

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

NGUYỄN VĂN TUẤN

Tóm tắt luận văn:

**MÔ PHỎNG, TÍNH TOÁN LÝ THUYẾT, TỐI ƯU
CẤU HÌNH THEO NGUYÊN TẮC KHÉP KÍN
MẠCH TỪ VÀ DÂY TÍCH HỢP CẢM BIẾN TỪ-
ĐIỆN CẤU TRÚC MICRO-NANO**

Chuyên ngành: Vật liệu và Linh kiện nano

Mã số: Đào tạo thí điểm

TÓM LUẬN VĂN THẠC SĨ KHOA HỌC

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

PGS. TS. Đỗ Thị Hương Giang

Hà Nội - 11/2017

MỞ ĐẦU

Các nghiên cứu trên vật liệu tổ hợp dạng tấm và dạng màng có hiệu ứng từ điện nhờ sự kết hợp hai pha từ giảo và áp điện đã được triển khai mạnh mẽ trong nhóm nghiên cứu tại Khoa Vật lý kỹ thuật và công nghệ Nano, trường ĐH Công nghệ. Dựa các kết quả nghiên cứu này, nhiều sản phẩm ứng dụng đã được phát triển thành công trong đó phải kể đến cảm biến đo từ trường độ nhạy cao, cảm biến đo góc độ phân giải cao, cảm biến đo cường độ dòng điện, la bàn điện tử, cảm biến sinh học,... Nhiều công trình khoa học đã được công bố trên các tạp chí khoa học quốc tế có uy tín. Tuy nhiên, hầu hết các kết quả nghiên cứu trên đều dựa trên các nghiên cứu bán thực nghiệm. Cụ thể, kết hợp việc đo đạc thực nghiệm với tính toán fit lý thuyết dựa trên các số liệu thực nghiệm đo đạc được để giải thích các hiện tượng vật lý trên vật liệu này. Tuy nhiên, việc tính toán này dựa trên kết quả đo, để suy ngược lại mô hình vật lý. Như vậy, phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố ví dụ như kết quả đo, liên quan tới cả chủ quan và khách quan.

Chính vì vậy, việc mô phỏng tính toán thông qua đó tối ưu cấu hình dựa trên cơ sở lý thuyết và các công cụ phần mềm là một nội dung còn chưa được khai thác trong nhóm nghiên cứu. Với mong muốn tìm hiểu sâu và hoàn thiện cũng như nghiên cứu một cách đầy đủ, hệ thống có cơ sở khoa học từ lý thuyết đến thực hiện trên hiệu ứng cũng như vật liệu và ứng dụng trên vật liệu tổ hợp là rất cần thiết.

Đối với tất cả các lĩnh vực nói chung, mô phỏng đóng vai trò chủ đạo trong việc đưa một hệ thống làm việc hiệu quả. Vật lý cũng vậy, vai trò của mô phỏng đóng vai trò then chốt, và ngày nay mô phỏng trong lĩnh vực vật lý tăng chóng mặt cùng với sự phát triển của các công cụ tính toán trên máy tính đã góp phần thành công không nhỏ đưa sản phẩm từ lý thuyết ra thực tế. Mô phỏng giúp đưa ra kết quả một cách nhanh chóng và xác định cách tư duy liệu có đúng hay không, dựa trên những hiểu biết đã biết. Với lĩnh vực vật lý, mô phỏng xuất hiện ở hầu hết mọi hướng nghiên cứu như vật lý chất rắn, vật lý hạt nhân, vật lý hạt, vật lý thiên văn. Nhờ vậy, số lượng các nghiên cứu về lý thuyết và thực nghiệm liên quan tới mô phỏng tăng một cách chóng mặt.

Mô phỏng giúp đồng nhất hay đưa ra một cách nhìn tổng quan về mối quan hệ giữa lý thuyết và thực nghiệm của một hệ vật lý nào đó. Mô phỏng giúp tính toán và phân tích được tính chất vật lý của một hệ đó, hệ này hầu như không thể nghiên cứu một kỹ lưỡng một cách lý thuyết hay thực nghiệm được.

Trong luận văn này, việc mô phỏng sẽ sử dụng phần mềm mô phỏng điện từ Ansoft Maxwell 3D. Đây là một công cụ chuyên biệt cho phép mô phỏng các hệ điện, từ một cách chính xác và hiệu quả. Việc kết hợp với những nghiên cứu về lý thuyết và mô phỏng nhằm đưa ra cấu hình tối ưu cho cảm biến, tính toán một số số thông số làm việc từ đó làm cơ sở cho việc tiến hành chế tạo thử cảm biến đo từ trường. Luận văn sẽ thực hiện tính toán mô phỏng dựa trên các cấu hình từ đơn giản đơn thanh (single bar) để xây dựng mô hình và kiểm chứng lại so với số liệu thực nghiệm nhằm khẳng định tính đúng đắn của mô hình. Dựa trên mô hình lý thuyết này, tiếp tục mô phỏng theo các cấu hình mạch từ khép kín và chuỗi cảm biến (array) với mục tiêu tăng cường hiệu ứng, tăng cường độ nhạy trong từ trường thấp và do đó tăng cường độ phân giải trong ứng dụng cảm biến từ trường xuống dưới 0.1 nT.

Đây cũng chính là một nội dung nghiên cứu trong đề tài độc lập cấp nhà nước đang được triển khai trong nhóm nghiên cứu. Việc tính toán mô phỏng lý thuyết để tối ưu cấu hình rồi dựa trên kết quả đó, triển khai thiết kế chế tạo thực nghiệp là rất cần thiết giúp rút ngắn thời gian và tiết kiệm chi phí.

Do vậy, luận văn này định hướng thực hiện theo nội dung mô phỏng, tính toán lý thuyết, tối ưu cấu hình theo nguyên lý khép kín mạch từ và chuỗi tích hợp cảm biến từ-điện với mục

đích nâng cao tín hiệu cảm biến một cách hiệu quả và được tiếp cận có cơ sở khoa học và thực tiễn nhất.

Luận văn sẽ tổng quát hóa lại hiệu ứng từ giảo, hiệu ứng áp điện và hiệu ứng từ điện để từ đó thấy được sự phát triển cũng như tiềm năng ứng dụng của loại vật liệu tổ hợp Multiferroics Tạo tiền đề cơ sở cho những nghiên cứu mô phỏng và thực nghiệm..

Thông qua việc nghiên cứu các hiệu ứng liên quan cũng như thấy được nhu cầu, luận văn tiến hành mô phỏng tối ưu hóa cấu hình của cảm biến theo hướng làm giảm ảnh hưởng của trường khử từ hay nói cách khác từ thông được tăng cường theo nguyên tắc mạch từ khép kín. Và tiến hành mô phỏng với chuỗi cảm biến từ điện.

Trên cơ sở cảm biến được tối ưu hóa cấu hình nhờ mô phỏng, luận văn tiến hành tính toán lý thuyết sự phụ thuộc của tín hiệu lỗi ra của cảm biến phụ thuộc vào một dây dẫn thẳng dài mang dòng điện đặt gần đó. Luận văn tiến hành chế tạo cảm biến dựa trên cấu hình đã tối ưu kết hợp với chế tạo cảm biến đơn thanh truyền thống để so sánh nhằm thấy được sự cải thiện bằng phương pháp khép kín mạch từ.

Luận văn cũng sẽ tiến hành đo đạc khảo sát sự phụ thuộc của tín hiệu lỗi ra vào vị trí của dây dẫn tạo định hướng cơ bản cho sản phẩm thương mại sau này được sử dụng để phát hiện dây dẫn ngầm và cáp ngầm...

Ngoài mở đầu, kết luận, luận án sẽ được trình bày 03 phần như sau:

Chương 1: TỔNG QUAN

1.1. SƠ LƯỢC VỀ NGUỒN GỐC TỪ TRƯỜNG

Năm 1269, nhà khoa học Pháp tên Pierre de Maricourt thấy rằng hướng của kim nam châm (mạt sắt từ), khi đặt lại gần một nam châm vĩnh cửu hình cầu, tạo thành đường sức từ kín đi qua hai điểm đối xứng nhau qua tâm nam châm, và sau này de Maricourt gọi đó là cực của nam châm. Thí nghiệm chứng tỏ rằng, mỗi nam châm đều có hai cực (cực bắc-North và cực nam-South), lực tác dụng lên cực của một nam châm khác giống như lực tương tác giữa hai hạt điện tích tác dụng lẫn nhau. Cụ thể, hai nam châm đặt gần nhau nếu cùng cực (N-N hoặc S-S) thì đẩy nhau và nếu khác cực (N-S) thì hút nhau.

Năm 1690 William Gilbert (1540-1603) mở rộng thí nghiệm của Maricourt với nhiều loại vật liệu khác nhau. Và Gilbert gợi ý rằng trái đất chính là một nam châm vĩnh cửu khổng lồ. Năm 1750 thí nghiệm cân bằng xoắn chỉ ra rằng lực tác dụng giữa các cực từ của nam châm tỷ lệ nghịch với bình phương khoảng cách giữa các cực từ. Mặc dù lực tác dụng giữa các cực từ tương tự với lực tác dụng giữa hai điện tích điểm, nhưng điện tích có thể bị cô lập (electron và proton). Tuy nhiên, cho tới thời điểm hiện tại, đơn cực từ cô lập vẫn chưa được quan sát bằng thực nghiệm hay nói cách khác cực từ tồn tại theo cặp.

Mối liên hệ giữa từ học và điện học được chỉ ra vào năm 1819 khi nhà khoa học Hans Christian Oersted minh họa bằng thí nghiệm thực tế rằng dòng điện trong dây dẫn làm lệch hướng của kim nam châm đặt gần đó. Trong những năm tiếp theo mối liên hệ giữa điện học và từ học được chỉ ra một cách độc lập bởi Faraday và Johseph Henry (1297-1878). Họ chỉ ra dòng điện có thể được tạo ra trong cuộn dây bằng cách di chuyển nam châm ở gần đó hoặc thay đổi cường độ dòng điện của một cuộn dây đặt gần đó. Các quan sát này chứng tỏ thay đổi từ trường sẽ tạo ra điện trường. Và sau đó, Maxwell đã minh chứng bằng lý thuyết rằng điều ngược lại vẫn đúng đó là thay đổi điện trường sẽ tạo ra từ trường.

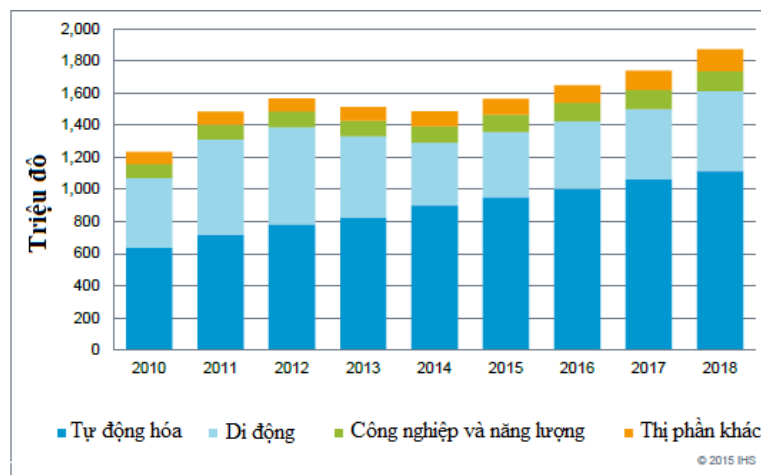
Từ trường trái đất không những bảo vệ giúp cuộc sống con người mà còn giúp xác định hướng trong không gian bằng cách sử dụng la bàn. Khoa học kỹ thuật ngày càng phát triển, do vậy ứng dụng của các thiết bị liên quan tới từ trường ngày càng được mở rộng và trở thành một phần không thể thiếu trong cuộc sống con người. Ví dụ, ứng dụng la bàn chủ yếu là xác định

hướng, nhưng trong thời đại công nghệ số, la bàn này có thể được thu gọn lại và nhờ vào việc đo từ trường trái đất, các thiết bị la bàn tích hợp trên tàu biển, hay thông tin liên lạc vệ tinh ngày càng trở nên quan trọng. Hay, đơn giản để đo vận tốc góc của một thiết bị nào đó như vận tốc góc/dài của bánh xe thì cảm biến từ trường cũng có mặt...[1]

1.2. CÁC LOẠI CẢM BIẾN ĐO TỪ TRƯỜNG

Trên thị trường hiện nay, có rất nhiều loại cảm biến đo từ trường hoạt động theo các hiệu ứng vật lý khác nhau. Trong đó có 3 loại cảm biến chủ yếu đó là cảm biến Hall, cảm biến từ trở, cảm biến từ flux-gate.

Theo thống kê dự báo của Global Industry Analysts, Inc, thị trường cảm biến từ sẽ đạt khoảng \$2.4 tỷ vào năm 2020. Sự tăng lên về giá trị thị trường của cảm biến từ trường là do yêu cầu về chất lượng của cảm biến từ nhằm đáp ứng về mặt ứng dụng trong các thiết bị di động, thiết bị điện tử, các thiết bị công nghiệp cũng như hệ thống trong thông tin vệ tinh và quân sự (Hình 1. 1). Và bằng cách đo không tiếp xúc cảm biến từ ngày càng trở nên quan trọng đối với các hệ điện tử tinh vi, đặc biệt đối với các thiết bị trên máy tính, điện thoại...



