$ nm gấp 1,5 lần độ lệch thế Hall cực đại $\Delta V_{max} = 0,6$ mV thu được trên cảm biến có $t = 15$ nm. Đường cong $S(H)$ của các mẫu khác nhau theo từ trường ngoài được mô tả như hình 7b. Từ đường cong ta thấy, cảm biến có bề dày $t = 5$ nm cho độ

nhạy lớn nhất $(S(H)_{max} = 0,1$ mV/Oe) gấp 1,4 lần độ nhạy của cảm biến có $t = 15$ nm $(S(H)_{max} = 0,07$ mV/Oe). Kết quả này giống với quy luật nghiên cứu tính chất từ phụ thuộc vào bề dày của màng NiFe đã khảo sát ở phần trên. Giá trị cụ thể về độ lệch thế và độ nhạy của các cảm biến được chỉ ra ở bảng 1. Quy luật phụ thuộc của tín hiệu Hall theo từ trường trên các cảm biến với kích thước khác nhau, bề dày khác nhau giống với quy luật nghiên cứu hiệu ứng AMR trên mạch cầu Wheatstone sử dụng cùng hệ vật liệu đã được công bố của Nhóm [10] và cũng phù hợp với kết quả nghiên cứu của nhóm V. Mor [13].



Hình 7. (a) Đường cong độ lệch thế và (b) Đường cong độ nhạy của cảm biến với các bề dày màng NiFe khác $t = 5, 10, 15$ nm, tại dòng cấp 5 mA

Ta có thể đem so sánh tín hiệu của cảm biến đã chế tạo được trong nghiên cứu này với kết quả của các cảm biến có cùng chức năng đã được công bố trong nước và trên thế giới. Nếu so sánh với công bố trước đây của nhóm chúng tôi trên cảm biến Hall dạng chữ thập cấu trúc NiFe/IrMn (độ nhạy 2,5 mΩ/Oe) [4] và cấu trúc NiFe/Cu/NiFe/IrMn độ nhạy $S = 15,6$ mΩ/Oe [3] thì độ nhạy của cảm biến tốt nhất trong bài báo này gấp lần lượt 8 lần và 1,3 lần. Nếu so sánh với kết quả công bố lớn nhất hiện nay trên cảm biến dạng cầu Wheatstone được công bố

bởi D. Henriksen [6] hay A. D. Henriksen [2] (độ nhạy cỡ 150 $\mu\text{V/Oe}$) thì cảm biến của chúng tôi có độ nhạy cỡ 2/3 lần nhưng cấu trúc và quy trình công nghệ của chúng tôi đơn giản hơn nhiều. Nếu so với các cảm biến dựa trên hiệu ứng AMR có cấu trúc cầu Wheatstone của chúng tôi đã công bố [9,10] thì độ nhạy cảm biến này nhỏ hơn cỡ 1 bậc độ lớn nhưng ưu việt của cảm biến Hall dạng chữ thập này là có vùng hoạt động đi qua gốc “không” tức là khi ứng dụng cảm biến đo hạt từ thì không cần cung cấp từ trường nuôi, điều này khác biệt so với cảm biến AMR dạng cầu Wheatstone.

Bảng 1. Độ lệch thế và độ nhạy của cảm biến với các kích thước và độ dày lớp màng NiFe khác nhau, đo tại dòng cấp 5mA

| $W \times L \times t$ ($\text{mm}^2 \times \text{nm}$) | ΔV (mV) | S_{max} (mV/Oe) | S_{max} ($\text{m}\Omega/\text{Oe}$) |
|---|--------------------|-----------------------------|--|
| 1×5×15 | 0,38 | 0,045 | 9 |
| 1×7×15 | 0,50 | 0,055 | 11 |
| 1×10×15 | 0,60 | 0,07 | 14 |
| 1×10×10 | 0,74 | 0,08 | 16 |
| 1×10×5 | 0,90 | 0,10 | 20 |

Với độ nhạy $S(H)_{\text{max}} = 0,1$ (mV/Oe) thu được trên cảm biến tốt nhất ở trên có thể đáp ứng được các mục đích phát hiện hạt từ ứng dụng trong y-sinh học như các hệ cảm biến AMR, TMR, van-spin đã công bố [1,5,7,9,10,14].

