

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**

Lê Khắc Quỳnh

**NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ, CHẾ TẠO CẢM BIẾN MICRÔ-NANÔ DỰA
TRÊN VẬT LIỆU TỪ GIẢO VÀ TỪ-ĐIỆN TRỞ**

Chuyên ngành: Vật liệu và linh kiện nano

Mã số: Chuyên ngành đào tạo thí điểm

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LIỆU VÀ LINH KIỆN NANO

Hà Nội – 2018

Công trình được hoàn thành tại: Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

Người hướng dẫn khoa học: PGS. TS Đỗ Thị Hương Giang

TS. Trần Mậu Danh

Phản biện:

.....

Phản biện:

.....

Phản biện:

.....

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng cấp Đại học Quốc gia chấm luận án tiến sĩ họp tại

vào hồi giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Trung tâm Thông tin - Thư viện, Đại học Quốc gia Hà Nội

MỞ ĐẦU

Các loại cảm biến, linh kiện hoạt động dựa trên hiệu ứng từ spintronics bao gồm: cảm biến từ-điện trở dị hướng (AMR), từ điện-trở khổng lồ (GMR), cảm biến Hall phẳng (PHE), cảm biến từ-điện trở xuyên hầm (TMR), ... Với ưu điểm về kích thước, độ nhạy cao, dễ dàng tích hợp với các linh kiện điện-điện tử, các cảm biến từ-điện trở được khai thác và ứng dụng sâu rộng trong cuộc sống có thể kể ra như cảm biến *GMR* [86, 125, 62], cảm biến *PHE* [72, 94], cảm biến *TMR* [14, 51, 94].

Trong các linh kiện, cảm biến từ-điện trở kể trên thì linh kiện, cảm biến từ-điện trở dị hướng có cấu trúc vật liệu đơn giản hơn cả nhưng vẫn cho độ nhạy, độ phân giải cao, dải tần số làm việc rộng, độ nhạy có thể đạt được cỡ 6 mV/Oe [10] và có thể cho nhiều ứng dụng vượt trội hơn hẳn trong đo lường từ trường [16, 95], đo dòng điện độ chính xác cao (sai số cỡ $\pm 0,05\%$) [77, 59], cảm biến phát hiện các phần tử sinh học... Xét về hiệu quả kinh tế thì cảm biến *AMR* này do cấu trúc đơn giản, nên dễ chế tạo, giá thành rẻ, thiết kế linh hoạt và khả năng tương thích với công nghệ vi điện tử dễ dàng, chủ động thiết kế và điều chỉnh công nghệ chế tạo đáp ứng theo từng đặc thù ứng dụng cụ thể.

Nội dung của luận án là chế tạo cảm biến dựa trên hiệu ứng từ-điện trở dị hướng (*AMR*) dựa trên vật liệu sắt từ mềm dạng màng có cấu trúc micro-nano và thử nghiệm khả năng ứng dụng trong lĩnh vực đo từ trường thấp cỡ từ trường của trái đất dùng làm la bàn điện tử và ứng dụng làm cảm biến y-sinh học. Mục tiêu nghiên cứu của luận án là đơn giản hóa quy trình công nghệ, cấu trúc cảm biến, giảm thiểu kích thước, hạ thấp chi phí nhưng phải đáp ứng được yêu cầu độ nhạy cao trong vùng từ trường nhỏ (độ nhạy đạt mV/Oe trong dải từ trường cỡ Oe). Cơ sở lựa chọn vật liệu trong luận án xuất phát từ các nghiên cứu tổng quan trên các vật liệu từ mềm. Trên cơ sở tìm hiểu và phân tích vật liệu có hiệu ứng từ-điện trở, chúng tôi chọn lựa vật liệu *NiFe* với thành phần 20:80 (permalloy) là phù hợp và đáp ứng yêu cầu của luận án. Trong luận án này, chúng tôi sử dụng vật liệu permalloy (*NiFe*) có hiệu ứng *AMR* để chế tạo cảm biến dạng mạch cầu Wheatstone kích thước micrô-nanô. Định hướng của luận án là hướng tới sản phẩm được đóng gói hoàn thiện xuất phát từ nghiên cứu cơ bản cho đến chế tạo sản phẩm theo một số ứng dụng cụ thể được lựa chọn trong luận án. Tên đề tài luận án là “*Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo cảm biến micrô-nanô dựa trên vật liệu từ giao và từ-điện trở*”.

* Mục tiêu của luận án là:

- Đơn giản quy trình công nghệ và cấu trúc màng mỏng từ *NiFe* theo hướng tăng cường tính chất từ mềm và dị hướng từ đơn trục và do đó tăng cường hiệu ứng *AMR*.

- Thiết kế, chế tạo và tối ưu cấu hình cảm biến có cấu trúc cầu Wheatstone kích thước micro-nano theo hướng tăng cường độ nhạy, độ phân giải và giảm nhiễu nhiệt cho các ứng dụng đo lường nhạy từ trường thấp.
- Thử nghiệm ứng dụng cảm biến chế tạo được trong (i) đo góc từ trường của trái đất dùng làm la bàn và (ii) cảm biến sinh học phát hiện phần tử sinh học có lai hóa hạt từ.

* Cấu trúc luận án gồm 5 chương:

Chương 1: Tổng quan về vật liệu từ mềm và cảm biến từ trường.

Chương 2: Các phương pháp thực nghiệm

Chương 3: Nghiên cứu cấu trúc và tính chất của màng NiFe

Chương 4: Nghiên cứu hiệu ứng từ-điện trở dị hướng trên các cảm biến cầu Wheatstone

Chương 5: Thử nghiệm ứng dụng của cảm biến cầu Wheatstone

Trong quá trình thực hiện luận án, nghiên cứu sinh đã hướng dẫn một số khóa luận của sinh viên trong nhóm nghiên cứu. Một số các kết quả và tính toán đơn giản đã được báo cáo trong khóa luận của sinh viên. Luận án cũng đã trích dẫn đầy đủ, rõ ràng.

Chương 1

TỔNG QUAN VẬT LIỆU SẮT TỪ MỀM VÀ CẢM BIẾN TỪ TRƯỜNG

1.1 Tổng quan về vật liệu sắt từ

1.1.1 Các trạng thái từ của vật liệu

Để phân loại vật liệu sắt từ, người ta thường dùng độ cảm từ χ đặc trưng cho khả năng từ hóa của vật liệu bởi từ trường ngoài. Theo cách này, vật liệu từ tính được chia làm ba loại: (i) vật liệu nghịch từ; (ii) vật liệu thuận từ; (iii) vật liệu sắt từ.

1.1.2 Vật liệu sắt từ

Các vật liệu sắt từ còn được gọi là vật liệu từ tính gồm chất sắt từ cứng, chất sắt từ mềm, chúng có đặc điểm: tồn tại các trục trục đômen từ; chất sắt từ tồn tại tính trễ từ; tồn tại tính dị hướng hình dạng; tính dị hướng từ tinh thể; dị hướng ứng suất.

1.1.3 Vật liệu sắt từ mềm NiFe

1.1.3.a Vật liệu sắt từ mềm NiFe dạng khối

Vật liệu permalloy (*NiFe*, có thành phần Ni từ 20 đến 85%) được cấu tạo từ kim loại sắt có cấu trúc tinh thể dạng lập phương tâm khối và niken có cấu trúc tinh thể dạng lập phương tâm mặt, có tính chất từ mềm, Vật liệu permalloy là cho độ từ thẩm cao, lực kháng từ H_c nhỏ (< 10 Oe), từ độ bão hòa lớn ($c\tilde{m} < 1000$ emu/cm³).

1.1.3.b Vật liệu sắt từ mềm NiFe dạng màng mỏng cấu trúc nano

Vật liệu màng Ni_xFe_{1-x} đã được nghiên cứu từ rất lâu, một số các thông số vật lý đặc trưng cho như hằng số dị hướng H_k , lực kháng từ H_c , tỉ số AMR %, ... phụ thuộc vào phần trăm của Ni. Một số thông số vật lý của với màng mỏng nano NiFe với phần trăm Ni khác nhau trong công thức Ni_xFe_{1-x} so sánh với vật liệu khác [68, 120]. được chỉ ra ở bảng 1.1.

Bảng 1.1. Một số thông số vật lý của với màng mỏng nano NiFe với phần trăm Ni khác nhau trong công thức Ni_xFe_{1-x} so sánh với vật liệu khác [3, 68, 120].

Ni_xFe_{1-x} (%)	$\Delta\rho/\rho$ (%)	ρ_0 ($10^{-8}\Omega m$)	H_k (Oe)	H_c (Oe)	λ (10^{-6})
Ni ₈₁ Fe ₁₉	2,2	22	3,1	1	0
Ni ₈₀ Fe ₂₀	2,2	25	3,3	1	0
Ni ₈₆ Fe ₁₄	3	15	2,5	1,25	-12
Ni ₇₀ Co ₃₀	3,8	26	2500	7,9	-20
Ni ₅₀ Co ₅₀	2,2	26	2500	10	0
Ni ₆₀ Fe ₁₀ Co ₃₀	3,2	18	1900	10,3	-5
Ni ₇₄ Fe ₁₀ Co ₁₆	2,8	23	1000	10.1	0
Ni ₈₇ Fe ₈ Mo ₅	0,7	72	490	5,1	0
Co ₆₅ Fe ₁₅ B ₂₀	0,07	86	2000	1,03	0

Từ các nghiên cứu trên, màng mỏng NiFe với tỉ lệ Ni:Fe là 80:20 sẽ được lựa chọn trong các nghiên cứu và phát triển ứng dụng của luận án. Các nghiên cứu sẽ tập trung theo hướng tối ưu cấu hình, hình dạng, kích thước và thiết kế cảm biến để tăng cường độ nhạy và độ phân giải của cảm biến đo từ trường cho một số ứng dụng cụ thể.

1.2 Ứng dụng cảm biến từ trường dựa trên vật liệu sắt từ mềm

1.2.1 Cảm biến từ trường dựa trên hiệu ứng cảm ứng điện-từ

Cảm biến từ trường dựa trên hiệu ứng điện-từ (Flux-gate) có dải làm việc từ $10^{-6} \div 10^2$ Oe [45]. Lợi thế của cảm biến là công nghệ đơn giản, chi phí thấp, cho độ nhạy lớn ở nhiệt độ phòng. Tuy nhiên, đến nay hạn chế lớn nhất là kích thước lớn và thời gian trễ với cảm biến hoạt động dựa trên hiệu ứng này là lớn (cỡ 3 giây). Ngoài ra, cảm biến có hiện tượng trễ từ do lõi sắt từ dẫn đến sự lặp lại không cao.

1.2.2 Cảm biến từ trường dựa trên hiệu ứng từ-điện trở khổng lồ

Hiệu ứng từ-điện trở (kí hiệu là MR) là sự thay đổi điện trở (điện trở suất) của một vật liệu khi có từ trường ngoài thay đổi. Tỉ số MR% được xác định [2, 61, 94]:

$$MR = \frac{\rho_H - \rho_0}{\rho_0} = \frac{R_H - R_0}{R_0} = \frac{V_H - V_0}{V_0} \quad (1.1)$$

Các nghiên cứu đã chỉ ra tỉ số tín hiệu/nhiều (S/N) của các linh kiện GMR cao và có nhiều triển vọng ứng dụng trong lĩnh vực y-sinh phát hiện hạt từ đơn lẻ [61]. Ưu điểm của cảm biến GMR là tín hiệu lớn, độ nhạy tương đối cao cỡ vài mV/Oe, tỉ số S/N cỡ 10^2 [6]. Nhược điểm của cảm biến loại này là sử dụng màng cấu trúc gồm nhiều lớp, thiết kế khá phức tạp và do vậy chi phí cao.