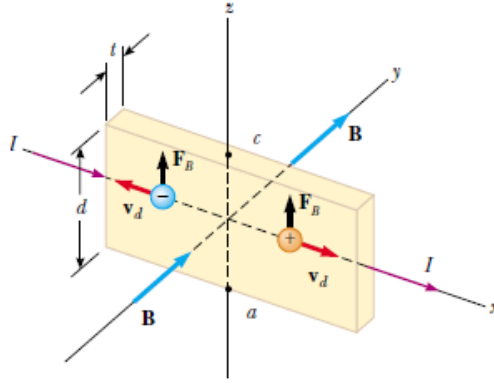
Hình 1. 1: Thị trường cảm biến đo từ trường thống kê theo năm (theo IHS technology Magnetic Sensors Market Tracker).

Cảm biến từ trở thành một phần không thể thiếu trong các thiết bị điện điều khiển tự động ví dụ như hệ thống phanh chống bó cứng (anti-lock braking systems), hệ thống điều khiển giữ thăng bằng (electronic stability control) có trong các thiết kế kỹ thuật. Do vậy, nhu cầu về cảm biến từ ngày một không ngừng tăng lên và nó cũng đòi hỏi chất lượng cảm biến cũng như dải hoạt động từ trường làm việc, cấu hình cảm biến cũng phải được cải thiện tùy thuộc vào từng mục đích sử dụng.

1.2.1. Cảm biến Hall-hoạt động dựa trên hiệu ứng Hall

Cảm biến Hall là loại cảm biến cho tín hiệu điện thế lồi ra theo từ trường ngoài đặt vào. Cảm biến Hall được thường được sử dụng làm công tắc, xác định vị trí, tốc độ [2].

Một vật dẫn phẳng mang dòng điện I dọc theo chiều dương trục Ox như hình vẽ. Một từ trường đồng nhất B được đặt dọc theo chiều dương trục Oy . Nếu các hạt mang điện tích, ví dụ là các electron chuyển động theo chiều âm trục Ox với vận tốc cuốn v_d , các electron này sẽ chịu một lực từ theo hướng vuông góc là $F_B = qv_d \times B$, khi đó các electron sẽ di chuyển lên phía mặt phía trên của vật dẫn để lại các điện tích dương ở phía mặt dưới (Hình 1. 2). Sự cư trú của điện tích trên cạnh tám vật dẫn tạo ra một cường độ điện trường trong lòng vật dẫn và cường độ điện trường này tăng lên cho tới khi lực điện tác dụng lên các điện tích còn lại trong vật dẫn cân bằng với lực từ tác dụng lên. Khi trạng thái cân bằng được thiết lập, các electron không bị lệch hướng nữa. Do vậy, hiệu điện thế hình thành giữa hai cạnh này gọi là hiệu điện thế Hall.



Hình 1. 2: Mô hình quan sát hiệu ứng Hall.

Nếu các hạt tải điện là các điện tích dương thì các hạt tải này sẽ di chuyển theo chiều dương trục Ox , và các hạt tải này cũng chịu một lực từ hướng lên trên (Hình 1. 2). Quá trình tương tự xảy ra giống như đối với electron như ở trên. Tuy nhiên, dấu của thế Hall của các điện tích dương ngược với thế Hall tạo bởi các electron.

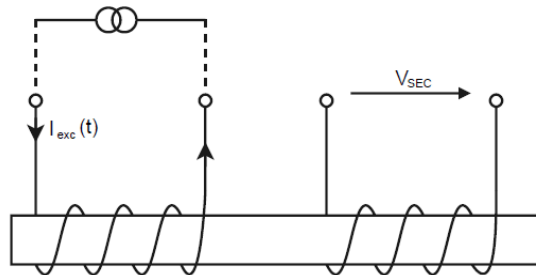
Nếu d là bề rộng, t là chiều dày của vật dẫn thì thế hiệu điện thế Hall được cho bởi biểu thức:

$$\Delta V_H = E_H d = v_d B d = \frac{IB}{nqt} = \frac{R_H IB}{t}$$

$R_H = 1/nq$ gọi là hệ số Hall. Mỗi liên hệ này cho phép tính toán cường độ từ trường khi biết được các thông số liên quan. Nhược điểm lớn nhất của nó là độ chính xác thấp hơn nhiều so với cảm biến Flux-gate hay cảm biến từ trở.

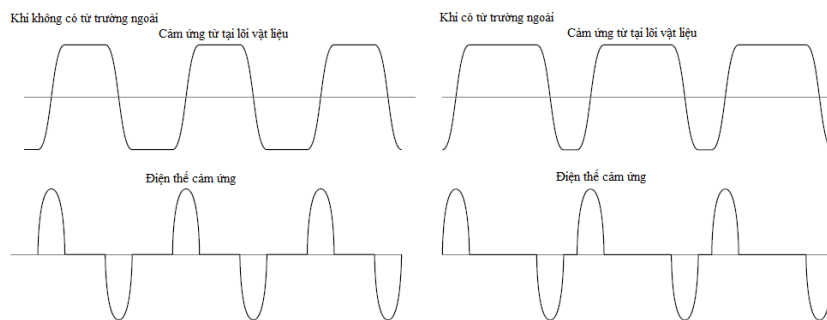
1.2.2. Cảm biến Fluxgate-hoạt động dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ

Một cảm biến Fluxgate cơ bản gồm một lõi sắt từ được kích thích bởi một cuộn dây gọi là cuộn kích thích (driven coil) và một cuộn dây cảm ứng (pick-up coil) (Hình 1. 3) [3]



Hình 1. 3: Cấu hình cảm biến Fluxgate cơ bản

Cấu trúc hình học của lõi cảm biến có thể khác nhau tùy từng vào mục đích sử dụng. Bằng cách cho dòng xoay chiều vào cuộn kích thích, lõi từ tính được từ tới giá trị bão hòa. Khi có từ trường ngoài tác dụng vào, thì từ thông gửi tới cuộn dây cảm ứng sẽ thay đổi trong cuộn dây cảm ứng sẽ xuất hiện tín hiệu điện. Nếu không có từ trường ngoài đặt vào, từ thông trong lõi từ tính sẽ chỉ phụ thuộc vào từ trường tạo ra bởi cuộn kích thích. Lõi từ tính hầu hết được kích thích ở trạng thái bão hòa và hai nửa bão hòa này đóng góp như nhau trong một chu kỳ kích thích. Sự thay đổi từ thông giữa hai trạng thái từ bão hòa sẽ tạo ra một tín hiệu ở cuộn cảm ứng. Nếu một thành phần nào đó của từ trường ngoài được đặt dọc theo trục của lõi từ tính thì thời gian làm cho lõi từ tính bão hòa tăng lên. Điều này dẫn tới sự thay đổi tín hiệu lõi ra. Bằng việc xác định tín hiệu điện này ta có thể suy ngược lại được độ lớn và hướng của từ trường ngoài tác dụng lên cảm biến (Hình 1. 4).



Hình 1. 4: Tín hiệu lỗi ra ở cuộn cảm ứng [4]

Do nhiều lý do khác nhau mà lõi từ tính dạng thanh thường ít được sử dụng, mà thay vào đó bằng lõi từ tính dạng hình xuyên.. Tuy nhiên, cảm biến Fluxgate cũng bộc lộ một số hạn chế như thời gian đáp ứng chậm ($2\div 3s$), cấu hình cảm biến cồng kềnh, kém bền khó có thể tích hợp trên các phương tiện cũng như thiết bị đo hiện đại, nhỏ gọn [5].

1.3. CẢM BIẾN TỪ TRƯỜNG-HOẠT ĐỘNG DỰA TRÊN HIỆU ỨNG TỪ GIẢO-ÁP ĐIỆN

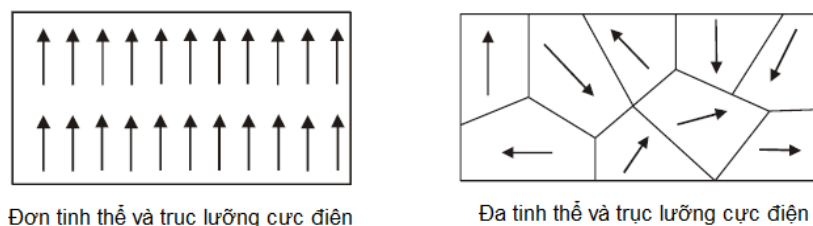
Vật liệu tổ hợp từ giảo-áp điện (ME) thu hút được sự quan tâm của giới khoa học cũng như các nhà sản xuất cảm biến đo từ trường bởi tầm quan trọng của nó đối trong nhiều lĩnh vực khoa học kỹ thuật như cảm biến đo từ, bộ lọc, thiết bị lưu trữ cũng như các thiết bị chuyển đổi năng lượng [6,7]. Vật liệu tổ hợp từ giảo-áp điện gồm vật liệu sắt từ và vật liệu áp điện. Sự thay đổi từ trường cảm ứng trong lòng vật liệu sắt từ tạo nên ứng suất thông qua hiệu ứng từ giảo và khi kết hợp với vật liệu áp điện sẽ tạo ra điện thế lỗi ra thông qua tương tác đàn hồi.

1.3.1. Hiệu ứng từ giảo

Hiệu ứng từ giảo là hiện tượng mà hình dạng của vật liệu sắt từ thay đổi trong suốt quá trình từ hóa. Độ biến dạng $\Delta l/l$ bởi từ giảo thường nhất nhỏ và trong khoảng từ 10^{-5} đến 10^{-6} . Độ biến dạng này có thể được đo bằng phương pháp. Mặc dù độ biến dạng rất nhỏ nhưng hiệu ứng từ giảo là một yếu tố quan trọng trong việc điều khiển cấu trúc domain và quá trình từ hóa.

1.3.2. Hiệu ứng áp điện

Hiệu ứng áp điện cũng như vật liệu áp điện được phát triển rất mạnh mẽ trong nhiều năm qua, được khám phá bởi nhà khoa học Pháp Jacques và Pierre Curie vào năm 1880. Hiệu ứng áp điện là hiệu ứng dưới tác dụng của ứng suất cơ học, vật liệu sẽ bị phân cực điện và độ phân cực này phụ thuộc vào ứng suất tác dụng. Khi đó ở hai mặt tấm vật liệu áp điện sẽ xuất hiện hai lớp điện tích trái dấu. Hiệu ứng áp điện được quan sát thấy ở rất nhiều vật liệu khác nhau ví dụ như thạch anh, tourmaline... Đặc biệt vật liệu có hiệu ứng áp điện là vật liệu có cấu trúc không có tâm đối xứng. Bên cạnh những vật liệu vừa được kể đến vật nhóm vật liệu gốm áp điện là loại vật liệu có ứng dụng cụ thể và rộng rãi nhất, cụ thể là vật liệu PZT (Lead zirconate titanate- $Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$). Vật liệu PZT là vật liệu sắt điện đa tinh thể có cấu trúc tetragonal/rhombahedral gần giống với cấu trúc cubic.



Hình 1. 5: Vật liệu đơn tinh thể và đa tinh thể

Để giải thích rõ hơn điều này ta xét tới từng nguyên tử tạo nên tinh thể. Mỗi phân tử có một độ phân cực nhất định, một bên sẽ có xu hướng mang điện tích âm, một bên có xu hướng mang điện tích dương, lúc này ta phân tử này là một lưỡng cực điện. Trục lưỡng cực điện là một

trục ảo nổi tâm của hai loại điện tích trong phân tử. Đối với vật liệu đơn tinh thể, trục lưỡng điện của tất cả các phân tử nằm cùng một hướng (Hình 1. 5). Lúc này tinh thể được gọi là đối xứng vì khi cắt tinh thể tại bất cứ một điểm nào, trục lưỡng cực điện tổng cộng của hai phân tử luôn nằm cùng chiều với nhau như lúc chưa cắt. Ngược lại, đối với vật liệu đa tinh thể, ở những vùng khác nhau trong vật liệu sẽ có trục lưỡng cực điện khác nhau. Lúc này tinh thể được gọi là bất đối xứng vì không tồn tại một điểm nào thỏa mãn khi cắt tinh thể để trục lưỡng cực điện tổng cộng của hai phân tử giống nhau (Hình 1. 5).

1.3.3. Hiệu ứng từ giao-áp điện

Hiệu ứng từ giao áp điện (ME) được quan sát trong vật liệu chứa hiệu ứng phân cực điện cảm ứng khi chịu tác dụng bởi từ trường ngoài hoặc ngược lại, có hiệu ứng từ hóa cảm ứng khi đặt trong điện trường ngoài. Phương trình miêu tả mối liên hệ này có thể được biểu diễn như sau:

$$P_i = \alpha_{ij} H_j; M_i = \frac{\alpha_{ij}}{\mu_o} E_j \quad (1)$$

Với, P_i là vector phân cực điện; M_i là vector từ độ; E_j và H_j là vector cường độ điện trường và cường độ từ trường; α_{ij} là tensor độ cảm từ ME; μ_o là độ từ thẩm trong chân không. Hiệu ứng từ giao-áp điện được dự đoán bằng lý thuyết lần đầu tiên bởi Landau và Lifshitz vào năm 1980, nhưng trước đó Dzyaloshinskii đã tính toán liên quan tới hiệu ứng này trên vật liệu crom oxit Cr_2O_3 , và được quan sát bằng thực nghiệm bởi Astrov và Folen cùng các cộng sự vào năm 1961.

