

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

Vũ Nguyên Thức

**NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH ĐIỀU KHIỂN TỪ TÍNH
BẰNG ỨNG SUẤT TRONG CÁC HỆ VẬT LIỆU
MULTIFERROICS CẤU TRÚC MICRO - NANO DẠNG LỚP**

Chuyên ngành: Vật liệu và Linh kiện nano

Mã số: 944012801.QTD

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

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

Người hướng dẫn khoa học: 1. PGS.TS. Đỗ Thị Hương Giang

2. GS.TS. Nguyễn Hữu Đức

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 Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

vào hồi giờ ngày tháng năm 2022

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

CHƯƠNG 1

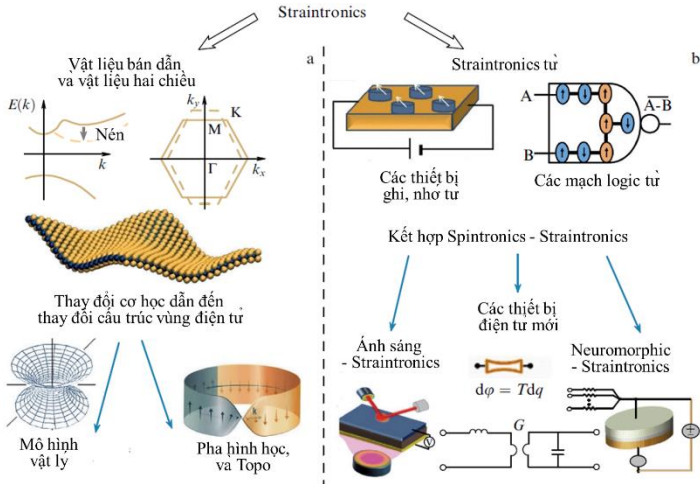
TỔNG QUAN

Trong thời đại cách mạng công nghiệp 4.0 - kỷ nguyên của thế giới vạn vật, sự phát triển ngày càng nhanh chóng của Công nghệ Thông tin đi cùng với những yêu cầu gần đây về dữ liệu lớn và công nghệ Blockchain, đòi hỏi cao hơn về hiệu năng làm việc của các hệ thống máy tính trong việc xử lý và lưu trữ thông tin. Theo một ước tính gần đây, vào năm 2030 có khoảng một nửa lượng năng lượng sản xuất được sẽ được sử dụng cho việc tính toán, cỡ 10 PWh (10×10^{15} Wh), tính theo tốc độ tăng trưởng hiện tại trong lĩnh vực lưu trữ và xử lý thông tin và không có sự cải tiến đáng kể nào ở các thiết bị điện tử. Do đó, đây là động lực chính của các nhà nghiên cứu, nhà phát triển và kỹ sư trong việc thúc đẩy, khơi gợi sự sáng tạo để tìm hiểu và phát triển các công nghệ mới nhằm tiết kiệm năng lượng trong việc xử lý tính toán và straintronics được định hướng trở thành một trong số các công nghệ mới đó. Nội dung tổng quan một số phần trong Chương 1 đã được đề cập rất nhiều trong các sách về tử học. Chương 1 trình bày một số khái niệm, định nghĩa, tính chất, hiệu ứng vật lý có thể xảy ra trong hệ vật liệu được sử dụng.

1.1. Tổng quan điện tử học ứng suất (straintronics)

Một cách tổng quát, straintronics là một lĩnh vực nghiên cứu mới của vật lý chất rắn, liên quan tới các hiệu ứng vật lý bao gồm biến dạng cơ học được phát triển trên các cấu trúc micro - nano, cấu trúc đa lớp dưới tác dụng của trường ngoài, và dẫn đến sự thay đổi liên quan tới cấu trúc vùng điện tử/năng lượng, tính chất điện, tính chất từ, cũng như các tính chất vật lý khác. Do vậy, bằng cách ứng dụng hiệu ứng straintronics sẽ tạo ra các

hiệu ứng, thiết bị mới ứng dụng trực tiếp trong lĩnh vực khoa học công nghệ và vật liệu, như được tóm tắt trong Hình 1.1.