1.2.3 Cảm biến từ trường dựa trên hiệu ứng từ-điện trở xuyên hầm

Cấu trúc chuẩn của linh kiện sử dụng hiệu ứng xuyên hầm TMR bao gồm 3 lớp vật liệu: lớp sắt từ/lớp điện môi/lớp sắt từ (năm 1998, Baselt) [14]. Ưu điểm nói chung của cảm biến TMR là tín hiệu lớn, độ nhạy cao cỡ mV/Oe, tỉ số tín hiệu trên nhiễu (S/N) cỡ 10^2 [6]. Nhược điểm của cảm biến loại này là sử dụng màng đa lớp khá phức tạp, vật liệu đắt tiền.

1.2.4 Cảm biến từ trường dựa trên hiệu ứng Hall phẳng

Các cảm biến Hall phẳng dạng chữ thập cho thấy, độ nhạy S_H có giá trị cỡ vài chục $\mu\text{V/Oe}$ trên màng đa lớp chứa $NiFe$ [112, 111, 110, 109, 108, 65, 83, 53, 43]. Cảm biến Hall phẳng dạng cầu, độ nhạy tăng đến 100 lần so với cảm biến Hall dạng chữ thập (đạt $150 \mu\text{V/Oe}$) [36]. Đặc biệt, những năm gần đây cảm biến Hall dạng “ring” (vòng xuyên) cho độ nhạy cao đạt $600 \mu\text{V/Oe}$ trên cảm biến Hall gồm 7 “ring” tổ hợp với nhau [102]. Ưu điểm chính của cảm biến Hall phẳng dùng màng mỏng $NiFe$ là công nghệ dễ chế tạo, vật liệu rẻ tiền nhưng tín hiệu lại tương đối nhỏ cỡ $\mu\text{V/Oe}$ (với cảm biến dạng chữ thập).

1.3 Hiệu ứng từ-điện trở dị hướng (AMR)

1.3.1 Hiệu ứng từ-điện trở dị hướng

Hiệu ứng AMR được định nghĩa là sự thay đổi điện trở suất (điện trở) của vật liệu theo vào góc θ giữa từ độ và chiều dòng điện được. Điện trở suất lớn nhất khi dòng điện qua mẫu chạy dọc (parallel) theo phương từ hóa (ρ_p) và nhỏ nhất khi dòng điện qua mẫu vuông góc (orthogonal) với phương từ hóa (ρ_o) [120]. Khi đó, tỉ số $AMR\%$ ngoài việc được xác định theo công thức 1.1 còn được xác định theo biểu thức (1.2) [120]:

$$AMR\% = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho_p - \rho_o}{\frac{1}{3}\rho_p + \frac{2}{3}\rho_o} \quad (1.2)$$

Sự khác nhau của điện trở suất đo được giữa hai trạng thái có góc θ khác nhau là nguyên nhân gây ra hiệu ứng AMR . Do hiệu ứng AMR , độ lớn của điện trở suất được quyết định bởi góc θ giữa từ độ của vật liệu và chiều dòng điện được xác định bởi [94]:

$$\rho(\theta) = \rho_o + (\rho_p - \rho_o). \cos^2\theta = \rho_o + \Delta\rho. \cos^2\theta \quad (1.3)$$

1.3.2 Các loại vật liệu có hiệu ứng AMR

Vật liệu có hiệu ứng AMR được phát hiện lần đầu vào năm 1951 bởi J. Smit [103], ông đã chỉ ra rằng các vật liệu cho hiệu ứng AMR phải dựa trên các kim loại có lớp điện tử chưa điền đầy (lớp 3d): Ni, Fe, Co, ... đó là vật liệu permalloy, vật liệu Ni-Co, hiệu ứng đạt được 5%. Vật liệu cho hiệu ứng AMR còn tồn tại trong một số bán dẫn hoặc kim như: Bi, GaAs, Ga_{1-x}Mn_xAs... nhưng khá nhỏ [125, 116]. Gần đây, hiệu ứng AMR trên vật liệu truyền thống NiFe được nghiên cứu mạnh mẽ như công bố bởi Imran Hashim [35], của nhóm Slamet Widodo (2015) [124], của nhóm Volmer Marius (2015) [65],....

1.3.3 Cảm biến từ trường dựa trên hiệu ứng AMR

1.3.3.a Cảm biến AMR dạng vòng xuyên

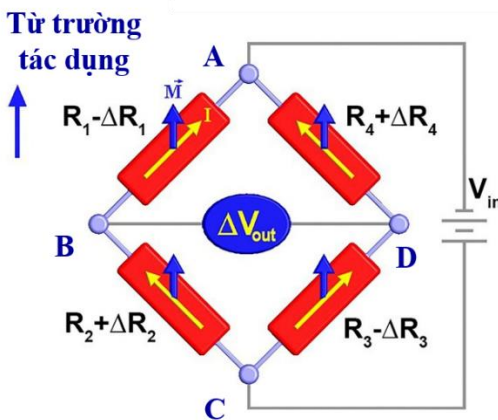
Cấu trúc cảm biến vòng xuyên AMR thích hợp trong việc ứng dụng phát hiện các hạt từ tính đơn lẻ có kích thước cỡ micromet. Cảm biến AMR dạng vòng xuyên có độ nhạy S_H cỡ 2 μV/Oe, có tỉ số tín hiệu chia độ nhiễu (S/N) cỡ 50 lần [49].

1.3.3.b Cảm biến dạng cầu mạch cầu Wheatstone

* Cấu trúc mạch cầu Wheatstone

Mạch cầu Wheatstone (WB) (Hình 1.1) có khả năng giảm nhiễu nhiệt do tính chất tự bù trừ điện trở, độ nhạy của cảm biến dựa trên WB có tính dị hướng hình dạng, với cảm biến có tỉ số dài/rộng (L/W) của mạch cầu càng lớn thì độ nhạy càng cao. Ưu điểm nổi chung của cảm biến AMR dạng WB là tín hiệu lớn, độ nhạy cao (cỡ mV/Oe), tỉ số tín hiệu trên nhiễu (S/N) cỡ vài chục lần [6], công nghệ chế tạo và chi phí thấp. Khi có sự thay đổi nhỏ của điện trở, điện áp lối ra của các nhánh mạch cầu R_i (i = 1÷4) được xác định theo biểu thức [91, 133], với :

$$V_G \sim \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V_{in} \quad (1.4)$$



Hình 1.1. Mô tả WB ảnh hưởng bởi từ trường ngoài do hiệu ứng AMR [91].

* Cảm biến AMR dạng WB

Một loạt các nghiên cứu trên WB chỉ ra rằng, độ nhạy S_H được gây bởi tính dị hướng hình dạng, với cảm biến có tỉ số dài/rộng (L/W) của mạch cầu càng lớn thì độ nhạy càng cao như công bố của A. D. Henriksen (2010) [39]. Đồng thời, A. D. Henriksen cũng chỉ ra rằng, cảm biến dạng cầu sẽ cho độ nhạy lớn hơn cảm biến dạng vòng xuyên khoảng 41% về mặt lý thuyết [37]. Khi nghiên cứu trên cảm biến Hall, F.W. Østerberg cũng chỉ ra rằng, với kích thước tương đương độ nhạy của cảm biến dạng mạch cầu lớn hơn độ nhạy của cảm biến dạng chữ thập cỡ 6,8 lần [85]. Ưu điểm nói chung của cảm biến AMR dạng WB là tín hiệu lớn, độ nhạy cao (cỡ mV/Oe), S/N cỡ vài chục lần [6], công nghệ chế tạo và chi phí thấp. So sánh các loại cảm biến dựa trên hiệu ứng từ-điện trở được chỉ ra trên Bảng 1.2.

Bảng 1.2. Bảng so sánh một số loại cảm biến đo từ trường cấu trúc màng mỏng nano dựa trên vật liệu sắt từ.

TLTK	Cảm biến	Cấu trúc vật liệu	Độ nhạy	Đặc điểm cảm biến
[126].	GMR	Ta/NiFeCr/PtMn/CoFe/Ru/Co Fe	500 $\mu\text{V}/\text{Oe}$	Phức tạp, đắt tiền
[64].	VS	Si/SiO ₂ /Ta/NiFe/Co/Cu/Co ₈₀ Fe ₂₀ /IrMn/Ta	500 $\mu\text{V}/\text{Oe}$	Phức tạp, đắt tiền
[27].	TMR	IrMn/Mn/CoFe/Ru/CoFeB/M gO/CoFeB/Ta/NiFe/CaP	32mV/V/O e	Phức tạp, đắt tiền
[53].	PHE	Chữ thập: Ta/NiFe/Cu/IrMn/Ta	19,86 $\mu\text{V}/\text{Oe}$	- Nếu vật liệu truyền thống, đơn lớp thì: tín hiệu nhỏ, công nghệ đơn giản, giá thành thấp.
[36].		Cầu Wheatstone: Ta/NiFe/Ta	150 $\mu\text{V}/\text{Oe}$	
[102].		7 vòng xuyên: Ta/IrMn/Cu/NiFe/Ta	600 $\mu\text{V}/\text{Oe}$	
[81].	Lai giữa AMR & PHE	1 vòng xuyên: Ta/NiFe/Cu/NiFe/IrMn/Ta	9,5 m Ω /Oe	- Nếu vật liệu màng đa lớp cấu trúc spin van thì: tín hiệu lớn, công nghệ phức tạp, chi phí lớn.
		17 vòng xuyên: Ta/NiFe/Cu/NiFe/IrMn/Ta	102,6 m Ω /Oe	
[49].	AMR	Vòng: NiFe	$\sim 2 \mu\text{V}/\text{Oe}$	- Tín hiệu nhỏ, công nghệ đơn giản, chi phí thấp.

		Cầu Wheatstone: Ta/NiFe/Ta	~ mV/Oe	- Tín hiệu lớn, công nghệ đơn giản, chi phí thấp.
--	--	-------------------------------	---------	---

1.4 Hiện tượng nhiễu trong cảm biến từ trường

Nhiều thường chông lên các tín hiệu thật đo được của cảm biến đồng thời che mờ đi các tín hiệu yếu. Người ta thường dùng S/N là tiêu chí đánh giá cảm biến. Tỉ số S/N càng lớn thì cảm biến cho tín hiệu càng chính xác. Các loại nhiễu cơ bản gồm: nhiễu tần, nhiễu lượng tử và nhiễu nhiệt. Ở tần số nhỏ ($f < 300\text{Hz}$), thì chủ yếu là nhiễu tần, ở tần số $> 1\text{ kHz}$ thì nhiễu nhiệt chiếm chủ yếu [94].

1.5 Đối tượng, mục tiêu và nội dung nghiên cứu

Mục đích chung của luận án là nghiên cứu chế tạo màng mỏng *NiFe* và phát triển chế tạo cảm biến trong một số ứng dụng trong lĩnh vực đo lường và cảm biến sinh học. Các nghiên cứu sẽ tập trung theo hướng tối ưu cấu hình, hình dạng, kích thước và thiết kế cảm biến để tăng cường độ nhạy và độ phân giải của cảm biến đo từ trường theo mỗi ứng dụng cụ thể. Với 2 ứng dụng trên, đòi hỏi cảm biến phải có độ nhạy cao trong dải từ trường thấp và để hướng tới mục đích thương mại, cảm biến phải có công nghệ đơn giản, hạ thấp chi phí sản phẩm, phù hợp với điều kiện nghiên cứu Việt Nam.

Mục tiêu cụ thể luận án là: (i) Đơn giản hóa quy trình công nghệ; (ii) Cấu trúc vật liệu đơn giản dạng màng đơn lớp, công nghệ chế tạo đơn giản; (iii) Tăng cường độ nhạy cảm biến cao trong vùng từ trường thấp; (iv) Khai thác khả năng ứng dụng cảm biến đo từ trường của trái đất và ứng dụng cảm biến sinh học.