Khi đặt vật liệu vào trong một từ trường đều hoặc điện trường đều, sự thay đổi mật độ năng lượng tự do Gibbs có thể được biểu diễn bởi phương trình sau:

$$dF = -P_i dE_i - \mu_o M_i dH_i \quad (2)$$

Phương trình trên được đưa ra bởi Landau và Lifshitz (1980). Phương trình này cho ta mối quan hệ của đại lượng nhiệt động học với hiện tượng phân cực điện môi và hiện tượng từ hóa.

$$P_i = -\left(\frac{\partial F}{\partial E_i}\right)_{H,T}; \mu_o M_i = -\left(\frac{\partial F}{\partial H_i}\right)_{E,T} \quad (3)$$

Với T là nhiệt độ tuyệt đối Kelvin. Nếu giả sử rằng độ điện thẩm χ^E và độ từ thẩm χ^M độc lập với E và H , thì ta có được biểu thức năng lượng tự do đối với hệ điện môi tuyến tính và từ trường có trao đổi ME được cho bởi:

$$F = -\frac{1}{2} \chi^E E_i E_j - \frac{1}{2} \chi^M H_i H_j - \alpha_{ij} E_i H_j \quad (4)$$

Số hạng đầu tiên và thứ hai bên phải lần lượt là năng lượng điện trường, năng lượng từ trường tích trữ trong điện trường và từ trường đặt vào; số hạng thứ ba là tương tác giữa điện trường E và từ trường H đặt vào. Từ biểu thức (1.4) ta có biểu diễn cho mối liên hệ giữa phân cực điện cảm ứng và từ hóa cảm ứng khi có mặt của điện trường ngoài E và từ trường ngoài H như sau:

$$P_i = \chi_{ij}^E E_j + \alpha_{ij} H_j; M_i = \chi_{ij}^M H_j + \frac{\alpha_{ij}}{\mu_o} E_j \quad (5)$$

Giá trị điện từ thẩm (ME susceptibility) là một tensor hạng (rank) 2 liên quan tới sự trao đổi giữa E_j và H_j . Giá trị này là duy nhất đối với đối với độ điện thẩm và độ từ thẩm. Điều này rất quan trọng bởi vì giá trị của thành phần của tensor điện từ thẩm sẽ phụ thuộc vào sự đối xứng của hệ từ thay vì cấu trúc tinh thể.

Gần đây, hiệu ứng ME được quan sát trên vật liệu tổ hợp multiferroics (vật liệu sắt từ-sắt điện) đóng góp vai trò quan trọng trong cả nghiên cứu và ứng dụng [9, 10, 11, 12]. Trong loại tổ

hợp vật liệu này, điện trường cảm ứng trong vật liệu tổ hợp được cho bởi $E = \alpha_{ME}H$ (với $\alpha_{ME} = dE/dH$ là hệ số từ-điện). Do đó, hiệu điện thế ở trên vật liệu $V_{ME} = t.E$ với t là chiều rộng tấm vật liệu áp điện [13].

Để nâng cao tín hiệu lỗi ra của cảm biến đã có rất nhiều nghiên cứu được tiến hành bằng cách thay đổi hình dạng [14, 15] hoặc thay đổi điều kiện chế tạo [16] cũng như làm tăng tính chất từ mềm hay nói cách khác là độ thẩm từ ($\chi_m = dM/dH$) của vật liệu sắt từ. Những nghiên cứu đó nhằm mục đích là giảm ảnh hưởng của trường khử từ. Xét tới sự đóng góp của trường khử từ (phụ thuộc vào hệ số trường khử từ N và độ từ hóa M của vật liệu) hệ số từ điện lúc này

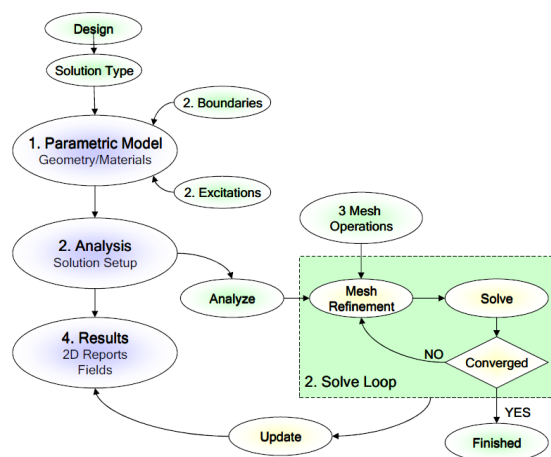
được cho bởi: [15]:
$$\frac{\alpha_{ME}(N)}{\alpha_{ME}(0)} = \frac{1}{1 + N\chi_m}$$
 ($\alpha_{ME}(N)$ và $\alpha_{ME}(0)$ là các hệ số từ-điện khi $N \neq 0$ and

$N = 0$). [17]. Bằng cách thay đổi tỉ số chiều dài/rộng (L/W) [18] đã làm giảm ảnh hưởng của trường khử từ đáng kể. Tuy nhiên, việc tăng tỉ số này không phải là vô hạn mà sẽ tiến tới một giới hạn do hiệu ứng shear-lag [19] khi tích hợp trên thiết bị. Do đó, cấu hình tối ưu của cảm biến cần đồng thời đảm bảo làm giảm ảnh hưởng trường khử từ và hiệu ứng ME lớn. Dựa trên cơ sở các nghiên cứu thực nghiệm của nhóm nghiên cứu tại Phòng thí nghiệm Micro-nano. Khóa luận sẽ tập trung mô phỏng, tính toán lý thuyết theo hướng mạch từ khép kín để tìm ra cấu hình tối ưu của cảm biến và cách ghép cảm biến thành dãy cảm biến với mục đích nâng cao tín hiệu lỗi ra của cảm biến.

1.4. Phần mềm mô phỏng điện-từ Ansoft Maxwell 3D

Ansoft Maxwell 3D phiên bản 16 (AMW) là một phần mềm mô phỏng điện từ được phát triển bởi tập đoàn Ansoft. Phần mềm chuyên được sử dụng cho mô phỏng các thiết bị liên quan tới điện và từ. Trong phần mềm, phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để giải quyết các bài toán. Một trong những ưu điểm của phần mềm là tạo ra các vùng làm việc độc lập nhau và đưa ra các thông số, đặc tính của vật liệu, từ đó người dùng có thể xuất dữ liệu ra ngoài. Chính nhờ ưu điểm này mà phần mềm có thể tạo ra lưới chia mô phỏng phù hợp với độ chính xác cao.

Sơ đồ khối khi giải một bài toán mô phỏng.

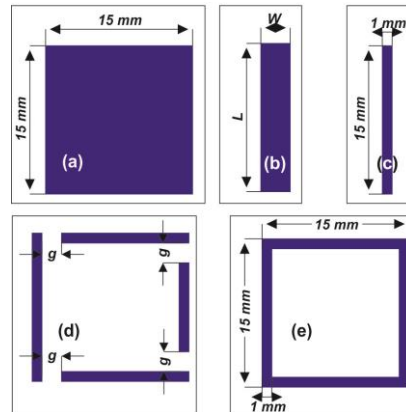


Trong nghiên cứu này, khóa luận tập trung miêu tả vào phần mô phỏng từ trường tĩnh liên quan tới việc tối ưu hóa cấu hình cảm biến. Trong phần chọn loại mô phỏng, khóa luận chọn giải thuật từ tĩnh (Magnetostatic). Ở chế độ mô phỏng này, các phần tử là cố định, và nguồn tạo ra từ trường là nam châm hoặc từ trường ngoài thông qua cách đặt điều kiện biên hoặc sử dụng dòng điện một chiều chạy trong lòng vật dẫn.

Chương 2: PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

2.1. CẢM BIẾN ME VỚI CẤU HÌNH TỐI ƯU

Dựa trên kết quả mô phỏng cũng như điều kiện thực tế. Luận văn tiến hành chế tạo cảm biến với cấu hình dạng đơn thanh (IS- $1 \times 15 \text{ mm}^2$), cấu hình cảm biến dạng hình xuyên (SRS- $15 \times 15 \text{ mm}^2$) và cấu hình dạng chữ U (US- $15 \times 15 \text{ mm}^2$) để so sánh hiệu ứng từ điện nhằm làm rõ ảnh hưởng của trường khử từ cũng như các thông số liên quan. Với các mẫu có kích thước và hình dạng như trên, tính chất từ và từ giảo mềm của băng từ được cải thiện cũng như sự yếu đi của trường khử từ qua đó hệ số từ điện hay nói cách khác là tín hiệu lỗi ra của cảm biến được tăng cường.



Hình 2. 1: Hình mô tả cấu hình vật liệu đơn giản hình vuông (SS) (a), hình chữ nhật (b); dạng đơn thanh (IS) $1 \times 15 \text{ mm}^2$ (c); cấu hình mạch từ khép kín dạng xuyên hình vuông có khe không khí (SRS-AG) (d) và không có khe không khí (SRS) (e)

Hình 2. 1 miêu tả một số cấu hình được tiến hành chạy mô phỏng cũng như được chế tạo. Vật liệu tổ hợp dùng cho cảm biến trong luận văn được chế tạo bằng phương pháp kết dính hai loại vật liệu từ giảo (băng từ) và áp điện với nhau bằng keo dính con voi 502-Thuận Phong ISO 9001:2008 (Tp.HCM-Việt Nam) lớp băng từ (Metglas 2650SC) có chiều dày 18 μm được kết dính trên mặt tấm áp điện (APCC-855 của hãng American Piezoceramics Inc, PA, USA) dày 0,5 mm. Các mẫu sau khi được kết dính sẽ gắn với điện cực và sau đó được cuốn các cuộn dây kích thích với mục đích đo đạc các thông số liên quan.

2.2. ĐO ĐỘ CẢM TỪ CỦA CẢM BIẾN VÀ CÁC THAM SỐ LIÊN QUAN

Để xác định các đại lượng về từ của mẫu vật liệu tổ hợp như: lực kháng từ, từ dư, từ độ bão hòa thiết bị được sử dụng rộng rãi để khảo sát các tính chất trên là hệ từ kế mẫu rung LakeShore 7404 (Lakeshore, USA) [20]

Do cấu hình của cảm biến, đặc biệt là cấu hình SRS và US không đo được bằng hệ từ kế mẫu dung (VSM) nên độ cảm từ của các cấu hình này sẽ được đo bằng phương pháp gián tiếp. Trong phương pháp này, ba cuộn dây solenoids đồng trục được cuốn lồng vào nhau. Cuộn solenoid có đường kính nhỏ nhất có tác dụng cung cấp tín hiệu xoay chiều do máy Lockin 7265 (DSP Lock-in Amplifier) cấp, cuộn solenoid có đường kính lớn hơn được sử dụng để cung cấp dòng một chiều được kết nối với bộ Keithley 2400 (có thể cấp dòng từ -1A đến 1A, độ phân giải cỡ nA), cuộn solenoid có đường kính lớn nhất được nối với Lockin để ghi lại dữ liệu. Chương trình đo được điều khiển thông qua phần mềm Labview tích hợp trên máy tính.

Trước khi khảo sát hiệu ứng ME, tần số cộng hưởng và hiệu điện thế là các tham số mà ở đó cảm biến có cho hiệu ứng ME là lớn nhất, các tham số này được khảo sát kỹ lưỡng [13].

Hiệu ứng từ điện được khảo sát thông qua nguyên lý trong [13]. Khi có từ trường ngoài đặt vào, hiệu ứng từ giảo sẽ gây ra ứng suất tác dụng lên tấm áp điện được kết dính với nó ở trong vật liệu tổ hợp, lúc này tấm áp điện bị phân cực điện theo phương vuông góc với hai mặt tấm.

Kết quả là trên mặt tấm xuất hiện hai lớp điện tích trái dấu nhau, hay nói cách khác là xuất hiện hiệu điện thế giữa hai mặt tấm áp điện V_{ME} . Và hiệu điện thế V_{ME} được đo bằng phương pháp xoay chiều được đề cập trong [13].

2.3. MÔ PHỎNG VÀ TỐI ƯU HÓA CẤU HÌNH

Việc mô phỏng sẽ dựa trên nguyên tắc làm giảm ảnh hưởng của hệ số trường khử từ. Trong bài báo này, mô phỏng tối ưu hóa cấu hình dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng phần mềm Ansoft Maxwell với các tham số đầu vào của cảm bao gồm kích thước (chiều dài, chiều rộng, chiều dày) và tính chất từ thông qua đường cong từ hóa $B(H)$ của pha từ được lấy từ kết quả đo đặc thực nghiệm bằng hệ VSM. Đường cong từ hóa được thực hiện trên băng từ vô định hình metglas- $Fe_{76.8}Ni_{1.2}B_{13.2}Si_{8.8}$ (được chế tạo bằng phương pháp phun băng nguội nhanh) có độ dày 18 μm , hình vuông kích thước $15 \times 15 mm^2$ (Square-shape) (kí hiệu SS) (Hình 2. 1a) được đo bằng hệ đo từ kế mẫu rung (VSM-Lakeshore 7400). Dữ liệu đo (Hình 2. 1a) trên mẫu này sẽ được sử dụng làm tham số đầu vào cho vật liệu dùng mô phỏng cho các cấu hình dạng hình chữ nhật với chiều dài 15 mm và chiều rộng khác nhau (Rectangular-shape) (kí hiệu RS) (Hình 2. 1b). Trong mỗi thí nghiệm mô phỏng, phép chia lưới nằm trong khoảng 100,000 đến 400,000 điểm; sai số của mô phỏng được đặt ở độ chính xác 0.05%; thí nghiệm mô phỏng được thực hiện trong điều kiện không khí có hệ số từ thẩm tương đối là 1.