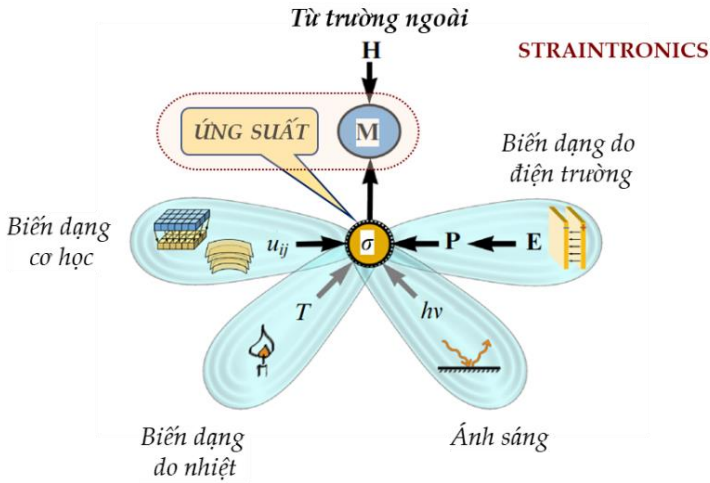
Hình 1.1. Hai nhánh nghiên cứu của straintronics. (a) straintronics trên các vật liệu điện do sự thay đổi cấu trúc vùng điện tử/năng lượng, thay đổi cấu trúc vùng Brillouin trong vật liệu graphene. (b) straintronics trên các vật liệu và linh kiện từ tính từ nhờ sự kết hợp đồng thời của điện tử học spin (spintronics) và điện tử học ứng suất (straintronics).

1.2. Hiệu ứng điều khiển từ tính bằng ứng suất

1.2.1. Giới thiệu hiệu ứng

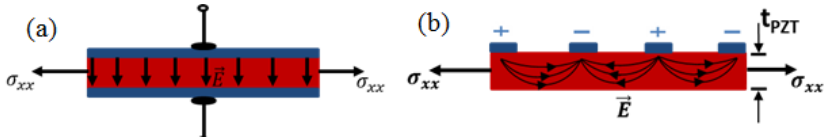
Mối liên hệ giữa ứng suất cơ học và tính chất từ ngày càng được nghiên cứu chuyên sâu và mở rộng hơn trong các hệ vật liệu đa lớp và vật liệu từ - điện. Đầu tiên, thay đổi trong cấu trúc tinh thể dưới tác dụng của biến dạng cơ học có thể coi như là một tính chất vật lý mới. Thứ hai, bản thân biến dạng có thể coi là một tính chất trung gian thể hiện sự tương tác giữa các

pha từ và pha điện. Do đó, trong khuôn khổ Luận án này, Luận án sẽ đi sâu vào các đặc trưng, tính chất vật lý mới của vật liệu đa lớp từ - điện.



Hình 1.5. Quá trình đảo từ trong hiệu ứng straintronics với sự kết hợp giữa đảo từ bằng từ trường và bằng ứng suất được tạo ra bằng nhiều cách khác nhau: tác động vật lý điều khiển quá trình đảo từ trong vật liệu: Biến dạng cơ học, biến dạng do nhiệt, biến dạng do điện trường, ...

1.2.2. Hiệu ứng áp điện



Hình 1.12. Hai một đặc trưng của vật liệu áp điện (quan sát theo phương mặt cắt ngang) phụ thuộc vào hướng tương đối của điện trường E và ứng suất σ_{xx} : (a) một d_{31} và (b) một d_{33} .