Chương 2

CÁC PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

2.1 Chế tạo vật liệu màng mỏng bằng phương pháp phún xạ

Luận án sử dụng hệ thiết bị phún xạ ATC-2000F. Thiết bị có 6 súng và chứa được 6 bia vật liệu khác nhau. Luận án sử dụng các vật liệu bia, bao gồm: Bia vật liệu sắt từ hợp kim permalloy: $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (99,99%); bia vật liệu kim loại phi từ tính: Cu (99,99%), Ta (99,99%); bia vật liệu dùng để bảo vệ cảm biến: SiO_2 .

Quy trình đầy đủ khi chế tạo mẫu màng mỏng, bao gồm: Chuẩn bị đế Si/ SiO_2 , phún xạ màng sắt từ, phún xạ màng Cu, phún xạ lớp màng bảo vệ SiO_2 .

2.2 Chế tạo cảm biến

2.2.1 Thiết kế và chế tạo mặt nạ cảm biến

Mặt nạ sử dụng trong luận án được chia làm 3 nhóm ứng với 3 dạng theo công nghệ chế tạo khác nhau, gồm:

- Cảm biến nhóm 1 là cảm biến có kích thước mm, được chế tạo bằng mặt nạ kim loại, bao gồm 2 loại cảm biến: S₁₋₁ là cảm biến nhóm 1, đơn thanh điện trở; S₁₋₃ là cảm biến nhóm 1, ba thanh điện trở mắc nối tiếp.

- Cảm biến nhóm 2 là cảm biến có kích thước μm , được chế tạo bằng mặt nạ polymer, bao gồm 4 loại cảm biến: S₂₋₁ là cảm biến nhóm 2, đơn thanh điện trở; S₂₋₃ là cảm biến nhóm 2, ba thanh điện trở mắc nối tiếp; S₂₋₅ là cảm biến nhóm 2, năm thanh điện trở mắc nối tiếp; S₂₋₆ là cảm biến nhóm 2, sáu thanh điện trở mắc nối tiếp-song song.

- Cảm biến nhóm 3 là cảm biến có kích thước μm , được chế tạo bằng mặt nạ thủy tinh phủ crôm, bao gồm 2 loại cảm biến: S₃₋₆ là cảm biến nhóm 3, sáu thanh điện trở mắc nối tiếp; S₃₋₁₈ là cảm biến nhóm 3, mười tám thanh điện trở mắc nối tiếp-song song.

Đặc điểm của mặt nạ nhóm 1 là đơn giản, tái sử dụng được nhiều lần, bền về mặt cơ học. Quy trình chế tạo hoàn thiện cảm biến nhóm 1 là chỉ cần duy nhất phún xạ mà không cần quang khắc. Nhược điểm lớn nhất của mặt nạ nhóm 1 là kích thước lớn cỡ mm.

Đặc điểm của mặt nạ nhóm 2 là công nghệ chế tạo đơn giản, rẻ tiền và có chất lượng tốt hơn so với nhóm 1, chủ động ngay tại Việt Nam. Tuy nhiên với mặt nạ nhóm 2 thì hạn chế lớn nhất là chỉ cho phép sử dụng được một lần. Độ phân giải tương đối cao, kích thước nhỏ nhất có thể định hình được cỡ 10 μm .

Ưu điểm của mặt nạ nhóm 3 so với 2 nhóm trình bày ở trên là cho phép chế tạo được cảm biến loại nhỏ cỡ vài μm với chất lượng cao, có thể sử dụng được mặt nạ nhiều lần, dễ dàng làm sạch nhờ sử dụng các hóa chất chuyên dụng. Cảm biến có độ sắc nét cao, độ phân giải cao cỡ 1 μm [138], đường biên sắc nét,... Nhược điểm của mặt nạ loại này là giá thành mặt nạ tương đối cao, khi thao tác thực hành đòi hỏi kỹ thuật cao, tỉ mỉ và đặc biệt do không chủ động chế tạo được mặt nạ nên việc thay thế điều chỉnh thiết kế sẽ mất thời gian gia công, phụ thuộc các công ty nước ngoài chuyên cung cấp.

2.2.2 Quy trình quang khắc chế tạo cảm biến

2.2.2.a Thiết bị quang khắc MJB4

Khi chế tạo cảm biến, chúng tôi sử dụng máy quang khắc MJB4 (Suss Microtec, Germany) để quang khắc, thiết bị có thể chế tạo những linh kiện nhỏ với độ chính xác cao, độ phân dải lớn nhất là 0,5 μm .

2.2.2.b. Quy trình quang khắc

Quá trình quang khắc để chế tạo linh kiện AMR của luận án đã sử dụng 3 nhóm mặt nạ khác nhau như mô tả ở phần trên, bao gồm 3 lần quang khắc là quang khắc mặt nạ điện trở, quang khắc mặt nạ điện cực và quang khắc mặt nạ bảo vệ cảm biến.

2.3 Các phương pháp nghiên cứu cấu trúc và vi cấu trúc

Các phương pháp nghiên cứu cấu trúc trong luận án bao gồm: quan sát bề mặt bằng hiển vi điện tử quét SEM; khảo sát chiều dày màng mỏng bằng hiển vi điện tử FE-SEM; quan sát cấu trúc vật liệu bằng phương pháp nhiễu xạ X-ray; đo phổ thành phần bằng phương pháp EDX.

2.4 Nghiên cứu tính chất từ của vật liệu màng mỏng

Được thực hiện bằng hai phương pháp: đo đường cong từ hóa bằng thiết bị VSM và mô phỏng và tính toán bằng phần mềm mô phỏng Maxwell 2D software (Ansys, Canonsburg, PA, USA).

2.5 Khảo sát tính chất từ-điện trở

2.5.1 Hệ đo tính chất từ-điện trở trên màng mỏng

Hiệu ứng AMR trong luận án được đo nhờ hệ thiết bị từ-điện trở. Hệ đo mẫu màng mỏng bằng phương pháp 4 mũi dò.

2.5.2 Hệ đo tính chất từ-điện trở trên linh kiện cảm biến

Do sự thay đổi điện áp của linh kiện từ-điện trở đáp ứng theo từ trường bằng hệ đo từ điện trở AMR trong thang đo từ trường nhỏ nhờ cuộn Helmholtz. Với linh kiện cảm biến, 4 điện cực được tạo ra trong đó, hai điện cực dùng để cấp dòng thông qua thiết bị Keithley 6220, hai điện cực còn lại được kết nối với hệ Keithley 2182A để lấy điện áp lỗi ra. Tất cả kết nối với máy tính và đo tự động.

Chương 3

NGHIÊN CỨU CẤU TRÚC VÀ TÍNH CHẤT CỦA MÀNG NIFE

3.1 Nghiên cứu cấu trúc và vi cấu trúc của màng NiFe và của cảm biến AMR

3.1.1 Phân tích thành phần bằng phương pháp EDX

Kết quả phân tích phổ cho ta tỉ số phần trăm nguyên tử của Ni và Fe đo được: Ni là 81,8% và Fe là 18,2% so với tỉ phần danh định ban đầu của bia là $Ni_{80}Fe_{20}$.

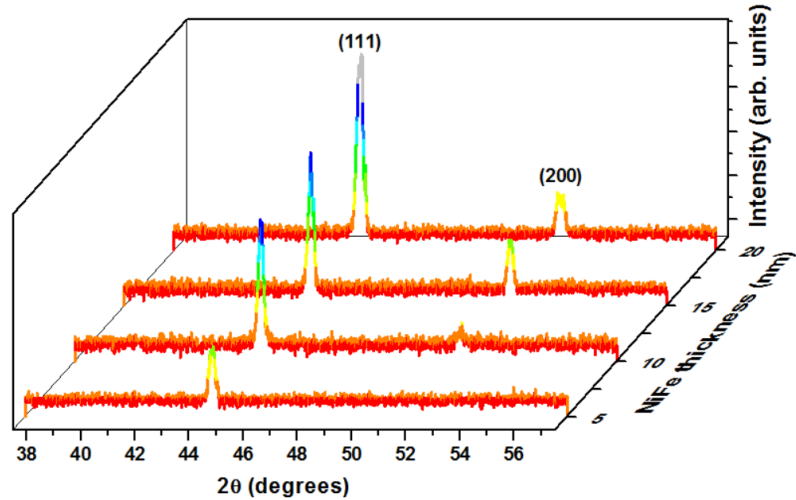
3.1.2 Khảo sát chiều dày màng mỏng bằng hiển vi điện tử FE-SEM

Từ kết quả chiều dày khảo sát được, tính được tốc độ lắng đọng trung bình của các lớp màng mỏng: với màng NiFe là $v_{\text{sputt-NiFe}} = 1,0$ (nm/phút), với màng Cu là $v_{\text{sputt-Cu}} = 2,94$ (nm/phút), với màng Ta là $v_{\text{sputt-Ta}} = 1,0$ (nm/phút). Chiều dày của màng mỏng NiFe, màng

Cu và màng Ta được xác định: $t_{NiFe} = 1,0 \times t_{sputt}$ (nm); $t_{Cu} = 2,94 \times t_{sputt}$ (nm); $t_{Ta} = 1,0 \times t_{sputt}$ (nm) (với thời gian phun xạ tính bằng phút).

3.1.3 Nghiên cứu cấu trúc tinh thể bằng phương pháp đo nhiễu xạ tia X

Cấu trúc tinh thể của màng sắt từ với chiều dày khác nhau là 5, 10, 15, 20 nm được đo bằng phương pháp đo nhiễu xạ X-ray. Kết quả cho thấy các mẫu NiFe đều có các đỉnh nhiễu xạ ở góc $2\theta = 44,3^\circ$, còn đỉnh ở góc $2\theta = 51,7^\circ$ xuất hiện với các màng có bề dày 15, 20 nm, tương ứng với cấu trúc định hướng tinh thể là (111) và (200) của NiFe (Hình 3.1). Mặt khác ta thấy, màng càng dày thì cường độ đỉnh nhiễu xạ càng cao, từ chiều rộng của đỉnh nhiễu xạ ta có thể tính được kích thước hạt tinh thể trung bình là 10 nm theo công thức Scherrer [87].



Hình 3.1. Phổ nhiễu xạ XRD đo được trên màng NiFe với các chiều dày 5, 10, 15, 20 nm.

3.2 Nghiên cứu tính chất từ của màng mỏng NiFe

3.2.1 Tính chất từ của màng mỏng phụ thuộc vào từ trường ghim (H_{pinned})

Các mẫu màng NiFe được lắng đọng trên đế Si/SiO₂ có kích thước 10×10 mm², có cùng chiều dày $t_{NiFe} = 5$ nm, trong cùng một điều kiện quy trình công nghệ nhưng độ lớn của từ trường ghim ban đầu H_{pinned} khác nhau là 0, 600, 900 Oe. Ta thấy với mẫu không ghim thì đường cong từ trễ theo cả hai phương là như nhau, với mẫu ghim 900 Oe có sự khác biệt rất rõ: theo phương phương ghim, đường cong dốc, có sự đảo từ đột ngột tại giá trị H_c (~ 3,2 Oe) gọi là phương trục dễ (EA); theo phương trục giao với phương ghim, đường cong thoải hơn, giá trị từ trường dị hướng H_k được xác định là giá trị từ trường giao cắt giữa 2 đường cong từ hóa đo theo 2 phương EA và HA trong trường hợp này đạt cỡ 15 Oe. Với mẫu ghim 600 Oe, cho giá trị trung gian. Từ kết quả này, trong các phép khác sát thông số khác, ta chọn khảo sát theo phương dễ từ hóa và có $H_{pinned} = 900$ Oe để nghiên cứu.