Cảm biến thực nghiệm được chế tạo bằng vật liệu tổ hợp Metglas và tấm áp điện có bề dày 200 μm (APCC-855, sản phẩm thương mại của công ty American Piezoceramics Inc, PA, USA).

Các phép đo đặc hiệu ứng từ-điện thực nghiệm được thực hiện tại tần số cộng hưởng dao động cơ học của mẫu, các thông số làm việc, độ nhạy cũng như độ phân giải từ trường của cảm biến từ-điện được đo đặc sử dụng trong một cuộn dây solenoid với nguồn cấp được tạo ra bởi thiết bị Lockin. Tín hiệu xoay chiều lối ra V_{ME} được lấy ở tấm PZT của vật liệu tổ hợp cũng được đo sử dụng chức năng đo đặc lọc tần số của thiết bị Lockin này. Nguồn cấp từ trường một chiều trong dải đo từ -30 đến 30 Oe đã được sử dụng với độ chính xác lên tới picoTesla đã được sử dụng. Nguyên lý hoạt động của cảm biến từ-điện được sử dụng trong báo cáo này được trình bày và mô tả chi tiết trong tài liệu tham khảo [5].

Chương 3

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN LÝ THUYẾT

3.1.1. Tính toán cho độ cảm từ

Như đã biết từ trường trong một vật liệu từ và các thành phần liên quan được cho bởi biểu thức (eq.19)

$$B_{eff} = \mu_o (H_{eff} + M) = \mu_o (H_{applied} + M) - \mu_o N_d M$$

$$H_{demagnetization} = -\mu_o N_d M$$
(6)

Với B là cảm ứng từ; μ_o là hệ số từ thẩm trong chân không; H_{eff} là cường độ từ trường hiệu dụng trong vật liệu; M là độ từ hóa; χ là độ cảm từ; $H_{applied}$ và $H_{demagnetization}$ lần lượt là từ trường ngoài đặt vào và trường khử từ.

Trong trường hợp tiến hành thí nghiệm, phép đo gián tiếp được thực hiện để tìm ra độ cảm từ của vật liệu đối với một số cấu hình phức tạp không đo được bằng máy VSM, cảm ứng từ B trong lòng cuộn dây solenoid được tính toán dựa vào định luật Bio-savart Laplace (giả sử rằng điện tích mặt cắt của cuộn dây solenoid không thay đổi khi cho dòng điện chạy vào trong cuộn dây). Theo định luật Faraday ta có sức điện động cảm ứng được cho bởi:

$$\xi = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\vec{S} \cdot d\vec{B}}{dt} = -\frac{\mu_o \vec{S} \cdot d(\vec{H}_{eff} + \vec{M})}{dt} = -\frac{\mu_o \vec{S} \cdot d(\vec{H}_{eff} + \chi \vec{H}_{eff})}{dt} = -(1 + \chi) \mu_o \vec{S} \cdot \frac{d\vec{H}_{eff}}{dt} \quad (7)$$

3.1.2. Tính toán sự phụ thuộc lỗi ra của cảm biến theo vị trí SCCW

Áp dụng định luật Biot-Savart cho trường hợp một đoạn dây dẫn dài $2D$ mang dòng điện I , từ trường gây ra bởi dòng điện ở khoảng cách $r_p = a$ được cho bởi:

$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi a} (\cos \theta_2 + \cos \theta_1)$$

Trong bài toán đối xứng, $\theta_1 = -\theta_2$ như bố trí thí nghiệm, bởi vậy từ trường B sẽ được viết lại như sau:

$$\cos \theta_2 = \cos \theta_1 = \frac{D}{\sqrt{a^2 + D^2}} \Rightarrow B = \frac{\mu_o I}{2\pi a} \frac{D}{\sqrt{a^2 + D^2}} \text{ or } H = \frac{I}{2\pi a} \frac{D}{\sqrt{a^2 + D^2}} \quad (8)$$

Nguyên lý hoạt động của cảm biến được mô tả chi tiết ở trên thì điện thế lỗi ra sẽ phụ thuộc vào hệ số từ-điện (α_i) và thành phần từ trường dọc theo trục Ox được cho bởi:

$$\alpha_i = \frac{dE}{dx H_x} \text{ or } dV_{out} = \alpha_i H_x dx$$

Trường hợp dịch chuyển dọc theo trục Oz , tín hiệu lỗi ra V_{out}^{oz} và độ nhạy cảm biến được cho bởi:

$$V_{out}^{oz} = \sum_{i=1}^N dV_{out} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \alpha_i H_x dx = \frac{\alpha_i I}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\frac{DL}{2}}{a \sqrt{D^2 + a^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}} \right) \quad (V1)$$

$$Sensitivity = \frac{V_{out}^{oz}}{I} = C \tan^{-1} \left(\frac{\frac{DL}{2}}{a \sqrt{D^2 + a^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}} \right) \quad (V2)$$

Trong các biểu thức tính toán trên, hệ số từ điện α_i được giả sử là một hằng số và hệ số này phụ thuộc vào từng cấu hình cảm biến. Công thức trên sẽ được sử dụng cho tính toán lý thuyết và cũng là công thức được sử dụng để fit với số liệu thực nghiệm.

Tính toán tương tự trong trường hợp SCCW dịch chuyển dọc theo trục của cảm biến Ox khi SCCW ở vị trí x_o so với gốc tọa độ gắn ở trung điểm của cảm biến, V_{out}^{ox} được cho bởi:

$$V_{out}^{ox} = \sum_{i=1}^N dV_{out} = \int \alpha_i H_x dx = \left(\frac{\alpha_i I}{2\pi} \right) \left(-\tan^{-1} \left(\frac{D(x_o - x)}{a \sqrt{D^2 + (x_o - x)^2 + a^2}} \right) \right) \Bigg|_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \quad (V3)$$

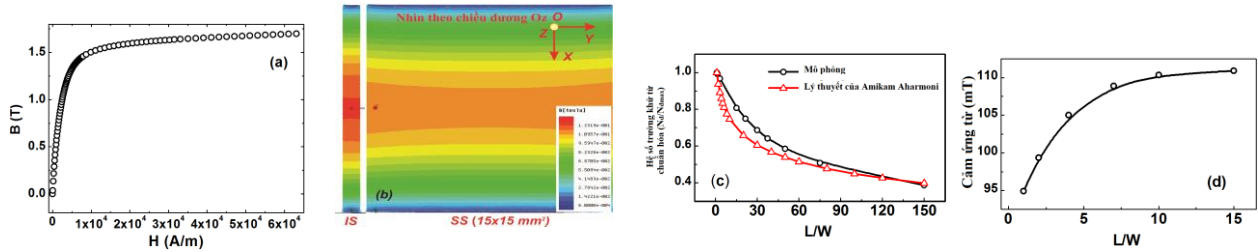
Tuy nhiên, khi khoảng cách giữa SCCW và cảm biến rất gần tức $a \sim 0$, lúc đó từ trường mà dòng điện tạo ra ở trên bề mặt của cảm biến là rất lớn dẫn đến hệ số từ-điện không phải là một hằng số trên cả mẫu cảm biến nữa mà sẽ thay đổi. Do vậy, trong trường hợp này phương pháp số được sử dụng kết hợp với mô phỏng để đưa ra sự phụ thuộc của tín hiệu lỗi ra của cảm biến và được cho bởi:

$$V_{out}^{ox} = \sum_{i=1}^N dV_{out} = \sum_{i=1}^N \alpha_i H_{ix} \Delta x_i \quad (V4)$$

3.2. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

3.2.1. Khảo sát trong từ trường đồng nhất

Tiến hành mô phỏng sử dụng đường cong từ hóa $B(H)$ đo thực nghiệm (Hình 3. 1a) làm thông số đầu vào để thực hiện trên các cấu hình có tỷ số L/W khác nhau (thay đổi từ 1÷15) trong từ trường đồng nhất 40 A/m được đặt dọc theo phương của trục Ox với cùng với điều kiện và các thông số đặt vào đã được đề cập chi tiết trong phần thực nghiệm. Trên Hình 3. 1b là kết quả bức tranh đường sức phân bố trên hai mẫu vật liệu IS ($1 \times 15 \text{ mm}^2$) và SS ($15 \times 15 \text{ mm}^2$) cho thấy cảm ứng từ có xu hướng tăng lên trên mẫu IS tập trung vào vùng không gian giữa và vùng này có xu hướng mở rộng ra trên IS so với trên SS. Điều này được giải thích là do sự yếu đi của trường khử từ (theo phương trình (eq.18)) làm tăng cường từ độ hóa trong lòng vật liệu. Hình 3. 1c chỉ ra sự phụ thuộc của hệ số trường khử từ trên các mẫu với tỷ số L/W khác nhau được tính toán thông qua các đường cong $B(H)$ thu được từ mô phỏng (phương trình (eq.18)) và so sánh với giá trị tính toán lý thuyết được đưa ra bởi Aharoni [21]. Có thể thấy rằng kết quả mô phỏng cho sự phù hợp tốt với kết quả tính toán lý thuyết và sự yếu đi của trường khử từ càng nhiều khi tỷ số L/W càng lớn. Tốc độ suy giảm này đặc biệt quan sát thấy nhanh ở trong vùng tỷ số $L/W < 30$. Cùng với sự suy giảm của trường khử từ là sự tăng cường cảm ứng từ tính trung bình trên toàn thể tích vật liệu khi L/W tăng (Hình 3. 1d). Điều này khẳng định độ tin cậy của mô phỏng trong tính toán vi cấu trúc từ và tính chất từ của vật liệu khi có đóng góp của trường khử từ khi đặt vật liệu trong từ trường ngoài. Sự tăng cường từ tính này sẽ giúp cải thiện hiệu ứng từ-điện khi sử dụng vật liệu từ chế tạo vật liệu tổ hợp cho ứng dụng cảm biến nhạy từ trường.



Hình 3. 1: Đường cong $B(H)$ thực nghiệm của Metglas SS ($15 \times 15 \text{ mm}^2$) (a), bức tranh phân bố cảm ứng từ thu được từ mô phỏng trên mẫu IS ($15 \times 1 \text{ mm}^2$) và SS khi đặt trong từ trường đồng nhất 40 A/m dọc theo trục Ox (b), sự phụ thuộc hệ số trường khử từ theo tỷ số L/W được tính toán bằng mô phỏng và theo lý thuyết của Aharoni (c); sự phụ thuộc cảm ứng từ B trong lòng vật liệu theo tỷ số L/W .

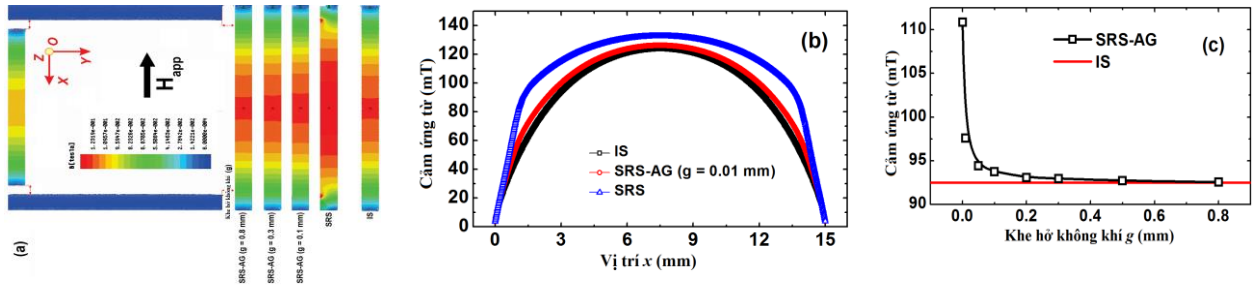
Như kết quả đã được trình bày ở trên, bằng mô phỏng có thể tính toán được ảnh hưởng cũng như đóng góp của trường khử từ vào tính chất từ của vật liệu được thể hiện rõ nét thông qua bức tranh tập trung từ thông bên trong vật liệu khi hình dạng và kích thước của vật liệu thay đổi. Tiếp tục sử dụng công cụ mô phỏng này cho cấu hình xuyên hình chữ nhật với mong muốn việc khép kín mạch từ sẽ làm suy giảm hơn nữa trường khử từ trong vật liệu và do đó, sẽ tăng cường độ cảm cũng như hiệu ứng từ điện trong vùng từ trường thấp cho các ứng dụng đo đạc nhạy từ trường thấp.