1.2.3. Hiệu ứng từ giảo

1.2.4. Hiệu ứng từ giảo và năng lượng từ đàn hồi

1.2.5. Đô men và quá trình từ hóa

1.2.6. Năng lượng dị hướng từ

1.2.7. Hiệu ứng từ - điện ngược và thông số đặc trưng

1.3. Các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm về hiệu ứng straintronics

1.3.1. Quan sát thực nghiệm điều khiển từ tính bằng ứng suất cơ học

1.3.2. Điều khiển từ tính bằng ứng suất tạo ra bởi điện trường

1.3.3. Một số vật liệu từ - điện và hiệu ứng từ - điện ngược

1.3.4. Phương pháp chế tạo vật liệu từ - điện

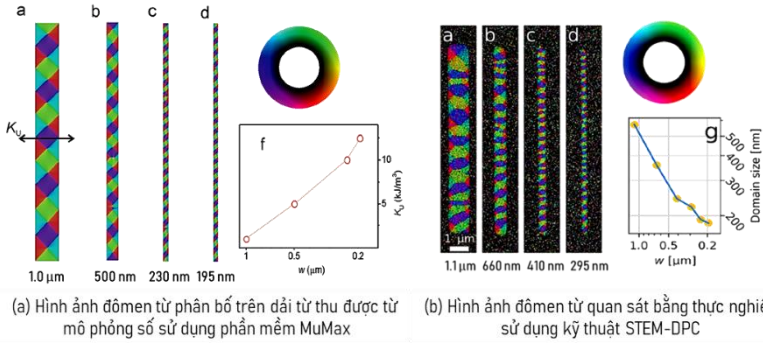
Dựa vào ý tưởng trên, luận án này sẽ tiến hành chế tạo vật liệu bằng phương pháp phun xạ, kết hợp với ăn mòn laser nhằm tạo các lớp màng vật liệu có độ dày, thành phần hóa học, cũng như vi cấu trúc mong muốn, để từ đó điều khiển được tính chất từ của vật liệu.

1.4. Ý tưởng tăng cường đáp ứng từ với ứng suất trong Luận án

1.4.1. Tăng cường mật độ đô men và vách đô men

Khi có ứng suất tác dụng, sự góp mặt của năng lượng từ đàn hồi sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến cấu trúc đô men và quá trình từ hóa, trong đó tác động chủ yếu đến quá trình dịch chuyển vách đô men với sự gia tăng hay thu nhỏ thể tích của các đô men khác nhau tùy thuộc vào loại ứng suất kéo hoặc nén đặt vào. Các nghiên cứu dựa trên hiệu ứng straintronics này cho đến nay vẫn chủ yếu tập trung theo các cách tiếp cận truyền thống là tối ưu thành phần, cấu hình, cấu trúc tinh thể. công nghệ chế tạo, điều kiện xử lý vật liệu... Cũng với mục đích tăng cường đáp ứng từ tính với ứng suất, Luận án này sẽ đưa ra một cách tiếp cận mới đơn giản nhưng hiệu quả hơn bằng cách điều khiển vi cấu trúc từ và do đó thay đổi được kích thước đô men cũng như mật độ đô men và vách đô men bằng cách tạo ra pha từ có cấu

trúc micro nhân tạo dạng xoắn khác nhau sử dụng các công nghệ tiểu hình hóa (cấu trúc xoắn micro).



Hình 1.34. Cấu trúc domain từ thu được bằng mô phỏng số (a) và bằng quan sát thực nghiệm sử dụng kỹ thuật STEM-DPC (b) trên các dải từ $Fe_{60}Al_{40}$ có chiều dài như nhau $L = 10 \mu\text{m}$ độ rộng khác nhau từ 30 nm đến 4 μm .

1.4.2. Tăng cường tính chất từ mềm của băng từ mềm vô định hình

Gần đây có nhiều nghiên cứu được quan tâm về vật liệu từ có vi cấu trúc phức tạp dựa trên các vật liệu từ mềm dạng màng mỏng hay dạng băng sử dụng các công nghệ chế tạo hiện đại khác nhau. Nhiều kết quả lý thú đã được quan sát trên các nhánh trong và tại các nút giao nhau. Kết quả này đã được giải thích liên quan đến dị hướng hình dạng với tương quan giữa tỷ lệ chiều dài, chiều rộng và chiều dày của các nhánh. Bên cạnh đó, có thể thấy do đặc trưng của cấu trúc xoắn tổ ong có các nhánh điều hướng sẽ khắc phục tính đơn trục so với những cấu trúc đơn giản trước đây. Trong các nghiên cứu của Luận án này, phương pháp trên được kỳ vọng là phương pháp tiềm năng cho việc điều khiển chủ động từ tính của các vật liệu sử dụng các cấu trúc phức tạp nhân tạo chế tạo bằng các công nghệ tiểu hình hóa, nhờ vậy có thể

tăng cường đáp ứng từ độ theo các tác nhân bên ngoài, cụ thể là bởi ứng suất.

1.5. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu của Luận án

1.5.1. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu nghiên cứu trong Luận án này là: (i) nghiên cứu và tối ưu công nghệ tiêu hình hóa chế tạo các cấu trúc từ dạng băng và màng mỏng kích thước micro - nano; (ii) tăng cường tính chất từ mềm và tối ưu cấu trúc đô men từ trên các vật liệu từ dạng băng và màng mỏng nền Fe, Ni cấu trúc xốp micro - nano nhân tạo sử dụng công nghệ tiêu hình hóa; (iii) nghiên cứu, chế tạo và tăng cường khả năng điều khiển từ tính bằng ứng suất trên các hệ vật liệu multiferroics dạng lớp cấu trúc xốp micro - nano theo định hướng nghiên cứu và ứng dụng straintronics.