3.2.2 Tính chất từ của màng mỏng phụ thuộc vào hình dạng

Trong phép khảo sát này, các mẫu màng mỏng được lựa chọn có cùng chiều dày $t_{NiFe} = 15$ nm, cùng một từ trường ghim 900 Oe nhưng với các hình dạng khác nhau và có diện

tích tương đối bằng nhau, bao gồm: (i) hình tròn đường kính $t_{\text{NiFe}} = 3,6 \text{ mm}$ (diện tích bằng $10,1 \text{ mm}^2$), (ii) hình elip $1 \times 10 \text{ mm}^2$ (diện tích bằng $7,9 \text{ mm}^2$), (iii) hình chữ nhật $1 \times 10 \text{ mm}^2$ (diện tích bằng $10,0 \text{ mm}^2$). Các mẫu được khảo sát trong mặt phẳng màng và theo phương EA. Kết quả cho thấy, mẫu dạng hình chữ nhật cho tính chất dị hướng hình dạng tốt hơn hai mẫu còn lại, thể hiện thông qua đường cong từ trễ tỉ đối có độ dốc cao hơn, có H_c nhỏ hơn, bão hòa nhanh hơn, từ dư lớn hơn thể hiện tính dị hướng đơn trục tốt hơn dọc theo phương ghim.

3.2.3 Tính chất từ của màng phụ thuộc vào tỉ số kích thước dài/rộng (L/W)

Trong phép khảo sát này, chúng tôi chọn mẫu hình chữ nhật với các kích thước khác nhau và cùng chiều dày $t_{\text{NiFe}} = 15 \text{ nm}$ và cùng chiều rộng $W = 1 \text{ mm}$ nhưng chiều dài mẫu L thay đổi nhận các giá trị 5, 7, 10 mm. Kết quả thực nghiệm cho thấy mẫu có chiều dài $L = 10 \text{ mm}$ cho tính chất dị hướng hình dạng tốt hơn hai mẫu còn lại, thể hiện thông qua đường cong từ trễ tỉ đối dốc hơn, có H_c nhỏ hơn, bão hòa nhanh hơn. Các kết quả này cho ta định hướng chế tạo các màng mỏng cho tính chất từ-điện trở dị hướng lớn là những màng có dạng hình chữ nhật, có tỉ số L/W lớn, ghim dọc theo chiều dài.

3.2.4 Tính chất từ phụ thuộc vào chiều dày của màng mỏng NiFe

Trong phép khảo sát này, chúng tôi chọn màng hình vuông cùng kích thước $10 \times 10 \text{ mm}^2$, được từ hóa ban đầu trong từ trường ghim 900 Oe dọc theo 1 cặp cạnh, chiều dày của màng thay đổi $t_{\text{NiFe}} = 5, 10, 15, 20 \text{ nm}$. Kết quả cho thấy với mẫu có chiều dày màng càng mỏng thì từ độ bão hòa M_s cũng như lực kháng từ H_c và từ trường dị hướng H_k càng giảm.

3.3 Tính chất từ-điện trở trên màng mỏng NiFe

3.3.1 Tính chất từ-điện trở phụ thuộc vào từ trường ghim (H_{pinned})

Tính chất từ-điện trở được đo bằng phương pháp bốn mũi dò nghiên cứu trên màng mỏng NiFe có kích thước $10 \times 10 \text{ mm}^2$, chiều dày 5 nm trong 2 trường hợp: không được định hướng ghim ($H_{\text{pinned}} = 0 \text{ Oe}$) và được định hướng bởi từ trường ghim ($H_{\text{pinned}} = 900 \text{ Oe}$). Kết quả với mẫu không ghim, tỉ số $AMR\%$ nhỏ cỡ 0,055%. Đối với mẫu từ trường ghim có 900 Oe, giá trị tỉ số từ-điện trở $AMR\%$ theo phương vuông góc đạt giá trị 0,23% gấp 5 lần so với giá trị 0,44% đo được theo phương song song với phương ghim.

3.3.2 Tính chất từ-điện trở của màng phụ thuộc vào tỉ số kích thước dài/rộng L/W

Tỷ số $AMR\%$ đáp ứng theo từ trường ngoài được nghiên cứu cho một màng có kích thước chiều dài $L = 4 \text{ mm}$, chiều rộng khác nhau ($W = 150, 300 \text{ và } 450 \mu\text{m}$), độ dày $t_{\text{NiFe}} = 15 \text{ nm}$. Ta thấy thanh điện trở rộng hơn cho hiệu ứng AMR thấp hơn. Tỉ số $AMR\%$ cao nhất là 0,34% được tìm thấy trong mẫu với $W = 150 \mu\text{m}$ ($L/W = 26,67$), $AMR\%$ giảm xuống 0,15% đối với $W = 450 \mu\text{m}$ ($L/W = 8,89$). Tương tự, độ dốc của đường cong AMR cũng giảm khi W tăng. Kết quả này chứng tỏ tính dị hướng từ đơn trục theo chiều dài hay theo hướng được ghim ban đầu trong các thành phần điện trở có một hệ số khử từ nhỏ và như

một hệ quả, tỉ lệ $AMR\%$ sẽ thấp hơn nhiều trong trường hợp mẫu được ghim theo chiều ngang của thanh điện trở.

3.3.3 Tính chất từ-điện trở của màng phụ thuộc vào chiều dày

Đáp ứng theo từ trường ngoài của tỷ số $AMR\%$ trên các mẫu có chiều dày khác nhau được khảo sát trên thanh điện trở $NiFe$ có chiều dài $L = 4$ mm, chiều rộng $W = 150$ μm nhưng chiều dày thay đổi $t_{NiFe} = 5, 10, 15$ nm. Ta thấy thanh điện càng mỏng cho tín hiệu AMR càng lớn. Tỉ số $AMR\%$ cao nhất là 0,85% được tìm thấy trong mẫu với $t_{NiFe} = 5$ nm, $AMR\%$ giảm xuống 0,61% đối với $t_{NiFe} = 10$ nm và 0,34% với mẫu $t_{NiFe} = 15$ nm.

Với các kết quả nghiên cứu thu được ở chương 3 sẽ định hướng cho luận án thiết kế và chế tạo cảm biến WB dựa trên các công nghệ khác nhau nhằm tăng cường độ nhạy đáp ứng yêu cầu ứng dụng theo xu hướng đơn giản quy trình công nghệ, giảm thiểu chi phí sản xuất.

Chương 4

NGHIÊN CỨU HIỆU ỨNG TỪ-ĐIỆN TRỞ DỊ HƯỚNG TRÊN CÁC CẢM BIẾN CẦU WHEATSTONE

4.1 Mô phỏng và khảo sát thực nghiệm để tối ưu cấu hình thiết kế cầu

Trong luận án này, chúng tôi nghiên cứu đóng góp của vật liệu nối điện cực bằng Cu lên tính chất điện của một nhánh điện trở của mạch cầu Wheatstone có dạng hình zic-zắc bằng cách so sánh với một nhánh điện trở tương tự nhưng được nối bằng chính vật liệu $NiFe$. Nhánh điện trở gồm 6 thành phần nhỏ, kích thước mỗi thành phần là 1×10 mm², chiều dày 5 nm, có trục dễ theo chiều dọc mỗi thành phần và chúng được kết nối với nhau bằng vật liệu Cu hoặc bằng vật liệu $NiFe$. Kết quả cho thấy rằng tỉ số $AMR\%$ của thanh điện trở với điện cực nối bằng Cu có giá trị 0,25% cao gấp 1,5 lần giá trị $AMR\%$ đo được trên thanh điện trở với điện cực nối là $NiFe$.

4.2 Quan sát cấu trúc bề mặt của cảm biến bằng thiết bị SEM

Các kết quả quan sát cấu trúc bề mặt cảm biến bằng thiết bị SEM và NanoSEM cho thấy đường rìa của linh kiện trơn, mịn và có độ sắc nét cao. Cảm biến nhóm 2, có sai khác nhỏ hơn 1%, còn cảm biến nhóm 3 có sai khác nhỏ hơn 0,3%.

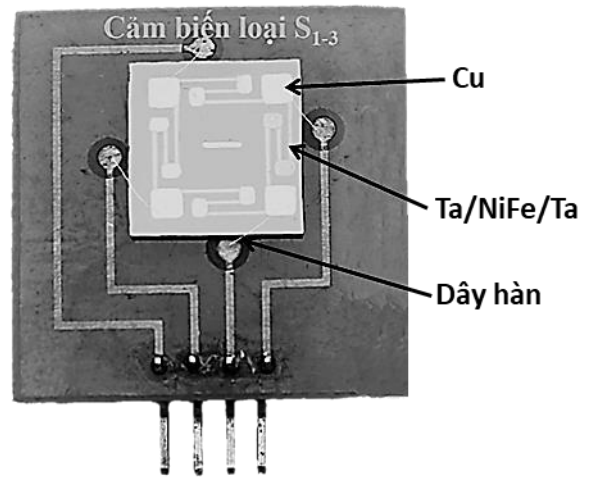
4.3 Cảm biến kích thước mm (nhóm 1)

4.3.1 Cấu trúc cảm biến

Cảm biến kích thước nhóm 1 gồm 2 loại cấu hình khác nhau đã được tập trung nghiên cứu trong luận án này:

- Loại S_{1-1} là cảm biến đơn thanh, trong đó mỗi nhánh cầu gồm 1 đơn thanh điện trở có kích thước chiều rộng là $W = 1$ mm và chiều dài thay đổi, bao gồm 3 kích thước khác nhau: $L = 3, 5, 7$ mm, đồng thời trong loại cảm biến này, chúng tôi cũng thay đổi chiều dày của lớp màng $NiFe$ là $t_{NiFe} = 5, 10, 15$ nm để lựa chọn chiều dày tối ưu cho tín hiệu cảm biến.

- Loại S_{1-3} là cảm biến đa thanh trong đó mỗi nhánh điện trở gồm 3 thanh điện trở nối tiếp nhau, chiều rộng các thanh là $W = 0,3$ mm, chiều dài gồm 2 thanh dài $L_1 = 7,0$ mm và 1 thanh ngắn $L_2 = 4,2$ mm được mắc nối tiếp nhằm tăng cường tín hiệu của cảm biến (Hình 4.1).



Hình 4.1. Ảnh cảm biến nhóm 1 loại đa thanh trong đó mỗi nhánh gồm 3 thanh điện trở mắc nối tiếp S_{1-3} (b).

4.3.2 Tín hiệu điện áp trên cảm biến đơn thanh (S_{1-1})

4.3.2.a Tín hiệu điện áp trên cảm biến phụ thuộc vào chiều dày lớp màng $NiFe$

Để khảo sát ảnh hưởng của chiều dày lớp màng $NiFe$ lên tín hiệu của cảm biến, các cảm biến dạng đơn thanh S_{1-1} với thiết kế 1×7 mm² có chiều dày $NiFe$ khác nhau 5, 10 và 15 nm đã được chế tạo. Kết quả đáp ứng của điện áp lồi ra theo từ trường ngoài tác dụng cho thấy, lớp màng $NiFe$ càng mỏng thì điện áp lồi ra cảm biến càng lớn (Hình 4.2). Ngoài ra để đặc trưng cho cảm biến, người ta còn dùng khái niệm độ nhạy S_H và S_H^* được xác định thông qua sự thay đổi điện áp ΔV , dòng cấp I và điện trở nội R (thế cấp $V_{in} = IR$) biểu thức 4.1 và 4.2 [91]:

$$S_H = \frac{dV}{dH} = \frac{\Delta V}{\Delta H} \quad (mV/Oe) \quad (4.1)$$

$$S_H^* = \frac{1}{V_{in}} \frac{dV}{dH} = \frac{1}{IR} \frac{dV}{dH} \quad (mV/V/Oe) \quad (4.2)$$

Cảm biến có chiều dày 5 nm cho sự thay đổi điện áp lớn nhất $\Delta V_{max} = 8,2$ mV, tương ứng với độ nhạy cảm biến $S_H = 0,46$ mV/Oe. Hiệu ứng từ-điện trở dị hướng AMR về bản chất phụ thuộc rất mạnh vào chiều dày lớp sắt từ theo qui luật tỉ số AMR tăng khi giảm chiều dày lớp sắt từ. Theo qui luật thay đổi này, chiều dày tối ưu cho cảm biến được lựa chọn là 5 nm để tiến hành các nghiên cứu tiếp theo.