Cũng với nguyên lý trên, cấu hình mạch từ khép kín dạng xuyên hình vuông có khe không khí (SRS-AG) độ rộng khe g thay đổi và không có khe không khí (SRS) đã được thực hiện mô phỏng phụ thuộc vào độ rộng của khe hở khi đặt trong từ trường ngoài đồng nhất với cường độ 40A/m cho bức tranh đường sức so bức tranh trên mẫu hình chữ I (Hình 3. 2a). Nhìn vào bức tranh thấy rõ sự khác nhau về phân bố từ thông trên các mẫu hình xuyên SRS-AG và SRS so với mẫu đơn thanh IS. Dữ liệu cảm ứng từ phân bố dọc theo chiều dài thanh xuất ra từ kết quả mô phỏng phụ thuộc vào độ rộng khe không khí thay đổi từ $g = 0$ đến 0.8 mm trên các mẫu hình

xuyên so với mẫu hình chữ I được đưa ra trên Hình 3. 2b. Số liệu xuất ra từ mô phỏng dọc theo chiều dài thanh (Hình 3. 2b) cho thấy khi kết hợp với các thanh sắt từ lân cận, cảm ứng từ trên vật liệu được tăng cường hầu như không đáng kể từ 92.5 mT ở mẫu IS lên 97.6 mT ở mẫu SRS-AG khi khe $g = 0.01$ và đặc biệt tăng đáng kể lên 110.9 mT ở mẫu SRS không có khe không khí ($g = 0$ mm) (Hình 3. 2c). Điều này cho thấy rõ vai trò làm suy yếu đóng góp trường khử từ nhờ việc khép kín mạch từ trong các mẫu hình xuyên. Kết quả mô phỏng cho thấy sự tăng cường tập trung của từ thông hay sự suy yếu của trường khử từ được thấy rõ khi khoảng cách khe g giảm. Điều này có thể được giải thích khi đưa thông số ảnh hưởng của từ trở (magnetic reluctance):

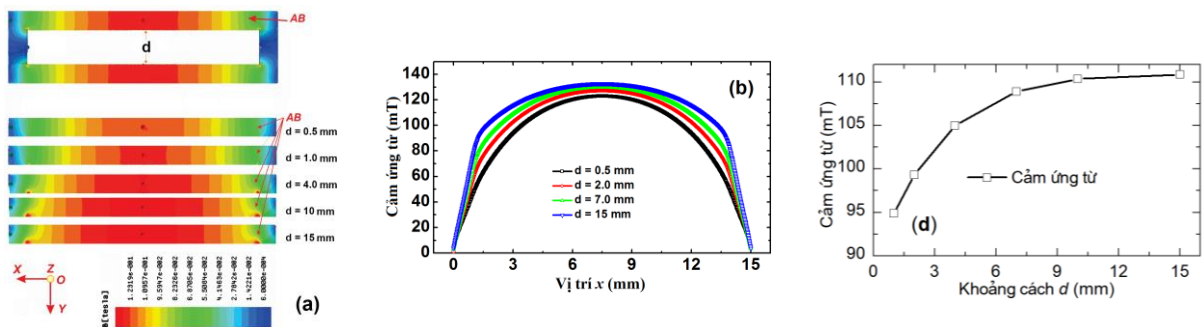
$$\mathcal{R} = \frac{F}{\Phi} = \frac{l}{\mu_o \mu_r A}$$

ở đây \mathcal{R} là từ trở; F là sức từ động cảm ứng; Φ là từ thông; μ_r là độ từ thẩm tương đối của môi trường xét; A tiết diện mặt cắt; l là chiều dài mạch từ.



Hình 3. 2: Bức tranh phân bố cảm ứng từ thu được từ mô phỏng trên xuyên hình vuông có khe không khí SRS-AG với độ rộng khe thay đổi (a), cảm ứng từ phân bố dọc theo chiều dài mẫu ứng với các cấu hình khác nhau (b) và sự phụ thuộc cảm ứng từ trên mẫu SRS-AG theo độ rộng khe g (c)

Theo kết quả này, độ đồng nhất cũng quan sát tăng mạnh trong cấu trúc không có khe từ. Có thể nói, đây là cấu trúc lý tưởng cho mạch từ khép kín và từ trường tán xạ ra ngoài không gian gây nên trường khử từ trong vật liệu là nhỏ nhất. Tiếp tục mô phỏng tối ưu cấu hình cảm biến theo hướng khép kín mạch từ không có khe hở. Trong thí nghiệm mô phỏng này, cảm biến có cấu trúc SRS với khoảng cách giữa thanh cảm biến khác nhau sẽ được thực hiện (Hình 3. 3.a). Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng trên mẫu vật liệu, vùng có cảm ứng từ lớn được mở rộng ra khi tăng khoảng cách giữa hai thanh (Hình 3. 3.b). Điều đó chứng tỏ rằng, trường khử từ giảm đi đáng kể khi khoảng cách giữa các thanh từ d tăng. Đường cong cảm ứng từ tính trung bình trên toàn bộ trên 1 thanh dọc theo từ trường phụ thuộc vào khoảng cách d được vẽ trên Hình 3. 3.c. Kết quả cho thấy sự tăng cường mạnh của từ độ trong vật liệu khi tăng khoảng cách d và có xu hướng tiến đến bão hòa ở khoảng cách $d > 10$ mm.



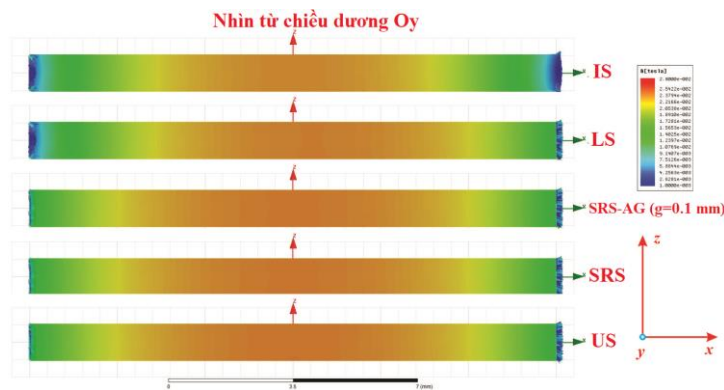
Hình 3. 3: Bức tranh phân bố cảm ứng từ thu được từ mô phỏng khi đặt trong từ trường đồng nhất 40 A/m dọc theo trục Ox trên mẫu hình xuyên không có khe từ (SRS) với khoảng cách giữa các thanh từ d thay đổi (a), đường cong phân bố cảm ứng từ dọc theo cạnh của 1 thanh dọc từ trường (b) và sự phụ thuộc cảm ứng từ tính trung bình trên một thanh phụ thuộc vào khoảng cách d (c)

Theo kết quả mô phỏng này thì cấu hình xuyên tối ưu sẽ được lựa chọn là cấu trúc hình xuyên không khe từ có kích thước hình vuông cạnh 15 mm (khoảng cách $d = 13$ mm giữa các thanh). Với cấu hình lựa chọn tối ưu này, đóng góp của trường khử từ là nhỏ nhất, từ độ trong

vật liệu được tăng cường và phân bố trên mẫu với đồng nhất tốt hơn so với mẫu dạng đơn IS thanh truyền thống.

Trong phần tiếp theo, luận văn tiếp tục mô phỏng so sánh một số cấu hình khác như hình xuyên vòng (OSS), hình chữ U (US), O shape with airgap ($g = 0.1\text{mm}$), L shape và I shape (IS) để tìm ra cấu hình cảm biến có hệ số trường khử từ nhỏ nhất.

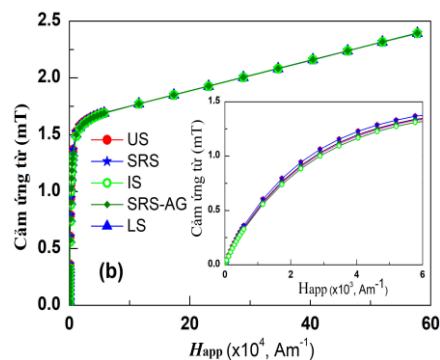
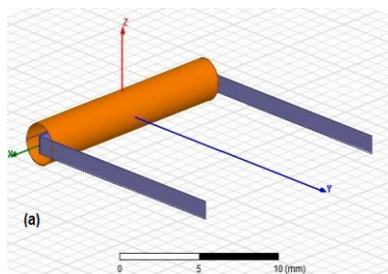
Ta có thể thấy rõ cảm ứng từ trên OSS và US hầu như không thay đổi. Sự cải thiện về cảm ứng từ hay nói cách khác là tập trung từ thông trong trường hợp này đem lại kết quả khá tốt. Khi lấy tích phân trên toàn bộ thể tích cảm biến theo cảm ứng từ, các giá trị của IS, SRS-AG, LSS lần lượt là 0.0193 , 0.0197 and 0.0204 T. và giá trị này cho SRS và US bằng nhau và xấp xỉ bằng 0.0215 T. Điều này chứng minh rằng, từ thông được tăng cường rõ rệt. Vì giá trị cảm ứng từ của SRS và US là tương đương nhau nên hiệu ứng ME trong hai trường hợp này cũng như nhau. Đó đó, trong các thí nghiệm tiếp theo khi nói tới US ta cũng có thể hiểu là SRS.



Hình 3. 4. Bức tranh từ trường cảm ứng được vẽ trên phần vật liệu kết dính với vật liệu áp điện trong vùng từ trường đồng nhất 30A/m .

3.2.2. Khảo sát độ cảm từ và hệ số trường khử từ bằng mô phỏng

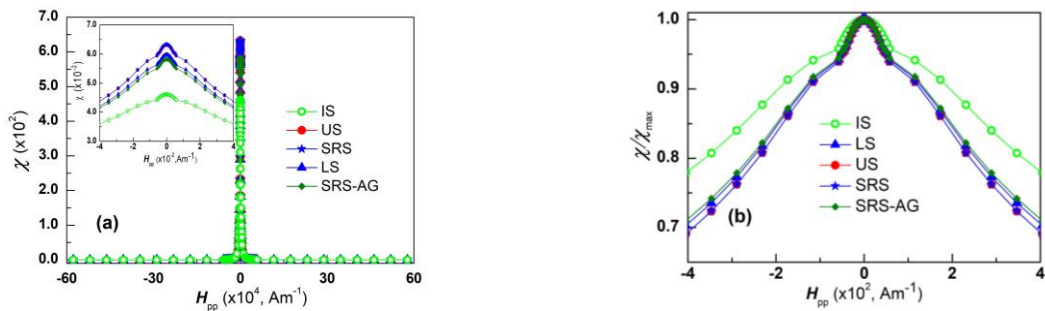
Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng: đường cong $B(H)$ của hai mẫu US và SRS-O shape hoàn toàn trùng nhau và ở trong vùng từ trường thấp cảm ứng từ của mẫu US lớn hơn IS ở cùng một giá trị từ trường kích thích Hình 3. 5 b. Cụ thể, ở từ trường đặt vào 4A/m cảm ứng từ của IS và US lần lượt bằng 0.028 T và 0.032 T. Xu hướng này có thể được giải thích bằng cách xét đến ảnh hưởng của trường khử từ được đề cập tới trong phương trình (eq.19). Từ đây ta cũng có thể tính toán được hệ số trường khử từ bằng công thức (eq.19), giá trị hệ số trường khử từ lần lượt bằng 4.3×10^{-4} , 2.6×10^{-4} , 2.2×10^{-4} , 1.2×10^{-4} cho các cấu hình IS, SRS-AG, LSS và US. Rõ ràng trong trường hợp này, sự suy giảm của hệ số trường khử từ sự đúng đắn của nguyên lý khép kín mạch từ.



Hình 3. 5. a) Cấu hình mô phỏng b) Đường cong $B(H)$ của vật liệu Metglas với các cấu hình khác nhau (dòng điện chạy từ $0 \div 1 \times 10^4$ A).

Từ dữ liệu mô phỏng trong Hình 3. 5b, ta có thể suy ra được độ cảm từ của vật liệu bằng cách lấy đạo hàm của từ độ theo từ trường ngoài đặt vào. Kết quả độ cảm từ của vật liệu theo từ trường đặt vào được miêu tả trong Hình 3. 5a. Rõ ràng rằng, đường cong độ cảm từ theo từ

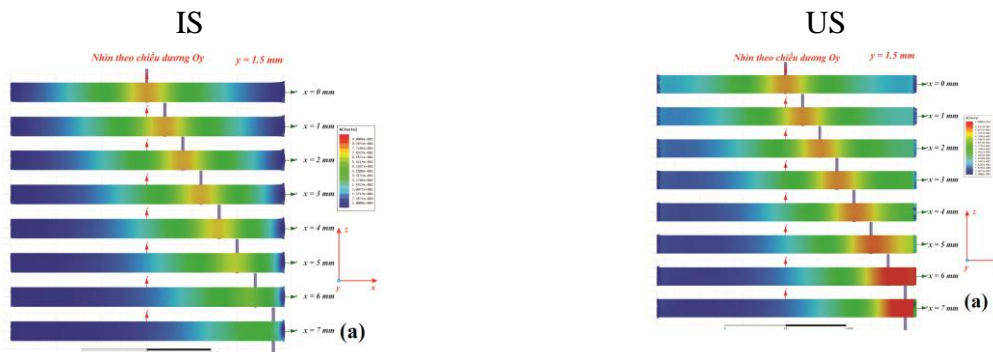
trường ngoài có cùng xu hướng. Hơn thế nữa giá trị của độ cảm từ cực đại khi từ trường ngoài tiến tới 0. Giá trị độ cảm từ của cấu hình IS bằng 4.6×10^{-2} và giá trị này cho SRS-AG, LSS và US gấp 1.26, 1.29 and 1.37 so với cấu hình IS.



Hình 3. 6. a) Đường cong độ cảm từ theo từ trường ngoài đặt vào b) đường cong tỉ đối của độ cảm từ χ/χ_{max} trong vùng từ trường nhỏ.