1.5.2. Nội dung nghiên cứu

- Nghiên cứu, chế tạo và khảo sát các tính chất của vật liệu từ mềm dạng băng vô định hình nền Fe được tiêu hình hóa xuống các cấu trúc micro với các ô cơ sở và kích thước ô cơ sở, mật độ ô cơ sở khác nhau, sử dụng công nghệ khắc laser kết hợp ăn mòn hóa ướt;
- Nghiên cứu, chế tạo và khảo sát các tính chất của vật liệu từ dạng màng mỏng Ni cấu trúc micro bằng phương pháp phún xạ kết hợp công nghệ khắc laser;
- Nghiên cứu và tối ưu công nghệ kỹ thuật tiêu hình hóa các màng từ mềm xuống kích thước micromét sử dụng công nghệ khắc laser xung ngắn không cần phòng sạch;
- Khảo sát đánh giá cấu trúc, chất lượng, tính chất từ của các vật liệu cấu trúc micro - nano dạng băng và màng mỏng nghiên cứu chế tạo được;

- Nghiên cứu, chế tạo và khảo sát tính chất từ, tính chất áp điện và điều khiển từ tính bằng ứng suất của hệ vật multiferroics dạng lớp cấu trúc micro - nano;
- Nghiên cứu, mô phỏng, tính toán và phân tích các vi cấu trúc từ (đô men, vách đô men) làm cơ sở để giải thích các hiện tượng và các quy luật quan sát được sử dụng công cụ mô phỏng số pha trường (Phase - Field).

CHƯƠNG 2

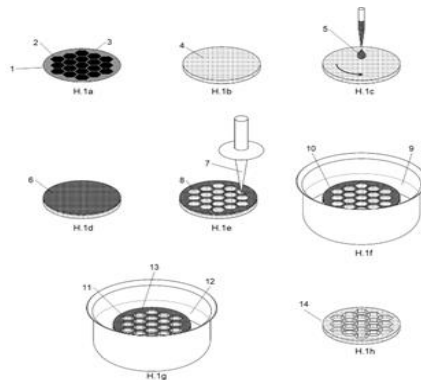
CÁC PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG

2.1. Chế tạo mẫu vật liệu từ cấu trúc micro dạng băng

2.1.1. Chế tạo băng vô định hình bằng công nghệ nguội nhanh

2.1.2. Chế tạo cấu trúc xấp micro dạng băng bằng kỹ thuật ăn mòn hóa ướt và khắc laser

Trong luận án này chúng tôi sử dụng công nghệ khắc laser kết hợp ăn mòn hóa ướt để làm các cấu trúc xấp micro từ tính. Kết quả đã thu được



Hình 2.3. Hình minh họa quy trình kỹ thuật tạo hình cấu trúc micro không cần phòng sạch sử dụng kết hợp kỹ thuật ăn mòn hóa ướt và khắc laser.

các cấu trúc xếp với độ rộng cạnh nhỏ nhất là 60 μm với các tính chất rất tốt.

2.1.3. Chế tạo mẫu vật liệu từ cấu trúc micro dạng màng mỏng nano bằng phương pháp phun xạ ca tốc và khắc laser

Các màng mỏng từ như Ni, Fe, Co và các hợp kim của chúng được tạo bởi hệ thống phun xạ catot xoay chiều với các thông số tối ưu. Kết quả, có thể tạo màng có độ dày từ vài nm đến vài trăm nm độ lặp lại cao.

2.2. Nghiên cứu cấu trúc bằng phương pháp đo nhiễu xạ tia X

Các mẫu cần nghiên cứu được khảo sát cấu trúc tinh thể bằng thiết bị D8-Advance (Bruker, Đức) tại Trường Đại học Công nghệ.

2.3. Nghiên cứu cấu trúc từ của các hệ vật liệu

2.4. Khảo sát tính chất điện của các hệ vật liệu

2.4.1. Đo đường cong điện trở P-E



Hình 2.6. Hệ phun xạ ATC-2000F tại Phòng Thí nghiệm Trọng điểm công nghệ micro - nano, Trường ĐHCN



Hình 2.7. Ảnh chụp hệ khắc laser được sử dụng để khắc tạo hình Cấu trúc micro trạng màng được nghiên cứu chế tạo trong Luận án này.