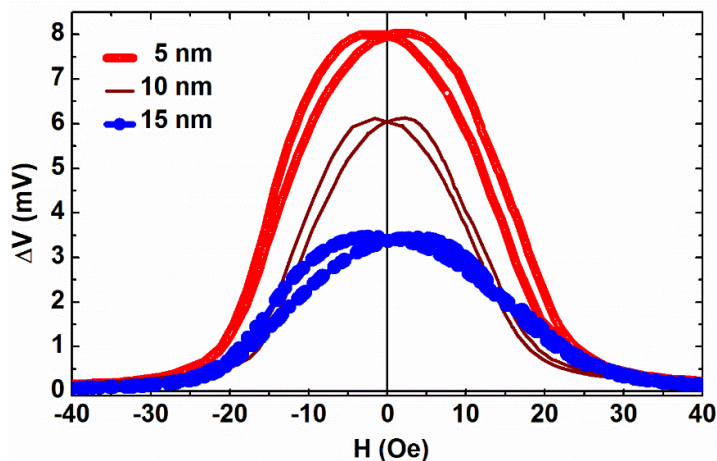
4.1.2.b Tín hiệu điện áp trên cảm biến phụ thuộc vào tỉ số dài/rộng L/W

Với mục đích nghiên cứu ảnh hưởng của tỉ số kích thước dài/rộng tới tính chất của cảm biến, cảm biến loại S_{1-1} , kích thước chiều rộng như nhau $W = 1$ mm và chiều dài thay đổi $L = 3, 5$ và 7 mm đã được nghiên cứu. Các cảm biến này có lớp màng $NiFe$ chiều dày như nhau là 5 nm. Kết quả cho thấy, tín hiệu lối ra của cảm biến tăng khi tăng tỉ số L/W của thanh điện trở. Cảm biến 1×7 mm² có sự thay đổi điện áp $\Delta V_{max} = 8,2$ mV và độ nhạy từ trường $S_H = 0,46$ mV/Oe lớn gần gấp 4,2 lần so với giá trị thu được trên cảm biến 1×3 mm².

4.3.3 Tín hiệu điện áp trên cảm biến đa thanh mắc nối tiếp (S_{1-3})

Kết hợp các nghiên cứu khảo sát sự ảnh hưởng cấu hình cảm biến và chiều dày lớp màng $NiFe$, cảm biến với cấu hình và thiết kế tối ưu được lựa chọn theo các tiêu chí sau: (i) chiều dày lớp màng $NiFe$ mỏng, (ii) tỉ số chiều dài/chiều rộng của thanh trở lớn. Với 2 tiêu chí này, cảm biến tối ưu có chiều dày $t_{NiFe} = 5$ nm, loại S_{1-3} có 3 thanh điện trở độ rộng $W = 0,3$ mm và chiều dài $L_1 = 4,2$ mm (1 thanh), $L_2 = 7$ mm (2 thanh) được nối tiếp với nhau trong mỗi nhánh đã được chế tạo.

Tín hiệu điện áp lối ra của cảm biến lớn $\Delta V = 18,1$ mV và độ nhạy $S_H = 0,93$ (mV/Oe) trong dải từ trường nhỏ cỡ 20 Oe (xem Bảng 4.1). Tuy nhiên, nếu quan tâm đến điện áp đặt vào thì giá trị độ nhạy $S_H^* = 0,22$ mV/V/Oe tính toán được trên cảm biến này không lớn hơn so với cảm biến đơn thanh S_{1-1} được trình bày ở trên. Điều này được hiểu là do trong trường hợp này, điện trở của nhánh cảm biến $R = 4,2$ k Ω rất lớn, hơn 10,4 lần khi so sánh với cảm biến S_{1-1} với kích thước dài \times rộng là 1×7 mm². Điện trở lớn như vậy sẽ dẫn đến hệ quả



Hình 4.2. Đồ thị đáp ứng điện áp lối ra theo từ trường ngoài của các cảm biến cảm biến dạng thanh đơn S_{1-1} kích thước rộng \times dài là 1×7 mm² có chiều dày $NiFe$ khác nhau $t_{NiFe} = 5, 10$ và 15 nm, đo tại 5 mA.

không mong muốn là nhiễu nhiệt lớn kéo theo sự giảm mạnh của tỉ số tín hiệu trên nhiễu S/N của cảm biến khi đưa ra ứng dụng, đặc biệt với các ứng dụng yêu cầu độ phân giải và chính xác cao của từ trường đo. Chính vì vậy, với cách tiếp cận xây dựng cấu trúc cầu dạng đa thanh, trong đó mỗi nhánh gồm nhiều thanh mắc nối tiếp sẽ không phải cách tiếp cận tối ưu để tăng cường các thông số hoạt động của cảm biến. Do vậy, giải pháp phải tối ưu cấu hình mắc các thanh điện trở theo cấu hình tổ hợp sẽ tiếp tục được trình bày ở nhóm cảm biến Nhóm 2, Chương 4 dưới đây.

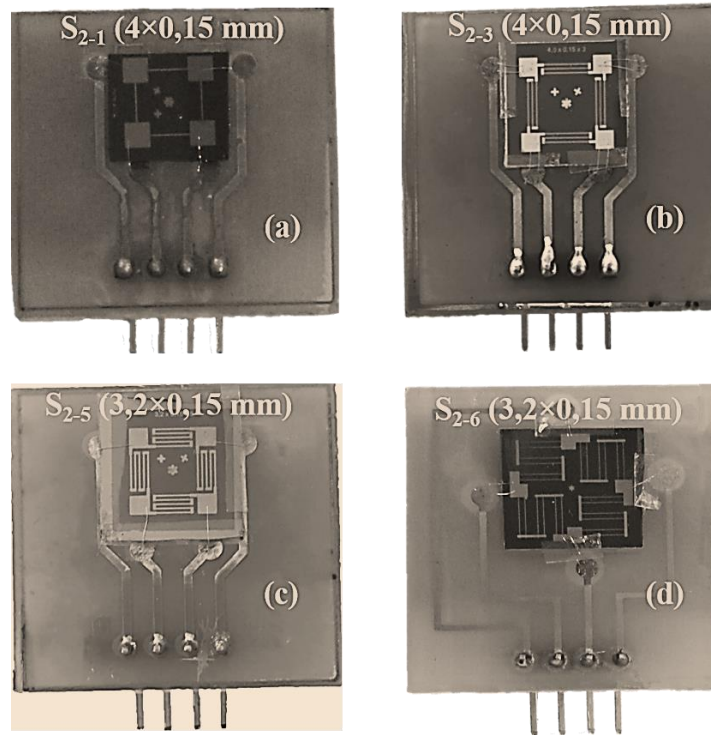
Bảng 4.1. Giá trị độ lệch điện áp, độ nhạy, điện trở của linh kiện nhóm 1 khi thay đổi chiều dài, kích thước.

Loại cảm biến và kích thước (W×L×d) (mm×mm×nm)	R(Ω)	Dòng cấp (mA)	ΔV(mV)	S _H (mV/Oe)
S ₁₋₁ (1×3×5)	170	5	2,9	0,11
S ₁₋₁ (1×5×5)	248	5	6,4	0,39
S ₁₋₁ (1×7×5)	405	5	8,2	0,46
S ₁₋₁ (1×7×10)	352	5	6,1	0,34
S ₁₋₁ (1×7×15)	220	5	3,6	0,16
S ₁₋₃ (0,3 ×18,2×5)	4235	1	18,1	0,93

4.4 Cảm biến kích thước μm (nhóm 2)

4.4.1 Cấu trúc cảm biến

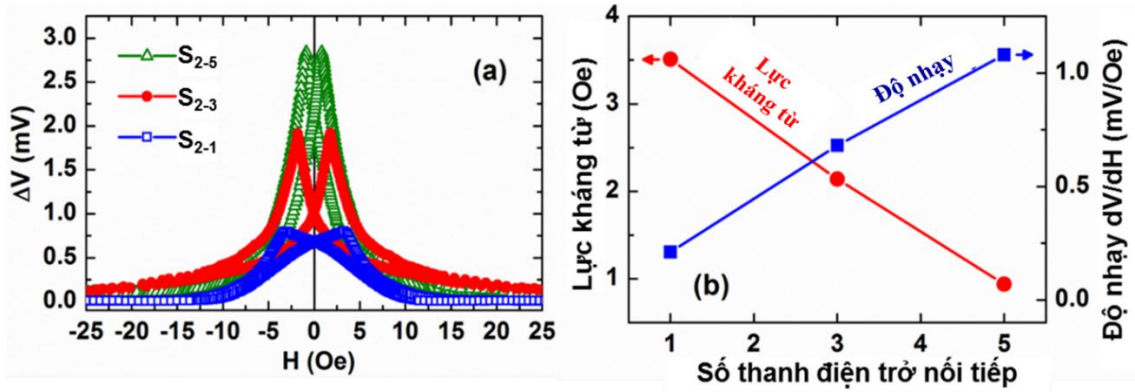
Cảm biến nhóm 2 là nhóm cảm biến được chế tạo sử dụng mặt nạ polymer kích thước μm sử dụng công nghệ in phun gồm 4 loại cảm biến tương ứng với số lượng thanh điện trở trên mỗi nhánh là khác nhau từ đơn thanh (S₂₋₁), đa thanh mắc nối tiếp (S₂₋₃, S₂₋₅) và đa thanh mắc tổ hợp nối tiếp kết hợp song song (S₂₋₆), các cảm biến có cùng kích thước chiều rộng $W = 150 \mu\text{m}$ nhưng có chiều dài khác nhau. Loại S₂₋₁ là cảm biến loại đơn thanh có chiều dài $L = 4,0 \text{ mm}$; loại S₂₋₃ và S₂₋₅ là cảm biến tổ hợp nối tiếp gồm 3 thanh điện trở có chiều dài là $L = 4,0 \text{ mm}$ và 5 thanh điện trở có chiều dài $L = 3,2 \text{ mm}$ tương ứng, loại S₂₋₆ là cảm biến dạng tổ hợp nối tiếp-song song, gồm 6 thanh điện trở có chiều dài $L = 3,2 \text{ mm}$ (Hình 4.3).



Hình 4.3. Ảnh cảm biến nhóm 2: cảm biến đơn thanh S_{2-1} (a) [1,4,5,7], cảm biến tổ hợp nối tiếp S_{2-3} (b) [7], S_{2-5} (c) [7] và cảm biến nối tiếp-song song tổ hợp S_{2-6} (d) [1,91].

4.4.2 Tín hiệu điện áp trên cảm biến đa thanh mắc nối tiếp

Từ đường cong từ điện trở và độ nhạy cảm biến S_H đo trên cảm biến đơn thanh S_{2-1} tại dòng cấp 1 mA cho kết quả độ lệch điện áp trên mạch cầu WB với cường độ dòng điện $I = 1$ mA có giá trị đạt $\Delta V = 7,6$ mV và $S_H = 2,25$ mV/Oe [4,5,90]. Khi tăng số thanh điện trở trên mỗi nhánh theo cách mắc nối tiếp, kết quả tín hiệu cảm biến loại S_{2-3} , S_{2-5} so với loại đơn thanh S_{2-1} theo từ trường ngoài đã được khảo sát và so sánh. Phép đo tại dòng cấp $I = 0,1$ mA cho độ lệch điện áp cực đại tăng từ 0,8 mV (S_{2-1}) lên 1,91 mV (S_{2-3}) và đến 2,85 mV (S_{2-5}). Kết quả của tín hiệu điện áp ngày càng tăng, độ nhạy S_H tăng từ 0,21 lên 0,68 đến 1,08 mV/Oe (Hình 4.4a). Từ giá trị đường cong $\Delta V(H)$ ta có thể tính được lực kháng từ H_c theo quy luật giảm khi số thanh điện trở tăng (Hình 4.4b).