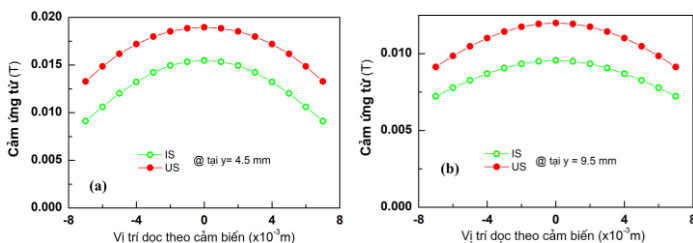
3.2.3. Mô phỏng ứng dụng đo dòng điện

Sợi dây thẳng dài SCCW dài 600 mm, bán kính 80 μm , mang dòng điện 1A dọc theo chiều dương trục Oz , cảm biến IS và US được đặt dọc theo trục Ox .

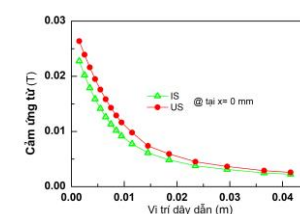


Hình 3. 7. Bức tranh phân bố cảm ứng từ B trên mẫu IS và US cách dây dẫn mang dòng điện ở các khoảng cách lần lượt bằng $y = 1.5\text{mm}$ khi dây dẫn di chuyển dọc theo trục Ox từ $0 \div 7\text{ mm}$

Trong thí nghiệm này, dây dẫn SCCW được di chuyển dọc theo trục Ox ứng với các vị trí khác nhau $y = 1.5\text{mm}$, 4.5 mm and 9.5 mm (Hình 3. 7). Chú ý rằng, vùng có cảm ứng từ lớn trên cấu hình IS bị thu nhỏ lại so với thanh US khi dây dẫn dịch chuyển ra cạnh cảm biến. Đặc biệt khi ở gần cạnh của cảm biến, đóng góp của việc khép kín mạch từ trong cấu hình US càng được thấy rõ thông qua vùng màu đậm được mở rộng dần ở cấu hình US. Tuy nhiên sự cải thiện chỉ xuất hiện trong một vùng nhỏ của cảm biến chứ không phải toàn bộ cảm biến. Khi dây dẫn dịch chuyển dọc theo trục Oy , rõ ràng rằng, từ trường do dây dẫn SCCW gửi tới cảm biến tỷ lệ nghịch với khoảng cách, điều này sẽ dẫn tới tín hiệu của cảm biến cũng sẽ bị suy giảm.



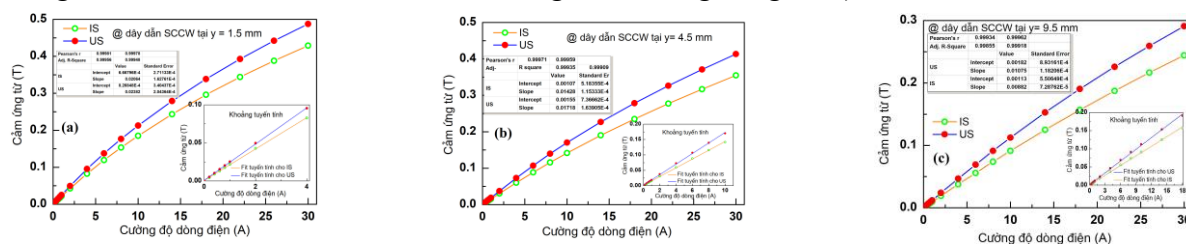
Hình 3. 8. Cảm ứng từ trung bình B_x lấy dọc theo trục Ox tại $y = 4.5\text{ mm}$ và $y = 9.5\text{ mm}$.



Hình 3. 9. Cảm ứng từ trung bình B_x lấy dọc theo trục Ox tại $x = 0\text{ mm}$ ứng với y thay đổi

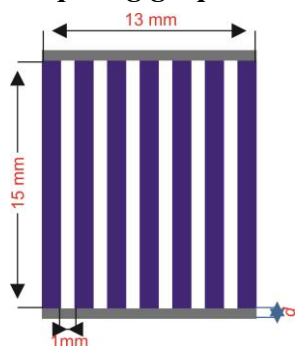
Sự phụ thuộc của cảm ứng từ không những phụ thuộc vào vị trí SCCW dọc theo trục Ox mà còn vào trục Oy (Hình 3. 9). Kết quả tính toán lý thuyết và mô phỏng tạo tiền đề cho những khảo sát thực nghiệm tiếp theo.

Trong ứng dụng đo dòng, dải đo cũng đóng một vai trò quan trọng. Bởi vậy, việc khảo sát dải đo phụ thuộc vào vị trí cần được xét đến. Trong thí nghiệm này, sợi dây SCCW được đặt ở các vị trí khác nhau với dòng điện đặt vào dây thay đổi từ $0 \div 30$ A. Hình 3. 10 so sánh sự phụ thuộc của cảm ứng từ trung bình lấy trên cảm biến khi dòng điện thay đổi từ $0 \div 30$ A tại các vị trí khác nhau 1.5 mm, 4.5 mm and 9.5 mm. Khi từ dòng điện đặt vào sợi dây càng lớn cảm ứng từ trên cấu hình cảm biến tiến tới giá trị bão hòa. Nhưng ở tất cả các phép đo ở các vị trí khác nhau cảm ứng từ trong cấu hình US vẫn luôn lớn hơn IS. Và dải giá trị dòng điện để sao cho cảm ứng từ trên mẫu cảm biến tăng tuyến tính trong cách trường hợp $y = 1.5$ mm, 4.5 mm, 9.5 lần lượt cỡ khoảng 4.0, 10 and 18 A. Sự suy giảm của dải đo khi khoảng cách cần có thể giải thích được bằng cách xét tới định luật Bio-Savart cũng như đường cong $B(H)$ đầu và.

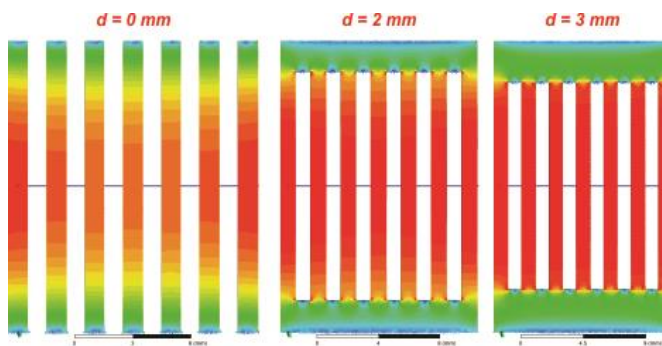


Hình 3. 10. Sự phụ thuộc của cảm ứng từ trung bình B_x lấy dọc theo phương Ox tại các vị trí và dòng điện thay đổi từ $0 \div 30$ A.

3.2.4. Mô phỏng ghép chuỗi cảm biến



Hình 3. 11: Mô hình cảm biến dạng array được lắp ghép với nhau



Hình 3. 12: Bức tranh phân bố cảm ứng từ với các cấu hình khác nhau

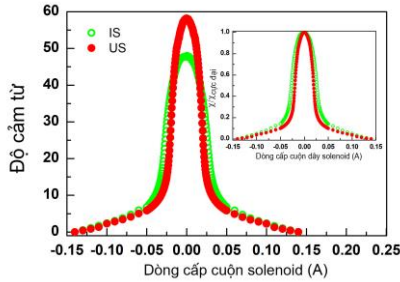
Trong mô phỏng này, cảm biến được đặt trong từ trường đồng nhất 30 A/m, các chiều dài mẫu cảm biến được giữ cố định ở 15 mm, khoảng cách giữa các thanh cảm biến được duy trì ở 1mm. Khoảng cách d của lớp vật liệu có thể thay đổi được. Hình 3. 12 cho thấy sự phân bố của cảm ứng từ trên các thanh đơn của cảm biến array. Với $d=0$ mm ta thấy cảm ứng từ của những thanh ngoài cùng là lớn nhất và cảm ứng từ này sẽ suy giảm cho những thanh ở giữa. Điều này có thể được giải thích do sự tăng cường của từ trường tán xạ do các thanh lân cận gửi đến, kết quả làm cho cảm ứng từ của thanh ở giữa bị suy yếu đi đáng kể. Tuy nhiên, theo cách được khảo sát ở phần trên dựa vào nguyên tắc khép kín mạch từ khi tăng chiều dày d của lớp vật liệu làm mạch từ thì cảm ứng từ trong mẫu cảm biến được cải thiện rõ rệt, từ hình vẽ ta cũng có thể thấy rõ điều này.

3.3. KẾT QUẢ ĐO ĐẶC THỰC NGHIỆM

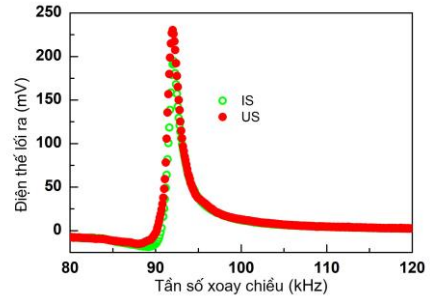
3.3.1. Tính chất từ của băng từ Metglas

Hình 3. 1 a miêu tả đường cong từ hóa $B(H)$ của mẫu vật liệu trong dải từ trường từ $0 \div 6 \times 10^4$ A/m của mẫu hình vuông đặc (Hình 2. 1a) 15×15 mm² để đảm bảo tính đẳng hướng của tham số đầu vào. Kết quả cho thấy cảm ứng từ của mẫu bão hòa ở cỡ 1.7 T, khi từ trường đặt vào cỡ 5.5×10^4 A/m. Và giá trị từ dư hầu như không có. Ở khoảng từ trường đặt vào nhỏ ($< 0.5 \times 10^4$ A/m) thì sự phụ thuộc của cảm ứng từ B theo H là tuyến tính và tăng rất nhanh tới gần giá trị từ

trường bão hòa. Kết quả này chứng minh rằng vật liệu được khảo sát có tính chất từ siêu mềm và sẽ là một lợi thế khi chế tạo cảm biến với mục đích khảo sát từ trường thấp.



Hình 3. 13: Đường cong độ cảm từ phụ thuộc vào dòng điện đặt vào cuộn solenoid (tạo ra từ trường) và đường cong tỷ đối được đo ở tần số 10 kHz của hai mẫu IS và US bằng phương pháp gián tiếp.



Hình 3. 14: Sự phụ thuộc của tín hiệu lối ra cảm biến theo tần số kích thích của nguồn xoay chiều ở 1.5V.

Dựa vào phương trình Eq.20 được chỉ mô trong phần tính toán lý thuyết, sử dụng phương pháp đo gián tiếp đã miêu tả trong phần phương pháp thực nghiệm. Tần số của nguồn kích thích được cấp ở tần số 10 kHz, biên độ nguồn xoay chiều cấp vào lần lượt là 1.2 và 1.5 V tương ứng với US và IS (sẽ được miêu tả chi tiết ở phần sau). Để tránh hiện tượng đoản mạch/cháy cuộn solenoid, nguồn dòng một chiều được cấp bởi nguồn pháp Keithley 2400 trong dải từ - 0.14 A đến 0.14 A. Hình 3. 13 chỉ ra sự phụ thuộc của của đường cong độ cảm từ theo cường độ dòng điện đặt vào cuộn solenoid. Giá trị của độ cảm từ tăng dần khi tiến về không. Tại lân cận từ trường đặt vào bằng 0 (cường độ dòng đặt vào bằng 0) giá trị độ cảm từ đạt giá trị 47.76 và 58.15 ứng với cấu hình IS và US. Tỷ số độ cảm từ của cấu hình US lớn hơn khoảng 1.2 lần cấu hình IS và từ trường để cho cấu hình US đạt giá trị bão hòa nhỏ hơn trong trường hợp IS (thể hiện thông qua dòng một chiều cấp vào cuộn dây).

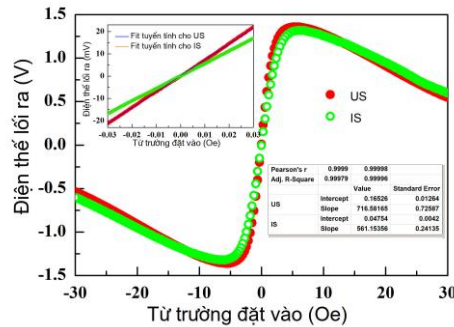
Những phân tích về tính chất từ của cảm biến cung cấp thêm thông tin về sự suy yếu của trường khử từ cũng sự tập trung từ thông được tăng cường tạo cơ sở ứng dụng trong phát hiện dòng trong khảo sát thực tế.

3.3.2. Hiệu ứng ME

Như đã được đề cập ở mục trước, tín hiệu lối ra của cảm biến phụ thuộc vào cả tần số và hiệu điện thế làm việc [13]. Hình 3. 14 chỉ ra sự phụ thuộc của tín hiệu lối ra của cảm biến theo tần số nguồn xoay chiều. Tín hiệu lối ra lớn nhất khi tần số của cả hai cảm biến cỡ 93 kHz, điều này chứng tỏ rằng tần số cộng hưởng này chỉ phụ thuộc vào hình dạng của tấm vật liệu PZT được kết dính cùng vật liệu Metglas [13]. Cũng thấy rõ rằng, tín hiệu lối ra của cảm biến US lớn hơn so với IS ở tần số cộng hưởng.