Các tấm PZT thương mại trước khi được dùng để tạo tổ hợp multiferroics được khảo sát tính chất điện trên hệ thống của hãng RADIANT tại Đại học Bách Khoa Hà Nội.

2.4.2. Hệ đo biến dạng

$$\sigma = \frac{1}{6} \cdot \frac{r}{L_p(d_1 + d_2)} \cdot \frac{t_G^2}{t_p} \cdot \frac{E_G(1 + \nu_p)}{E_p(1 + \nu_G)} \times 100$$



Hình 2.11. Ảnh thực tế hệ đo strain tự xây dựng tại Phòng Thí nghiệm VMINATEC.

2.5. Phương pháp mô phỏng số pha - trường (phase – field)

Các cấu trúc xốp rỗng và liên tục được nghiên cứu trong Luận án được mô phỏng sử dụng mô hình pha - trường được xây dựng trong đó véc tơ từ hóa $M = (M_1, M_2, M_3)$ được coi là tham số trật tự vật liệu. Tổng mật độ năng lượng tự do của vật liệu f_m được biểu thị bằng công thức:

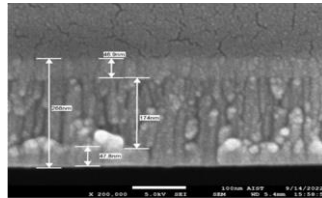
$$f_m = K_{ij} m_i^2 m_j^2 + K_{ijk} m_i^2 m_j^2 m_k^2 + A_{ij} \left(\frac{\partial m_i}{\partial x_j} \right)^2 - \mu_C H_i M_j - \frac{\mu_C}{2} H_i^2 \quad (2.7)$$

$$+ A_s (M - M_s)^2 + C_{ijkl} (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^0)(\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^0)$$

2.6. Khảo sát độ dày của màng mỏng bằng hiển vi điện tử FE-SEM



Hình 2.12. Ảnh chụp kính hiển vi FE-SEM tại Trường Đại học Bách Khoa HN

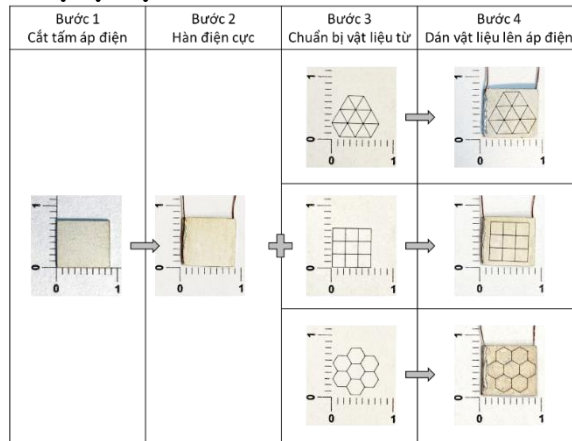


Hình 2.13. Ảnh quan sát chiều dày màng mỏng từ Ni được chế tạo trong 45 phút (thay ảnh) trên kính hiển vi FE-SEM

2.7. Khảo sát thành phần bằng phổ tán sắc năng lượng tia X (EDX)

Màng mỏng ribbon FeCSi và màng mỏng nano được phun xạ trên đế Si/SiO₂ ngay sau khi chế tạo được phân tích phổ thành phần hóa học bằng thiết bị hiển vi điện tử quét phát xạ trường tích hợp với phổ kế tán sắc năng lượng tia X (EDX) tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - ĐHQGHN.

2.8. Chế tạo các hệ vật liệu multiferroics



Hình 2.15. Hình mô tả các bước thực hiện để chế tạo vật liệu Multiferroics dạng lớp dựa trên vật liệu từ cấu trúc micro và tấm vật liệu áp điện.