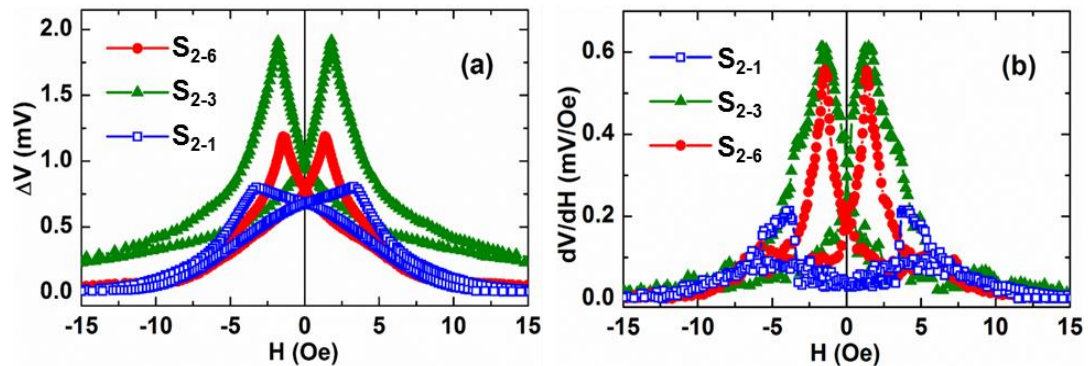


Hình 4.4. Đường cong đáp ứng độ lệch điện áp theo từ trường ngoài trên các cảm biến nhóm 2 loại S_{2-3} , S_{2-5} so sánh với S_{2-1} (a) và đồ thị mô tả quy luật độ nhạy, lực kháng từ của các cảm biến tương ứng (b), đo tại 0,1 mA [91].

Trên các cảm biến nhóm 2, khi tăng dòng điện, tín hiệu điện áp cũng tăng tuyến tính theo. Hệ quả của sự gia tăng điện trở này là độ nhạy cảm biến S_H^* tính toán được dao động cỡ 1,75 mV/V/Oe trong Bảng 4.2 hầu như không gia tăng khi số thanh cảm biến tăng lên. Chính vì vậy, việc tìm ra giải pháp cho thiết kế mạch cầu để tăng cường tín hiệu cảm biến mà không gia tăng nhiều nhiệt là cần thiết. Theo đó, cấu hình đa thanh mắc tổ hợp nối tiếp-song song sẽ được khai thác và nghiên cứu trong nội dung tiếp theo.

4.4.3 Tín hiệu điện áp trên cảm biến mắc tổ hợp nối tiếp-song song (S_{2-6})

Kết quả thực nghiệm cho thấy độ lệch điện áp lõi ra ΔV , độ nhạy của cảm biến S_H (mV/Oe) và S_H^* (mV/V/Oe) của cảm biến S_{2-6} có giá trị cao gấp 1,5; 2,6 và 1,72 lần so với cảm biến S_{2-1} tương ứng. Chi tiết kết quả được chỉ ra trên Hình 4.5 và Bảng 4.2.



Hình 4.5. Đường cong tín hiệu độ lệch điện áp đáp ứng theo từ trường ngoài trên các cảm biến nhóm 2 loại S_{2-6} so sánh với S_{2-1} , S_{2-3} (a) và Đường cong độ nhạy S_H đáp ứng theo từ trường ngoài của các cảm biến (b), đo tại 0,1 mA [91].

So sánh với cảm biến GMR được công bố bởi S. Yan năm 2018 [130] (có độ nhạy 0,112 mV/V/Oe) thì cảm biến S_{2-6} có độ nhạy gấp 27 lần. So sánh với kết quả công bố trên cảm biến từ-điện trở xuyên hầm dạng cầu Wheatstone có độ nhạy lớn nhất được quan sát

trên màng đa lớp có độ nhạy 32 mV/V/Oe được công bố bởi Ricardo Ferreira năm 2012 [27] thì cảm biến S_{2-6} trong luận án này có độ nhạy ($S_H = 3,06$ mV/V/Oe) nhỏ hơn cỡ 10 lần nhưng cấu trúc cảm biến và công nghệ chế tạo của cảm biến AMR trong luận án đơn giản hơn rất nhiều.

Bảng 4.2. Giá trị lực kháng từ (H_c), điện trở nội (R), độ lệch điện áp (ΔV), độ nhạy cảm biến dV/dH theo đơn vị (mV/Oe) và độ nhạy cảm biến $dV/V/dH$ theo đơn vị (mV/V/Oe) của cảm biến nhóm 2 đo tại 0,1 mA [91].

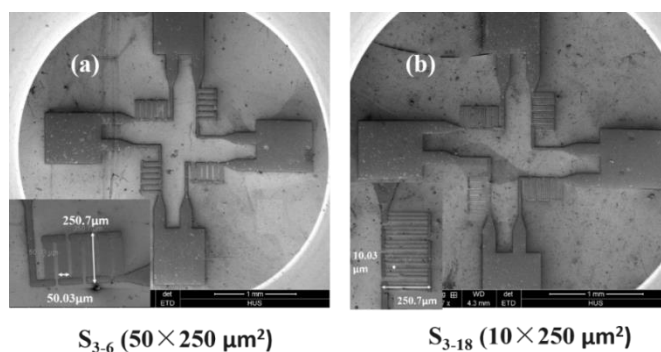
Cảm biến	H_c (Oe)	R (k Ω)	ΔV (mV)	dV/dH (mV/Oe)	S_H^* (mV/V/Oe)
S_{2-1}	3,51	1,20	0,80	0,21	1,75
S_{2-3}	2,14	3,64	1,91	0,68	1,87
S_{2-5}	0,94	6,16	2,85	1,08	1,75
S_{2-6}	1,70	1,80	1,18	0,55	3,06

4.5 Cảm biến kích thước μm (nhóm 3)

Để thu nhỏ hơn nữa kích thước của thanh cảm biến thì với công nghệ chế tạo mặt nạ như trình bày trong cảm biến Nhóm 1 và 2 là không phù hợp nữa. Với cảm biến kích thước nhỏ thì mặt nạ cảm biến để thủy tinh kích thước μm sử dụng công nghệ quang khắc chùm tia điện tử sẽ cho phép chế tạo linh kiện xuống đến kích thước vài μm . Trong nhóm cảm biến này, luận án cũng tập trung chế tạo và nghiên cứu gồm 2 loại cảm biến mắc nối tiếp và cảm biến mắc tổ hợp nối tiếp-song song. Các kết quả tính toán mô phỏng và đo đạc thực nghiệm cũng được tiến hành để giải thích thêm các kết quả thu được.

4.5.1 Cấu trúc cảm biến

Trong cảm biến nhóm 3, loại S_{3-6} gồm 6 thanh điện trở mắc nối tiếp, mỗi thanh có chiều rộng $W = 50 \mu\text{m}$, chiều dài $L = 250 \mu\text{m}$, tỉ số $L/W = 5$. Cảm biến loại S_{3-18} gồm 18 thanh điện trở, có chiều rộng $W = 10 \mu\text{m}$, chiều dài $L = 250 \mu\text{m}$, mắc thành 6 dãy nối tiếp, mỗi dãy gồm 3 thanh điện trở mắc song song, tỉ số $L/W = 25$. Hình dạng cảm biến nhóm 3 được chỉ ra như Hình 4.6.



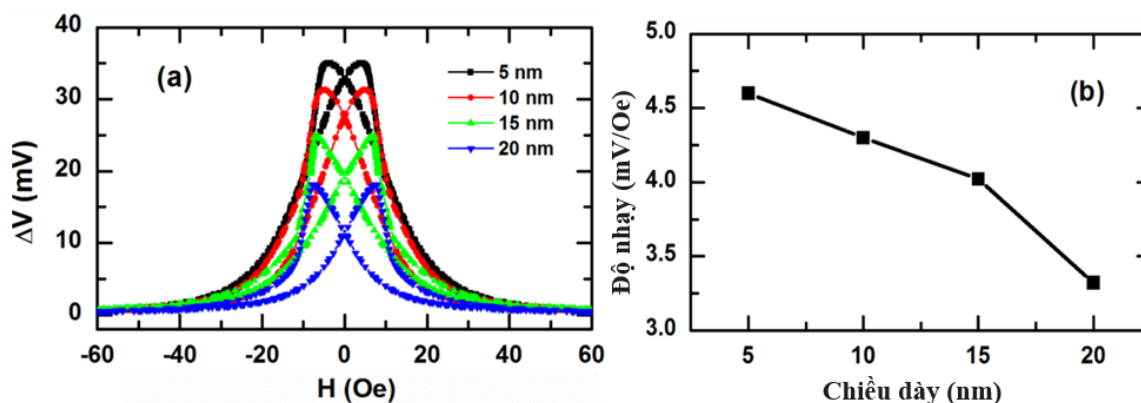
Hình 4.6. Ảnh cảm biến nhóm 3: cảm biến tổ hợp nối tiếp loại S_{3-6} (a), cảm biến tổ hợp nối tiếp-song song loại S_{3-18} (b) được chụp bằng thiết bị Nova NanoSEM 450.

4.5.2 Tính toán và mô phỏng cấu trúc cảm biến

Chúng tôi sử dụng phần mềm Maxwell 2D (Ansys, Canonsburg, PA, USA) để tính toán, mô phỏng sắp xếp các thanh trở, khoảng cách các thanh trở phải được tính toán sao cho tính chất từ, tính chất điện tối ưu nhất. Dựa trên kết quả mô phỏng, để giảm thiểu tác động của trường khử từ và đảm bảo dị hướng từ đơn trục tốt trên các thanh điện trở nhưng vẫn theo tiêu chí thu nhỏ kích thước cảm biến thì khoảng cách giữa các thanh điện trở sẽ được lựa chọn là 20 μm áp dụng cho thanh có kích thước lớn 50 μm ×250 μm và 10 μm áp dụng cho thanh có kích thước nhỏ 10 μm ×250 μm .

4.5.3 Tín hiệu điện áp trên cảm biến tổ hợp nối tiếp (S₃₋₆)

Cảm biến tổ hợp loại S₃₋₆ được nghiên cứu trong nội dung này có cấu hình gồm 6 thanh điện trở mỗi nhánh mắc nối tiếp với nhau, các thanh điện trở là các màng Ta/NiFe/Ta có chiều dày khác nhau thay đổi từ $t_{\text{NiFe}} = 5 \div 20$ nm đã được chế tạo và nghiên cứu. Các phép đo được thực hiện với từ trường ngoài tác dụng trong mặt phẳng và vuông góc với từ trường H_{pinned} , dòng cấp vào cảm biến $I = 5$ mA được thể hiện trên Hình 4.7 và Bảng 4.3.



Hình 4.7. Đáp ứng độ lệch điện áp lồi ra vào theo từ trường ngoài (a) và độ nhạy từ tính dV/dH đo được trong các cảm biến AMR loại S₃₋₆ (50×250 μm^2), tại dòng cấp 5mA.

Bảng 4.3. Các giá trị điện trở, độ lệch điện áp cực đại, độ nhạy cảm biến loại S₃₋₆ với chiều dày màng NiFe khác nhau, phép đo tại dòng cấp 5 mA.