Hình 3. 15 chỉ ra sự phụ thuộc của của tín hiệu lối ra theo từ trường ngoài đặt vào, từ trường này được điều khiển bởi cuộn Hemholtz được kết nối với thiết bị điều khiển dòng Keithley 2400 như đã được thảo luận trước đó. Rõ ràng, tín hiệu lối ra của cảm biến tăng nhanh tới giá trị cực đại, khoảng gần 1.3 V và sau đó giảm dần tiến tới 0 tại từ trường cao. Trong dải từ trường thấp dưới 5 Oe, tín hiệu V_{ME} phụ thuộc tuyến tính vào từ trường đặt vào, khi từ trường đặt vào lớn hơn 5 Oe thì tín hiệu này giảm. Để giải thích cho việc giảm này, các mô ment từ trong vật liệu hưởng ứng theo từ trường ngoài đặt vào, và khi đã hưởng ứng tối đa, điều đó có nghĩa là các mô ment từ sắp xếp theo phương song song với từ trường ngoài, lúc này hiệu ứng từ giảo là lớn nhất. Và nếu thanh vật liệu từ giảo được kết dính với vật liệu áp điện (như trong trường hợp này) thì ứng suất tác dụng lên vật liệu áp điện là lớn nhất, lúc này tín hiệu lối ra cũng là lớn nhất. Tuy nhiên, nếu tiếp tục tăng từ trường đặt vào, thì độ từ hóa tiến tới giá trị bão hòa và hầu như không đổi, lúc này biến dạng từ giảo cũng tiến tới giá trị bão hòa và ứng suất tác dụng lên tấm áp điện là không đổi, điều này dẫn tới độ phân cực điện là không đổi hay độ biến thiên từ trường

tiến tới 0 dẫn tới hệ số từ điện α_{ME} bị suy giảm một cách nhanh chóng và tiến tới một giá trị không đổi, nhưng nhỏ, bởi vậy V_{ME} sẽ giảm. Trong khoảng tuyến tính, ở cùng một từ trường, tín hiệu V_{ME} của US luôn lớn hơn IS. Cụ thể, độ dốc của đường cong V_{ME} theo từ trường của mẫu hình xuyên chữ nhật khép kín không có khe không khí lớn hơn 1.28 lần so với mẫu dạng đơn thanh IS.

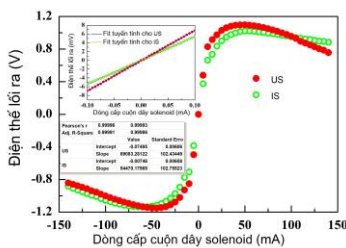


Hình 3. 15. Sự phụ thuộc của tín hiệu lõi ra theo từ trường ngoài tạo bởi cuộn Hemholtz tại tần số cộng hưởng và điện áp làm việc

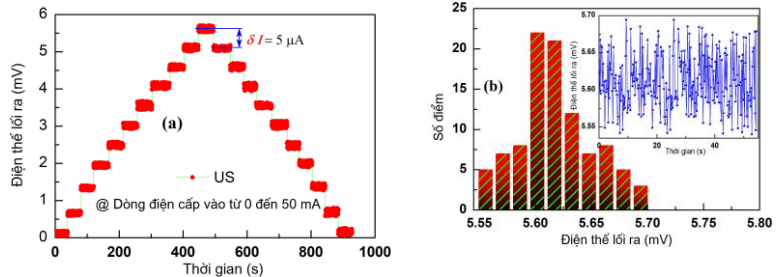
3.3.3. Đo dòng điện bằng phương pháp gián tiếp

Tuy nhiên, đối với thanh US cuộn Hemholtz sẽ từ hóa tất cả mẫu bao gồm phần kết dính với PZT và phần không kết dính (2 nhánh của chữ U). Do đó tín hiệu lõi ra của cảm biến sẽ bị ảnh hưởng của phần không kết dính bị từ hóa này. Để khắc phục hiệu ứng trên. Phép đo gián tiếp được áp dụng, tuy nhiên trong trường hợp này, tín hiệu lõi ra của cảm biến sẽ được lấy trên tấm vật liệu PZT mà không phải là cuộn solenoid có đường kính lớn nhất như trong phép đo độ cảm từ. Cuộn solenoid ở giữa đóng vai trò là nguồn tạo từ trường và được giới hạn trong khoảng từ -0.14 A đến 0.14 A. Hình 3. 16 miêu tả đường cong từ điện của cấu hình cảm trong dải từ trường gây bởi dòng điện cấp cho cuộn solenoid. Đường cong đặc trưng trong hình Hình 3. 16 giống với trong hình Hình 3. 15, mặc dù vậy tín hiệu trong hình Hình 3. 16 nhỏ hơn trong hình Hình 3. 15 về giá trị cực đại, điều này có thể được giải thích như sau: Thứ nhất, để đảm bảo cho cảm biến không bị đoản mạch do hiệu ứng tỏa nhiệt Jule-Lenxơ ($Q = I^2 R t$ với Q là nhiệt lượng tỏa ra, I là cường độ dòng một chiều cấp vào, R là điện trở cuộn solenoid, t là thời gian) thì thời gian đo khi dòng điện đặt vào lớn không được quá lâu và bước thay đổi dòng không được quá nhỏ (vì như vậy lượng nhiệt tỏa ra sẽ lớn làm hỏng cảm biến) điều này dẫn tới tín hiệu cực đại có thể lớn hơn. Thứ hai, khi dòng điện thay đổi dẫn tới từ trường thay đổi và trong trường hợp có 3 cuộn solenoids lồng nhau thì hiện tượng cảm ứng điện từ càng trở nên rõ ràng và làm giảm từ trường trong lòng ống dây như khi chưa có 2 cuộn solenoids như trong Hình 3. 15.

Mặc dù tín hiệu cực đại bị suy giảm, tuy nhiên độ nhạy của hai cảm biến US và IS lần lượt bằng 69083 mV/A and 54470 mV/A. Và tỉ số này xấp xỉ bằng 1.27 Nếu ta đo dòng bằng cách này thì độ nhạy cảm biến rất lớn cỡ 69 V/A đối với cảm biến US.



Hình 3. 16. Sự phụ thuộc của tín hiệu lõi ra theo từ trường ngoài tạo bởi cuộn solenoid tại tần số cộng hưởng và điện áp làm việc.



Hình 3. 17. Tín hiệu lõi ra của US theo dòng cấp trên cuộn solenoid với bước quét 5 μ A trong dải 0÷50 μ A (theo phương pháp gián tiếp) và histogram thả trôi tín hiệu ở 50 μ A.

Hình 3. 17 quét tín hiệu lỗi ra của cảm biến US tại tần số cộng hưởng và điện áp làm việc, thời gian quét trong khoảng 930 s với 21 bước nhảy 5 μ A. Ta thấy giá trị 5 μ A chính là độ phân giải của cảm biến khi thực hiện đo dòng bằng phương pháp gián tiếp này. Hình 3. 17 cũng miêu tả thả trôi tín hiệu ở cường độ dòng điện 50 μ A trong thời gian 55 s period và histogram miêu tả kết quả tín hiệu thả trôi phân bố theo normal distribution. Nếu bỏ qua sai số hệ thống có thể gặp phải khi tiến hành làm thí nghiệm và lấy độ lệch bằng 3 lần độ lệch chuẩn thì độ chính xác hay sai số của phép đo với 3σ được tính bởi biểu thức $AS = \frac{\mp 3\sigma}{\sqrt{n}}$ với

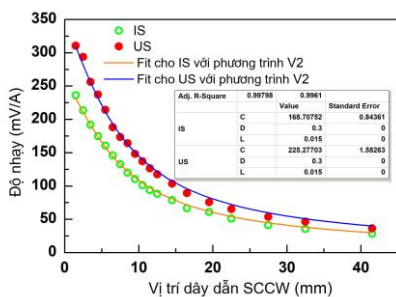
n là số mẫu tín hiệu lỗi ra lấy trong khoảng thời gian xét, trong thí nghiệm này σ vào cỡ 0.0014 và n là 272 mẫu, và độ chính xác 3σ vào cỡ 0.00025 mV. Hay độ nhạy của cảm biến được xác định vào cỡ $69 \pm 25 \times 10^{-8}$ (V/A)

3.3.4. Đo dòng điện thẳng dài

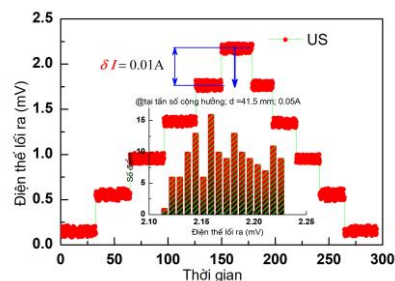
Trong thí nghiệm đo dòng điện thẳng dài này, cảm biến được đặt dọc theo hướng đông tây và được giữ cố định để triệt tiêu đa ảnh hưởng của từ trường trái đất. Tiến hành thí nghiệm với sợi dây dài 600 mm, đường kính 80 μ A, dây dẫn được nối với thiết bị điều khiển dòng Keithley. Dây dẫn thẳng dài được di chuyển bằng cách sử dụng hệ di chuyển 2D quang học.

Hình 3. 18 miêu tả sự phụ thuộc của độ nhạy cảm biến và đường cong fit thực nghiệm sử dụng phương trình đã được trình bày trong phần tính toán lý thuyết.

Ta thấy độ nhạy của cảm biến giảm dần khi dây dẫn đi ra xa so với cảm biến. Độ nhạy của cảm biến tại vị trí $y = 1.5$ mm của cảm biến US và IS lần lượt là 310 mV/A và 236 mV/A và khi dây dẫn ra xa, trong trường hợp cảm biến US ở vị trí $y = 10.5$ mm là 137 mV/A và ở vị trí 41.5 mm độ nhạy giảm xuống còn 36 mV/A. Những giá trị về độ nhạy của cảm biến US luôn lớn hơn so với cảm biến IS ở cùng vị trí.



Hình 3. 18. Sự phụ thuộc của độ nhạy phụ thuộc vào vị trí của của cảm biến dọc theo trục Oy và đường cong fit theo mô hình tính toán.

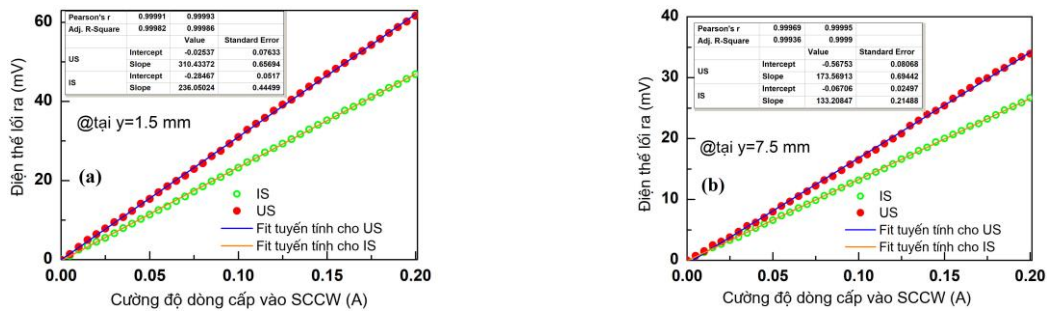


Hình 3. 19. Thả trôi tín hiệu lỗi ra theo thời gian tại các giá trị dòng điện khác nhau ở vị trí $y = 41.5$ mm.

Đường cong fit giữa thực nghiệm và mô hình tính toán rất tốt, cụ thể hệ số R^2 vào cỡ 0.997 cho cảm biến IS và bằng 0.996 cho cảm biến US; hằng số C trong biểu thức tính toán lý thuyết vào cỡ 168 mV/A và 225 mV/A cho cảm biến IS và US. Hơn thế nữa tỉ số giữa hằng số C của cảm biến US so với IS vào cỡ 1.34. Sự tăng cường độ nhạy của cảm biến này được giải thích bằng định luật Ampere. Thêm vào đó là sự yếu đi của trường khử từ do cấu hình cảm biến hay nói cách khác, từ thông được tăng cường trong trường hợp này.

Hình 3. 19 là đồ thị biểu diễn tín hiệu lỗi ra của cảm biến thả trôi theo thời gian khi cho dòng điện thay đổi từ 0 A đến 0.05 A ở khoảng cách 41.5 mm tính từ bề mặt cảm biến và hình histogram thể hiện sự phân bố tín hiệu lỗi ra. Từ hình vẽ ta thấy rõ ở khoảng cách tương đối xa cỡ 40 mm, bước quét 0.01A được cảm biến phát hiện một cách rõ ràng. Hơn thế nữa độ chính xác của cảm biến trong trường hợp này với giá trị 4σ (với $n = 144$ và $I = 0.05$ A tại 41.5 mm) vào

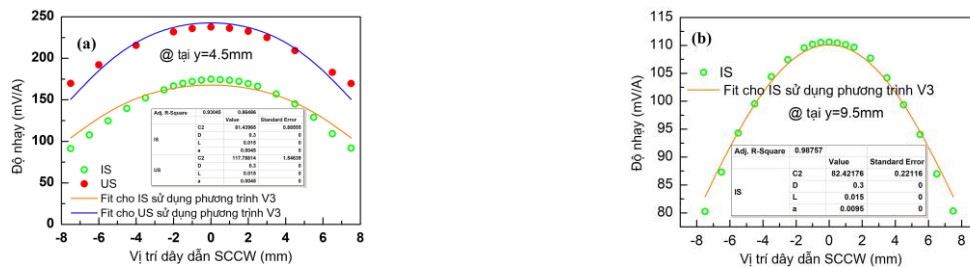
cỡ 0.00032 mV. Thông số này rất quan trọng vì nó sẽ được sử dụng để khảo sát dây dẫn ngầm khi thiết bị được phát triển trong tương lai.