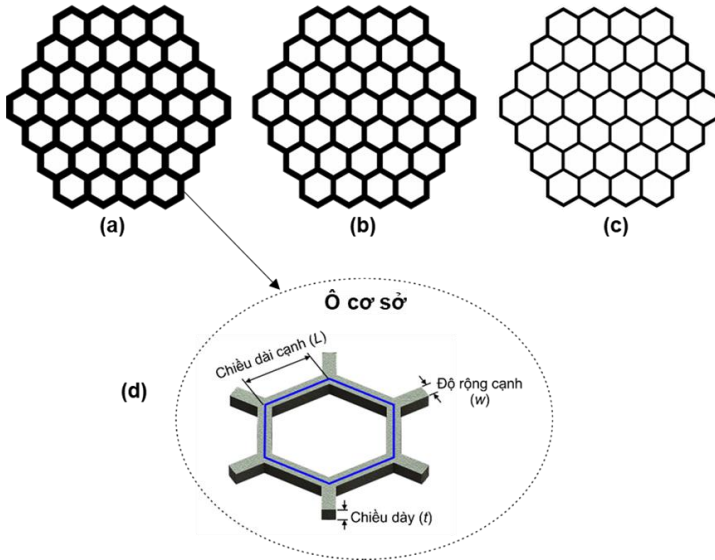
CHƯƠNG 3

NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT TỪ TRÊN CÁC VẬT LIỆU DẠNG BĂNG VÀ DẠNG NỀN Fe, Co, Ni

3.1. Nghiên cứu chế tạo vật liệu dạng vật liệu cấu trúc micro nhân tạo dựa trên băng từ trên nền Fe

Bằng phương pháp này nhóm tác giả đã tạo được các cấu trúc với độ dày cạnh micro khác nhau từ 60 đến 130 μm với độ lặp lại cao,

hình thái mẫu tốt và không thay đổi cấu trúc tinh thể so với mẫu ban đầu.

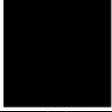
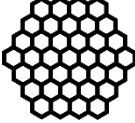
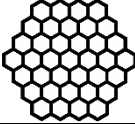
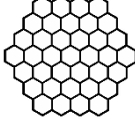

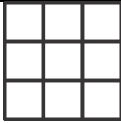



Hình 3.2. Hình ảnh thiết kế cấu trúc xốp với ô cơ sở hình lục giác với chiều dài cạnh và chiều dài bằng được thống chế không đổi và độ rộng cạnh khác nhau từ dày đến mỏng (a-c) được nghiên cứu chế tạo trong Luận án trên các vật liệu bằng từ Fe92,9C3,5Si3,6 sử dụng công nghệ khác laser kết hợp ăn mòn hóa ướt. Hình ảnh phóng to ô cơ sở được minh họa trên hình (d).

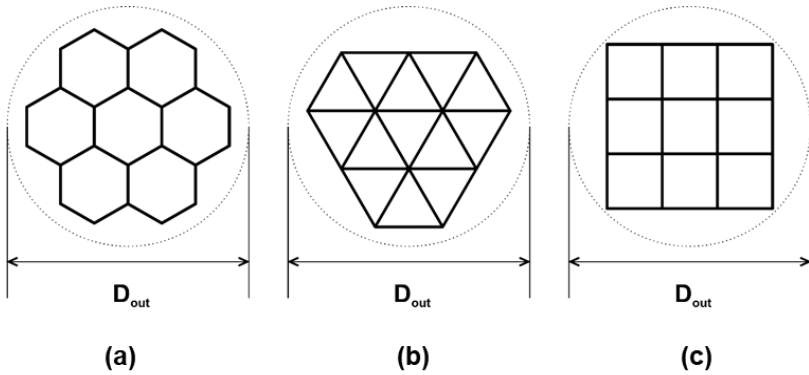
3.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của độ rộng cạnh đến tính chất từ của vật liệu bằng từ vô định hình nền Fe có cấu trúc xốp hình dạng tổ ong

Kết quả khảo sát cho thấy mẫu có cấu trúc tổ ong (honeycom) với độ dày cạnh là 60 μm cho các tính chất từ tốt nhất. Trong luận án, mẫu được ký hiệu với tên gọi HS60 và cũng là mẫu dùng để tạo vật liệu tổ hợp multiferroics.