KẾT LUẬN

Với qui trình công nghệ chế tạo đơn giản, cảm biến từ dạng chữ thập dựa trên hiệu ứng Hall phẳng, sử dụng màng đơn lớp NiFe đã được chế tạo thành công nhờ kết hợp tối ưu chiều dày và kích thước của cảm biến. Với thiết kế thanh điện trở $1 \times 10 \times 5$ ($\text{mm} \times \text{mm} \times \text{nm}$), cảm biến cho tín hiệu thế lồi ra và độ nhạy từ trường lớn nhất có giá trị $\Delta V_{\text{max}} = 0,9$ mV và $S(H)_{\text{max}} = 0,1$ mV/Oe (tương đương $S = 20$ $\text{m}\Omega/\text{Oe}$). Cảm biến đã chế tạo có thể so sánh được với các cảm biến có cùng chức năng sử dụng công nghệ và cấu trúc vật liệu phức tạp. Các kết quả nghiên cứu này có tiềm năng để phát triển nghiên cứu hoàn thiện cảm biến từ hướng tới ứng dụng đo từ trường thấp và phát hiện hạt từ ứng dụng trong y-sinh học.

Lời cảm ơn

Công trình này được thực hiện với sự hỗ trợ của Đề tài mã số ĐTĐL.CN-02/17, đề tài mã số QG.16.89 và đề tài mã số QG.16.26.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Anders Dahl Henriksen, Giovanni Rizzi, and Mikkel Fougt Hansen, Journal of applied physics, 119, 093910 (2016).
- [2]. A. D. Henriksen, B. T. Dalslet, D. H. Skieller, K. H. Lee, F. Okkels, and M. F. Hansena, Journal of Applied Physics Letters. 97, pp. 013507-1 – 013507-3 (2012).
- [3]. Bui Dinh Tu, Le Viet Cuong, Tran Quang Hung, Do Thi Huong Giang, Tran Mau Danh, Nguyen Huu Duc, and CheolGi Kim IEEE Transactions on Magnetics 45, pp. 2378 – 2382 (2009).
- [4]. Bui Dinh Tu, Tran Quang Hung, Nguyen Trung Thanh, Tran Mau Danh, Nguyen Huu Duc, and CheolGi Kim J. Appl. Phys. 104, p. 074701, (2008).
- [5]. Bui Dinh Tu, Tran Mau Danh, Nguyen Huu Duc, Hai Binh Nguyen, Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol. 3, pp. 045019 – 045022 (2012).
- [6]. D. Henriksen, B. T. Dalslet, D. H. Lee, F. Okkels, and M. F. Hansena, J. Appl. Phys. Lett (97), p. 013507 (2012).
- [7]. D. R. Baselt, G. U. Lee, M. Natesan, S. W. Metzger, P. E. Sheehan, R. J. Colton, Biosensor and bioelectronics 13, pp. 731 – 739 (1998).
- [8]. M. J. Haji-Sheikh and Y. Yoo, IJISTA, 3, No (1/2), 95–105 (2007).
- [9]. LT Hien, LK Quynh, VT Huyen, BD Tu, NT Hien, DM Phuong, PH Nhung, DTH Giang, NH Duc, Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 7, pp.045006 (2016).
- [10]. L.K. Quynh, B.D. Tu, D.X. Dang, D.Q. Viet, L.T. Hien, D.T. Huong Giang, N.H. Duc, Journal of Science: Advanced Materials and Devices 1 98-102 (2016).
- [11]. Ripka, Pavel, Magnetic sensors and Magnetometers, Boston-London: Artech (2001).
- [12]. T. Q. Hung, S. J. Oh, B. D. Tu, N. H. Duc, L. V. Phong, S. A. Kumar, J-R Jeong, C. G. Kim, IEEE Transactions on Magnetics 45(6), pp. 2374-2377 (2009).
- [13]. V. Mor, M. Schultz, O. Sinwani, A. Grosz, E. Paperno, L. Klein, Journal of Applied Physics 111, pp. 07E519 – 07E519-3 (2012).
- [14]. Volmer Marius, Marioara Avram, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 381, 481-487 (2015).