Hình 3. 20. Hiệu điện thế lối ra phụ thuộc vào dòng điện ở một số khoảng cách.

Hình 3. 20 chỉ ra sự phụ thuộc của tín hiệu lối ra cảm biến theo cường độ dòng điện đặt vào cuộn dây tại vị trí $y = 1.5$ mm và $y = 7.5$ mm. Như trong phần tính toán lý thuyết chỉ ra tín hiệu lối ra của cảm biến phụ thuộc tuyến tính vào dòng điện đặt vào sợi dây. Trong trường hợp này độ nhạy của cảm biến tại vị trí 7.5 mm vào cỡ 173 mV/A cho cảm biến US và 133 mV/A cho cảm biến IS. Bởi vì giới hạn của thiết bị Keithley chỉ cấp được dòng điện tối đa là 1.05A, tuy nhiên từ Hình 3. 16 dải đo của cảm biến vào cỡ ± 4 A và ± 8 A tại 1.5 mm và 7.5 mm.

Sự phụ thuộc của độ nhạy của cảm biến khi vị trí dây thay đổi dọc theo trục của cảm biến được chỉ ra trên Hình 3. 21. Hằng số C_2 được fit ứng với trường hợp $y = 4.5$ mm vào cỡ 81.4 mV/A cho IS và 118 mV/A cho US. Sự suy giảm của độ nhạy cảm biến của cảm biến IS và US khoảng 48% và 27 % tại $y = 4.5$. Do vậy ta thấy rằng, cảm biến IS phụ thuộc mạnh vào vị trí của cảm biến hơn là US. Khi ở vị trí càng xa, từ trường gây ra tại cảm biến đồng nhất hơn so với trường hợp ở gần.



Hình 3. 21. Sự phụ thuộc tín hiệu lối ra của cảm biến khi SCCW dịch chuyển dọc theo trục Ox của cảm biến.

KẾT LUẬN

Luận văn là công trình nghiên cứu khoa học đã đưa ra được tham số để tối ưu hóa cho cấu hình cảm biến. Luận văn đã đi sâu vào việc nghiên cứu ảnh hưởng của trường từ lên cảm ứng từ của vật liệu qua đó ảnh hưởng đến tín hiệu lối ra của cảm biến.

Bằng mô hình dựa trên cấu trúc cảm biến dạng đơn thanh IS truyền thống, luận văn đã tiến hành mô phỏng cách cấu trúc khác như chữ L (LS), chữ U (US), dạng xuyên hình vuông có khe hở không khí (SRS-AG) và không có khe hở không khí (SRS). Từ kết quả mô phỏng, ta thấy rằng cảm ứng từ trong mẫu vật liệu được cải thiện đáng kể, cụ thể, đối với cảm biến IS cảm ứng từ trong mẫu vật liệu đạt giá trị khoảng 92.5 mT và tăng lên tới 110.9 mT ở mẫu SRS không có khe hở không khí trong từ trường đồng nhất 40 A/m. Qua đó luận văn rút ra được cấu hình tối ưu cho cảm biến là cấu hình SRS, và đặc biệt hơn, cảm ứng từ trên cấu hình SRS và cấu hình US là tương đương nhau đạt khoảng 0.0215 T ở từ trường đồng nhất 30 A/m. Khi từ trường đặt vào là 0 A/m thì độ cảm từ của IS đạt khoảng 4.6×10^2 với cấu trúc đơn thanh IS và tăng lên 1.37 lần ở cấu trúc US (hay SRS).

Một trong những mục đích của khóa luận là nhằm tạo tiền đề cho việc phát triển thiết bị phát hiện cáp ngầm/dây dẫn ngầm. Khóa luận cũng đã tiến hành mô phỏng sự phụ thuộc của cảm

ứng từ trên mẫu vật liệu theo vị trí của dây dẫn mang dòng điện cũng như cường độ dòng điện. Kết quả mô phỏng cho thấy cảm ứng từ trên mẫu IS và US giảm dần khi dây dẫn dịch chuyển từ tâm cảm biến ($x=0$ mm) ra vị trí biên của cảm biến ($x=7$ mm) hoặc dây dẫn dịch chuyển ra xa cảm biến (từ $y=1.5$ mm đến $y=41.5$ mm). Hơn nữa kết quả mô phỏng cũng cho thấy cảm ứng từ trên mẫu IS và US tăng dần khi cường độ dòng trong dây dẫn tăng lên.

Với mục đích nhằm nâng cao tín hiệu lỗi ra của cảm biến, khóa luận cũng đã nghiên cứu sự phụ thuộc của cảm ứng từ trên mẫu vật liệu trên cấu trúc IS có bề dày thay đổi. Kết quả chỉ ra rằng cảm ứng từ tăng lên từ 20 mT đến 26 mT khi bề dày giảm dần từ 22 μ m về 150 nm. Và khi tổ hợp thành chuỗi cảm biến thì tín hiệu được tăng cường lên đáng kể khi có thanh tập trung từ thông với kích thước d thay đổi từ 0 đến 3 mm.

Dựa vào kết quả mô phỏng tối ưu, khóa luận chế tạo hai cảm biến cấu hình đơn thanh IS truyền thống và cấu hình US để so sánh nhằm kiểm chứng lại mô phỏng. Từ kết quả đo thực nghiệm khóa luận đã đưa ra tần số và điện thế của cảm biến lần lượt là 93 kHz và khoảng 1.3V, đồng thời cũng chỉ ra rằng độ cảm từ trên mẫu US gấp 1.2 lần so với mẫu IS, hơn thế nữa độ phân giải của cảm biến với độ chính xác 3σ vào cỡ 0.00025 mV. Đồng thời khóa luận cũng làm rõ được sự phụ thuộc tín hiệu lỗi ra của cảm biến theo vị trí của dây dẫn khi vị trí dây dẫn thay đổi. Sử dụng các phương trình V1÷V4 trong phần tính toán lý thuyết làm hàm để fit các số liệu thực nghiệm. Kết quả cho thấy hàm sử dụng để fit khá chính xác với sai số fit khoảng 1.6 % cho US và cỡ 0.8 % cho IS khi dây dẫn thay đổi theo trục Oy .

Kết quả đo sự phụ thuộc của tín hiệu lỗi ra cảm biến theo dòng điện khi vị trí dây dẫn được giữ cố định cho thấy độ phân giải đo dòng trong trường hợp cấu hình US cỡ 0.01 A ở vị trí dây dẫn $y = 41.5$ mm. Độ nhạy của cảm biến của đối với cấu hình IS và US tại vị trí $y = 1.5$ mm lần lượt là 236 mV/A và 310 mV/A và dải đo của cảm biến được dự đoán vào cỡ ± 4 A, và ± 8 A khi khoảng cách dây dẫn là 1.5 mm và 7.5 mm.

Như vậy, khóa luận đã đưa ra được cấu hình cảm biến tối ưu dựa trên nguyên tắc mạch từ khép kín và mô phỏng, tính toán sự phụ thuộc của cảm ứng từ cũng như tín hiệu lỗi ra của cảm biến phụ thuộc vào vị trí của dây dẫn, kết quả này đã được kiểm chứng bằng đo đạc thực nghiệm.

CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ VÀ SẴP CÔNG BỐ

1. D. T. H.Giang, D. X. Dang, N. X. Toan, N. V. Tuan, A. T. Phung, and N. H. Duc; *Distance magnetic nanoparticle detection using a magnetoelectric sensor for clinical interventions; Review of scientific instruments* <http://dx.doi.org/10.1063/1.4973729>, 88 (2017), 015004.
2. D.T.H. Giang, N.D. Phuong, P.A. Tuan, N.B. Bien, N.V. Tuan and N.H. Duc; *High accuracy electronic compass for detecting azimuth direction based on a novel magnetoelectric effect*; The 8th International Workshop on Advanced Materials Science and Nanotechnology - IWAMSN 2016; at <http://www.iwamsn.ac.vn/>; Poster; code: **NMD-P70**.
3. D.T.H. Giang, N.X. Toan, P.A. Tuan, N.V. Tuan and N.H. Duc; *Aspects of nondestructive detections using a magnetoelectric sensor*; The 8th International Workshop on Advanced Materials Science and Nanotechnology - IWAMSN 2016; at <http://www.iwamsn.ac.vn/>; Invited Oral presentation; code: **NLE-I15**
4. N.V. Tuan, D.T.H. Giang, L.K.Quynh, N.H.Duc; *Non-invasive current sensor based on ME coupling effect*; International symposium on frontiers in materials science 28-30 September 2016 oral presentation; **SE-O2.7** at <http://phys.hnue.edu.vn/fms2016/program.html>
5. N.V. Tuan, L.K. Quynh, P.A. Tuan, N.H. Duc, D.T.H. Giang; *Mô phỏng tối ưu cấu hình cho cảm biến từ trường hoạt động dựa trên hiệu ứng từ-điện*; Hội nghị vật lý chất rắn và khoa học vật liệu toàn quốc lần thứ 10 (SPMS 2017); ISBN. 978-604-938-722-7, p116.

6. D. T. H. Giang, N.V. Tuan, L.K. Quynh, N. X. Toan, P.A. Tuan, N.B. Bien N.H. Duc, D.T.H. Giang; *Thiết bị đo huyết áp liên tục không xâm lấn ứng dụng trong phẫu thuật dựa trên cảm biến từ-điện độ nhạy cao*; Hội nghị vật lý chất rắn và khoa học vật liệu toàn quốc lần thứ 10 (SPMS 2017); ISBN. 978-604-938-722-7, p111.

7. N.V. Tuan, L.K. Quynh, N.H. Duc. D.T.H. Giang; *Tăng cường độ nhạy của cảm biến đo từ trường 2D dựa trên hiệu ứng từ-điện theo nguyên tắc mạch từ khép kín*; Hội nghị vật lý chất rắn và khoa học vật liệu toàn quốc lần thứ 9 (SPMS 2015); ISBN. 978-604-938-722-7, p.140

8. Submitted 01 bài trên tạp chí “Composite structures Journal-Elsevier”

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Raymond A. Serway, John W. Jewett, Physics for scientists and engineers. ISBN 0534408427
- [2]. Ramsden, Edward (2006). Hall-effect sensors: theory and applications (2, illustrated ed.). Elsevier. ISBN 0-7506-7934-4
- [3]. Magnetic Sensors and magnetometers (P. Ripka et al) ISBN: 1580530575
- [4]. Designing a Miniaturized Fluxgate Magnetometer Åke Forslund, April 2006
- [5]. Michael, J. Caruso, *Applications of meagnetoresistive sensors in navigation systems*, Honey Well InC
- [6]. C. W. Nan, M. I. Bichurin, S. X. Dong, D. Viehland, and G. Srinivasan, Journal of Applied Physics **103** (3) (2008)
- [7]. Junyi Zhai, Zengping Xing, Shuxiang Dong, Jiefang Li, and Dwight Viehland, J. Am. Ceram. Soc. **91**(2), 351 (2008)
- [8]. L. Neel, J. Phys. Rev. 96, 302 (1954)
- [9]. Y. Liu, F.C. Lin, Q. Zhang, H.Q. Zhong, Design and construction of a Rogowskicoil for measuring wide pulsed current, IEEE Sens. J. 11 (1) 123–130 (2011)
- [10]. A. Cataliotti, D. Di Cara, A.E. Emanuel, S. Nuccio, Improvement of Hall effect current transducer metrological performances in the presence of harmonic distortion, IEEE Trans. Instrum. Meas. 59 (5) 1091–1097(2010)
- [11]. P. Mlejnek, M. Vopálenský, P. Ripka, AMR current measurement device, Sens. Actuators A 141 (2) 649–653(2008)
- [12]. S. Ziegler, R.C. Woodward, H.H.-C. Iu, L.J. Borle, Current sensing techniques: a review, IEEE Sens. J. 4 (9) 354–376 (2009)
- [13]. D.T. Huong Giang, N.H. Duc, Magnetolectric sensor for microtesla magnetic fields based on $(\text{Fe}_{80}\text{Co}_{20})_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}/\text{PZT}$ laminates, Sens. Actuator A 149, 229, (2009)
- [14]. J. Blackburn, M. Vopsaroiu, and M. G. Cain, Adv. Appl. Ceram. 109, 169 (2010)
- [15]. D. T. Huong Giang, P. A. Duc, N. T. Ngoc, N. T. Hien, and N. H. Duc, Journal of Magnetism 17(4), 0-00, (2012).
- [16]. M. Li, D. Berry, J. Das, D. Gray, J. Li, and D. Viehland, J. Am. Ceram. Soc. 94, 3738 (2011)
- [17]. J. A. Osborn, Phys. Rev. 67, 351 (1945)
- [18]. D. T. Huong Giang, P. A. Duc, N. T. Ngoc, and N. H. Duc, Sensor & Actuator A 179, 78 (2012)
- [19]. Y. Fetisov, A. Bush, K. Kamentsev, A. Ostashchenko, and G. Srinivasan, IEEE Sens. J. 6, 935 (2006)
- [20]. [Http://www.wangli.info/vsm.html](http://www.wangli.info/vsm.html)
- [21]. Amikam Aharoni, Journal of Applied Physics 83, 3432 (1998)
- [22]. Soshin Chikazumi, Physics of ferromagnetism. ISBN 0-19-851776-9 (2005)