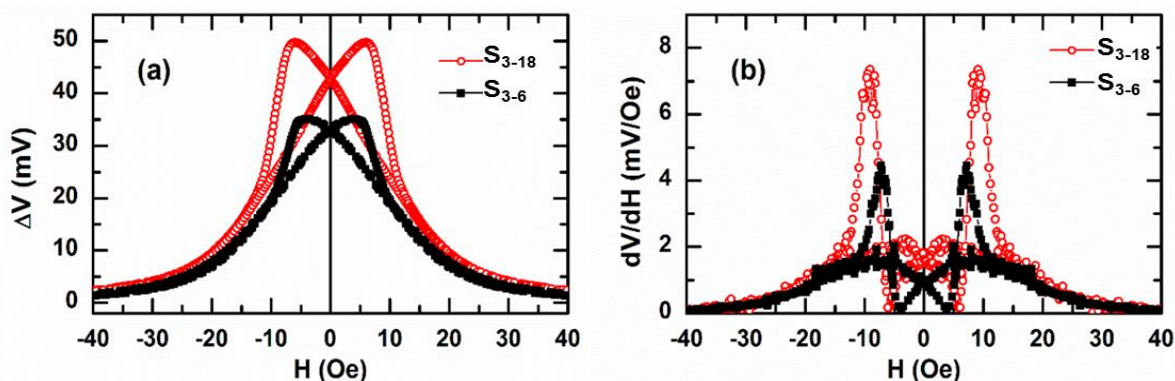
Loại cảm biến Nhóm 3	Cách mắc	Chiều dày NiFe (nm)	Điện trở (k Ω)	Độ lệch điện áp (mV)	Độ nhạy cảm biến (mV/Oe)
S ₃₋₆	Nối tiếp	20	1,20	18,1	3,32
S ₃₋₆	Nối tiếp	15	1,36	25,1	4,02
S ₃₋₆	Nối tiếp	10	1,47	31,3	4,30
S ₃₋₆	Nối tiếp	5	1,60	36,1	4,60

S_{3-18}	Nối tiếp -song song	5	2,6	49,7	7,36
------------	------------------------	---	-----	------	------

Kết quả cho thấy độ lệch điện áp tăng mạnh từ 18,1 đến 36,1 mV khi độ dày giảm từ 20 đến 5 nm và độ nhạy từ trường của cảm biến S_H cho giá trị cao nhất là 4,6 mV/Oe trong mẫu có độ dày $t_{NiFe} = 5$ nm, giá trị này cao gấp 1,4 lần so với mẫu có độ dày 20 nm.

4.5.4 Tín hiệu điện áp trên cảm biến cấu trúc tổ hợp nối tiếp-song song (S_{3-18})

Độ lệch điện áp cực đại và độ nhạy cảm biến S_{3-18} đạt giá trị 49,7 mV và 7,36 mV/Oe, tại dòng cấp 5 mA, tại từ trường cỡ 10 Oe, tương ứng (Hình 4.8).



Hình 4.8. Đáp ứng theo từ trường ngoài của độ lệch điện áp (a) và độ nhạy dV/dH theo từ trường (b) được đo trong mạch cầu AMR loại S_{3-18} so sánh với S_{3-6} .

So với cảm biến S_{3-6} , các giá trị này cao hơn 1,43 và 1,54 lần. So sánh với kết quả công bố của Richard Gambino [44] (có $S_H = 0,4$ mV/Oe) thì kết quả này cao hơn cỡ 20 lần về mặt độ lớn. Công bố gần đây nhất bởi Nan Yang (năm 2016) [126] và bởi Luong Van Su (năm 2018) [64], cảm biến GMR cho độ nhạy 500 $\mu V/Oe$ thì kết quả của cảm biến S_{3-18} lớn hơn cỡ 15 lần. So sánh độ nhạy của cảm biến này với cảm biến GMR thương mại (có $S_H = 3,5$ mV/Oe) được sản xuất bởi công ty cổ phần NVE [135] thì cảm biến S_{3-18} có độ nhạy lớn hơn gấp 2 lần.

Chương 5

THỬ NGHIỆM ỨNG DỤNG CỦA CẢM BIẾN CẦU WHEATSTONE

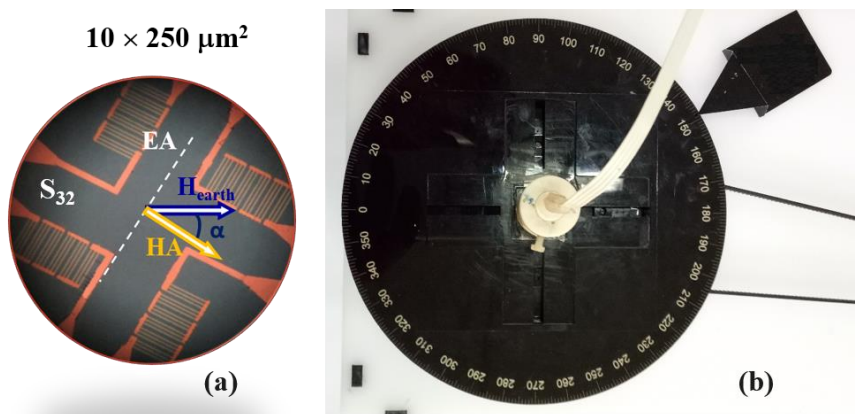
Sử dụng các cấu hình cảm biến tối ưu đã thu được, luận án tiếp tục phát triển nghiên cứu ứng dụng trong một số lĩnh vực cụ thể: (i) Cảm biến mắc tổ hợp nối tiếp-song song S_{3-18} để đo góc thông qua đo định hướng từ trường của trái đất; (ii) Cảm biến mắc tổ hợp nối tiếp-song song S_{2-6} phát hiện hạt từ tính nano Fe_3O_4 - chitosan đường kính 50 nm, nồng độ khác nhau; (iii) Cảm biến đơn thanh S_{2-1} để phát hiện hạt từ Dynabeads® MyOne™

Streptavidin C1, từ đó phát hiện sợi đơn ADN đặc hiệu cho gen 16S rARN của liên cầu khuẩn *S. suis* bằng cách sử dụng thẻ SPA.

5.1 Cảm biến đo hướng từ trường của trái đất

Với mục đích đo hướng từ trường của trái đất, cảm biến phải có độ nhạy cao trong dải từ trường cỡ 0,25 đến 0,65 Oe, tại Hà Nội có giá trị cỡ 0,4 Oe [24,30]. Từ các kết quả nghiên cứu ở trên, chúng tôi nhận thấy cảm biến loại S_{3-18} là cảm biến có kích thước nhỏ nhất, độ nhạy cao nhất ($S_H =$

7,36 mV/Oe) và phù hợp nhất cho ứng dụng nhạy từ trường này. Ngoài ra, cảm biến có vùng tuyến tính đi qua gốc từ trường ($H = 0$) (xem Hình 4.8a) và có độ nhạy $S_H = 1,8$ mV/Oe (xem Hình 4.8b). Có nghĩa là khi không cần cấp từ trường làm việc thì cảm biến vẫn hoạt động trong dải tuyến tính cao của cảm biến. Lợi dụng những ưu điểm này, chúng tôi thử nghiệm cảm biến loại S_{3-18} để đo hướng từ trường của trái đất tại Hà Nội. Thực nghiệm khảo sát đáp ứng điện áp lối ra của cảm biến theo từ trường của trái đất được chỉ ra trong Hình 5.1. Kết quả thu được của cảm biến được độ nhạy góc của cảm biến $S_\alpha = 9$ ($\mu\text{V}/\text{độ}$). Giá trị này lớn hơn giá trị độ nhạy 8,8 $\mu\text{V}/\text{độ}$ của cảm biến S_{3-6} [8]. Độ nhạy góc của cảm biến có thể được tăng cường hơn nữa khi cấp từ trường nuôi cho cảm biến nhờ cuộn Helmholtz, tại từ trường H cỡ 9,1 Oe dọc theo trục cảm biến thì cảm biến hoạt động tại điểm có độ nhạy cao nhất $S_H = 7,36$ mV/Oe. Độ nhạy góc tính được là $S_\alpha = 36,0$ ($\mu\text{V}/\text{độ}$) gấp 4,1 lần so với kết quả đo trên cảm biến nối tiếp S_{3-1} [8]. So sánh với cảm biến đo từ trường trái đất dựa trên hiệu ứng từ-điện sử dụng vật liệu dạng tấm băng từ giáo/áp điện [28, 29,30] (độ nhạy góc 3,86 mV/độ), cảm biến của chúng tôi nhỏ hơn cỡ hai bậc về độ lớn nhưng ưu điểm của cảm biến dựa trên hiệu ứng AMR được nghiên cứu là kích thước nhỏ gọn, không cần từ trường nuôi, dễ dàng thích ứng trên các hệ vi cơ-điện tử.

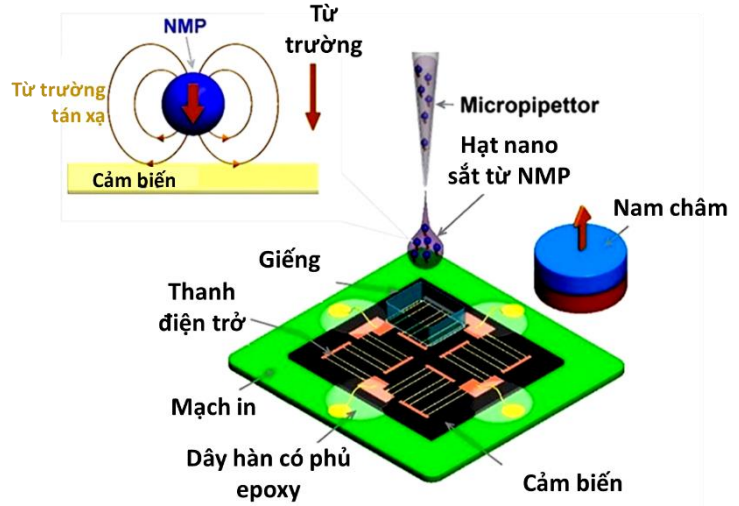


Hình 5.1. Thực nghiệm khảo sát đáp ứng điện áp lối ra của cảm biến theo hướng từ trường của trái đất.

5.2 Cảm biến sinh học

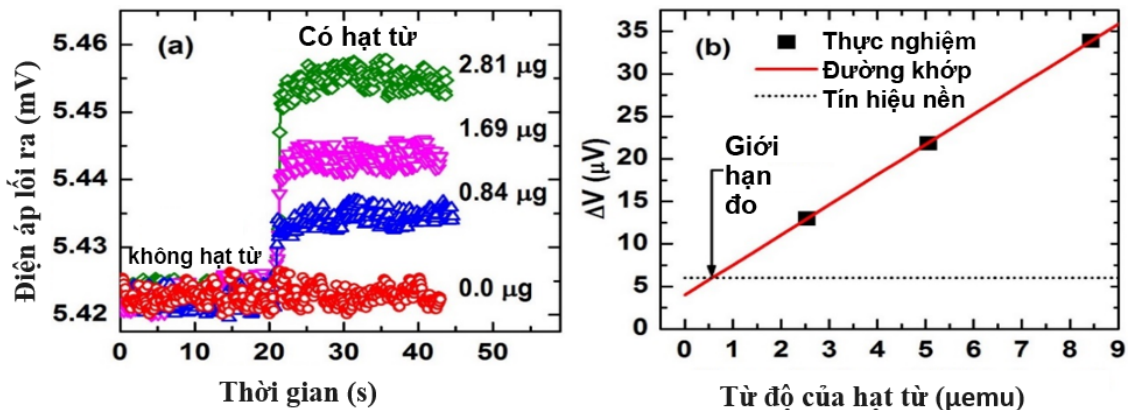
5.2.1 Cảm biến phát hiện hạt từ tính nano

Trong ứng dụng này, chúng tôi lựa chọn cảm biến thích hợp nhất đó là cảm biến S_{2-6} , độ nhạy $3,06 \text{ mV/V/Oe}$. Sơ đồ hệ đo phát hiện hạt từ tính được đưa ra như Hình 5.2. Khi nhỏ hạt từ vào giếng với các nồng độ khác nhau, tín hiệu của cảm biến tăng khi nồng độ hạt MNPs tăng (lượng hạt MNPs tăng) (Hình 5.3a). Kết quả thực nghiệm ta tính được giá trị giới hạn từ trường mà cảm biến phát hiện được cỡ $0,56 \mu\text{emu}$ (Hình 5.3b), giới hạn này thấp hơn



Hình 5.2. Minh họa sơ đồ phát hiện hạt từ tính sử dụng cảm biến S_{2-6} [91].

khoảng vài lần so với báo cáo gần đây cho cảm biến AMR [40, 90] và thấp hơn 33 lần so với giá trị $18,7 \mu\text{emu}$ được báo cáo bởi Volmer và các cộng sự với cảm biến PHE dựa trên permalloy [65]. So với cảm biến Hall dựa trên cấu trúc van-spin sử dụng vật liệu $NiFe$ của Tiến sĩ Bùi Đình Tú công bố [6] khi phát hiện hạt từ Dynabeads[®]M-280 (độ lệch điện áp $2,2 \mu\text{V}$) thì cảm biến của chúng tôi có tín hiệu gấp cỡ 6 lần. Còn so sánh với cảm biến Hall do Louise Ejsing [26] công bố thì giới hạn phát hiện của cảm biến trong luận án này là tương đương.



Hình 5.3. Đáp ứng độ lệch điện áp của cảm biến theo thời gian vào lượng hạt từ khác nhau (a) và đồ thị độ lệch điện áp của cảm biến theo độ lớn của từ độ (b) [91].

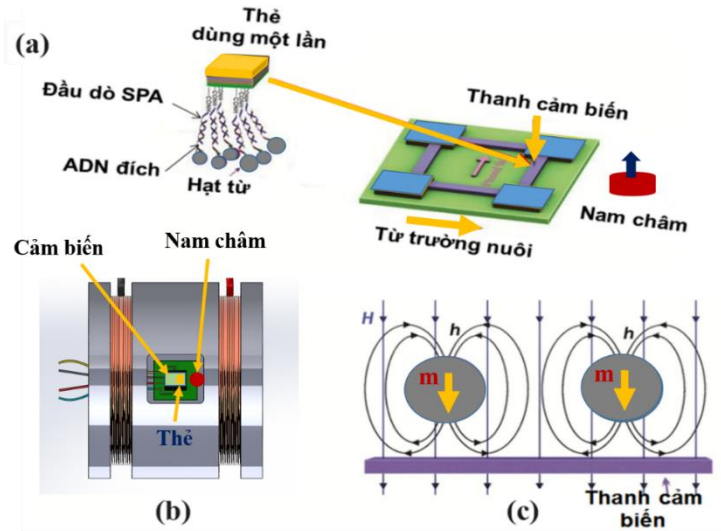
Với cảm biến loại S_{2-6} này, giới hạn từ độ tính trên một đơn vị diện tích có giá trị cỡ $194 \times 10^{-15} \text{ emu}/\mu\text{m}^2$. Kết quả này thấp hơn cỡ một bậc đối với cảm biến GMR được công

bổ bởi J. Devkota [20, 21] và thấp hơn 5 lần so với giá trị $920 \times 10^{-15} \text{ emu}/\mu\text{m}^2$ trong bộ cảm biến sinh học dựa trên hiệu ứng GMR được báo cáo bởi nhóm Wei Wang [122], có thể so sánh với giá trị $72,5 \times 10^{-15} \text{ emu}/\mu\text{m}^2$ trong cảm biến được báo cáo bởi Gungun Lin [62].

5.2.2 Cảm biến phát hiện phân tử sinh học

Trong phép thực nghiệm này, chúng tôi đánh giá cảm biến trong việc phát hiện hạt từ streptavidin lai hóa phân tử sinh học được gắn trên thẻ sử dụng một lần mang đầu dò đặc hiệu cho gen 16S rARN của liên cầu khuẩn *Streptococcus suis*. Cảm biến được lựa chọn phải có độ nhạy cao, cấu trúc đơn giản để thao tác và kích thước cảm biến phù hợp với thẻ SPA. Với thử nghiệm ứng dụng này, trong các cảm biến mà luận án nghiên cứu, cảm biến phù hợp nhất là cảm biến loại đơn thanh S_{2-1} độ nhạy 2,15 mV/Oe (tương đương với độ nhạy 1,75 mV/V/Oe) [40]. Sơ đồ thực nghiệm phát hiện tổ hợp hạt từ-ADN trên thẻ sử dụng một lần bằng linh kiện AMR được thiết kế như Hình 5.4.

Kết quả thử thực nghiệm tính toán được giới hạn phát hiện của linh kiện AMR là 1,2 μg hạt từ streptavidin trên thẻ SPA, tương đương 3,4 μemu . Giới hạn phát hiện sợi đơn ADN của linh kiện khoảng 0,45 pmol . So sánh với kết quả nghiên cứu gần đây trên hạt siêu thuận từ Fe_3O_4 được công bố bởi Volmer năm 2015 với cảm biến dựa trên hiệu ứng Hall phẳng phát hiện được 9,35 μg hạt [65] thì cảm biến biến của luận án phát hiện được lượng hạt nhỏ hơn cỡ 30 lần. So sánh với cảm biến GMR được công bố năm 2016 bởi Nan Yang [126] thì cảm biến trong luận án là tương đương.



Hình 5.4. Cấu hình linh kiện AMR phát hiện hạt từ trên thẻ SPA đã lai với ADN đích và đánh dấu bằng hạt từ [40].

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Luận án đã nghiên cứu bằng cả 2 phương pháp thực nghiệm và mô phỏng một cách có hệ thống từ việc nghiên cứu cấu trúc vật liệu đến tính chất từ, tính chất từ-điện trở phụ thuộc vào kích thước (dài, rộng, tỉ số dài/rộng), chiều dày lớp màng sắt từ của cảm biến. Kết quả cho thấy tính chất từ và tính chất từ-điện trở phụ thuộc mạnh vào tính dị hướng từ (từ

trường ghim 900 Oe tốt nhất), phụ thuộc mạnh vào chiều dày lớp sắt từ ($t_{\text{NiFe}} = 5$ nm tốt nhất), phụ thuộc vào tính dị hướng hình dạng (tỉ số dài/rộng càng lớn càng tốt).

2. Nhờ vào việc tích hợp cấu hình cảm biến nối tiếp-song song đã đưa ra một giải pháp hiệu quả không những làm tăng độ nhạy, làm giảm nhiễu nhiệt của cảm biến mà còn cho phép cảm biến hoạt động hiệu quả với các thông số làm việc đáp ứng tốt theo yêu cầu trong khi đó so với các nhóm cảm biến khác thì với cấu trúc đơn giản là màng từ tính đơn lớp, quy trình công nghệ chế tạo đơn giản đem lại hiệu quả kinh tế cao.

3. Xuất phát từ ý tưởng tổ hợp cấu trúc cảm biến dạng nối tiếp, nối tiếp-song song nhưng sử dụng nhiều công nghệ chế tạo khác nhau từ đơn giản, chi phí thấp đến phức tạp, chi phí cao hơn, luận án đã chế tạo cảm biến kích thước từ milimet đến micromet, tất cả các cảm biến tối ưu của mỗi loại đều có độ nhạy đáp ứng được yêu cầu ứng dụng. Cụ thể:

- Với cảm biến nhóm 1 (cảm biến to, kích thước mm): cảm biến loại tổ hợp nối tiếp 3 thanh điện trở (S_{1-3}) có độ nhạy $S_H = 0,93$ mV/Oe.

- Cảm biến nhóm 2 (cảm biến loại nhỏ, kích thước μm): cảm biến cấu trúc tổ hợp nối tiếp-song song 6 thanh điện trở (S_{2-6}) có độ nhạy 3,06 mV/V/Oe.

- Cảm biến nhóm 3 (cảm biến loại nhỏ nhất, kích thước μm): cảm biến cấu trúc tổ hợp nối tiếp-song song 18 thanh điện trở (S_{3-18}) cho độ nhạy 7,36 mV/Oe.

4. Luận án đã thành công trong việc thử nghiệm cảm biến để đo góc từ trường trái đất và ứng dụng làm cảm biến sinh học. Cụ thể:

- Ứng dụng đo góc từ trường trái đất: dùng cảm biến tổ hợp nối tiếp-song song 18 thanh điện trở (S_{3-18}) cho độ nhạy góc lớn nhất $S_\alpha = 36,0$ ($\mu\text{V}/\text{độ}$).

- Ứng dụng cảm biến sinh học:

+ Cảm biến phát hiện hạt từ tính nano: dùng cảm biến tổ hợp 6 thanh điện trở nối tiếp-song song (S_{2-6}) cho giới hạn phát hiện từ độ là 194×10^{-15} emu/ μm^2 .

+ Cảm biến phát hiện phân tử sinh học: dùng cảm biến đơn thanh (S_{2-1}) đã phát hiện được 4,5 pmol sợi đơn AND đích trong đầu dò đặc hiệu cho gen 16 rARN của liên cầu khuẩn *S. suis*.

5. Việc chế tạo cảm biến trong luận án cho độ nhạy cao dùng để đo từ trường trái đất, cảm biến sinh học... với chi phí thấp, quy trình công nghệ đơn giản, được chủ động hoàn toàn với điều kiện trong nước. Cảm biến AMR của luận án nếu được nghiên cứu tiếp có thể phát triển thành linh kiện loại 2D, 3D và có thể được phát triển theo hướng hoàn thiện sản phẩm ứng dụng tiến tới thương mại hóa sản phẩm.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

- [1]. Bùi Đình Tú, Đỗ Thị Hương Giang, Đồng Quốc Việt, Nguyễn Xuân Toàn, Trần Mậu Danh, Lê Khắc Quỳnh, Nguyễn Hải Bình, Nguyễn Hữu Đức (2013), *Nghiên cứu, chế tạo linh kiện đo từ trường thấp dạng cầu wheatstone dựa trên hiệu ứng từ-điện trở dị hướng (AMR)*, Tuyển tập Báo cáo Hội nghị VLCR và KHVL toàn quốc lần thứ 8, Thái Nguyên, trang 25.
- [2]. L.K. Quỳnh, B.D. Tu, D.Q. Viet, N.T.Thuy, N.X. Toan, T.M. Danh, N.H. Duc, D.T.H. Giang (2015), *Research, manufacturing optimal structure sensor measure the low magnetic field structure wheatstone bridge based on anisotropic magnetoresistance effects*, Proceeding of The 5th international workshop on nanotechnology and application (IWNA), page 416.
- [3]. L.K. Quỳnh, B.D. Tu, D.X. Dang, D.Q. Viet, N.H. Duc, L.T. Hien and D.T. Huong Giang (2015), *Fabrication and Investigation of magnetic sensor based on anisotropic magnetoresistance effects for magnetic beads detection*, Tuyển tập Hội nghị Vật lý Chất rắn và Khoa học Vật liệu toàn quốc lần thứ 9 (SPMS), trang 93.
- [4]. L.K. Quỳnh, B.D. Tu, D.X. Dang, D.Q. Viet, L.T. Hien, D.T. Huong Giang, N.H. Duc (2016), *Detection of magnetic nanoparticles using simple AMR sensors in Wheatstone bridge*, Journal of Science: Advanced Materials and Devices 1 98-102 (ScienceDirect).
- [5]. LT Hien, LK Quỳnh, VT Huyen, BD Tu, NT Hien, DM Phuong, PH Nhung, DTH Giang, NH Duc (2016), *DNA-magnetic bead detection using disposable cards and the anisotropic magnetoresistive sensor*, Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 7, pp.045006.
- [6]. L.K. Quỳnh, B. D. Tu, C.V. Anh, N. H. Duc, A.T. Phung, T.T. Dung, and D. T. Huong Giang (2018), *Design Optimization of an Anisotropic Magnetoresistance Sensor for Detection of Magnetic Nanoparticles*, Journal of Electronic Materials, doi: 10.1007/s11664-018-6822-4.

Danh mục này gồm có 06 công trình.