Nhóm mẫu	Tên mẫu	Mô tả
----------	---------	-------

Băng	RB		Kích thước mẫu (Dài × Rộng): 8×8 mm
Xốp lục giác nhỏ	HS60		Kích thước ô cơ sở $L = 380 \mu\text{m}$; $w = 100 \mu\text{m}$
	HS80		Kích thước ô cơ sở $L = 380 \mu\text{m}$; $w = 80 \mu\text{m}$
	HS100		Kích thước ô cơ sở $L = 380 \mu\text{m}$; $w = 60 \mu\text{m}$
Xốp lục giác lớn	HL60		Kích thước ô cơ sở $L = 1.4 \text{ mm}$; $w = 60 \mu\text{m}$
Xốp vuông lớn	SL60		Kích thước ô cơ sở $L = 2.2 \text{ mm}$; $w = 60 \mu\text{m}$
Xốp tam giác lớn	TL60		Kích thước ô cơ sở $L = 1.8 \text{ mm}$; $w = 60 \mu\text{m}$

3.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của hình dạng ô cơ sở lên tính chất từ mềm của vật liệu băng từ vô định hình nền sắt có cấu trúc xốp




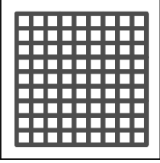
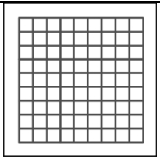
Hình 3.3. Hình ảnh thiết kế cấu trúc xốp với ô cơ sở có hình đa giác với số cạnh khác nhau: (a) hình lục giác, (b) hình vuông và (c) hình tam giác nội tiếp với đường tròn có đường kính bao ngoài toàn bộ mẫu như nhau ($D_{out} = 8 \text{ mm}$) và độ rộng cạnh bằng nhau $w = 60 \mu\text{m}$ được chế tạo từ vật liệu bằng từ $Fe_{92,9}C_{3,5}Si_{3,6}$.

3.4. Kết luận

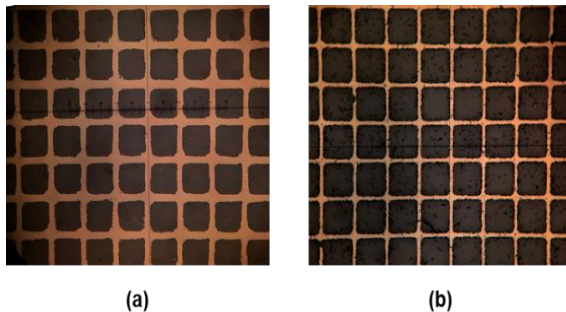
Như vậy, thông qua khai thác thiết kế hình học dạng xốp, một cách tiếp cận hoàn toàn mới, Luận án đã chứng minh khả năng có thể điều khiển tính chất từ mềm của vật liệu bằng từ vô định hình nền Fe ($Fe_{92,9}C_{3,5}Si_{3,6}$), cụ thể là độ cảm từ và tính đẳng hướng. Kết quả chỉ ra rằng, khi tỉ lệ giữa độ dài và độ rộng cạnh ô cơ sở càng lớn thì độ cảm ứng từ càng cao. Luận án cũng minh chứng cho ưu điểm là tính đẳng hướng mà cấu trúc xốp mang lại, khác biệt so với các cấu trúc đơn thanh truyền thống. Hơn nữa, việc lựa chọn hình dạng ô cơ sở của cấu trúc xốp sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến độ cảm từ trong những vùng từ trường khác nhau.

3.5. Ảnh hưởng của cấu trúc micro đến tính chất từ của màng mỏng Ni

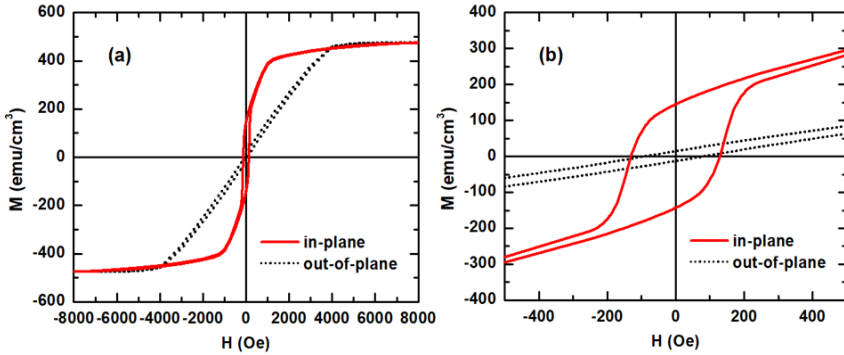
Bảng 3.2. Danh sách mẫu màng Ni và các cấu trúc micro có ô ban đầu hình vuông cùng chiều dài $L = 200 \mu\text{m}$ nhưng độ rộng cạnh khác nhau

Nhóm mẫu	Tên mẫu	Mô tả	
Màng mỏng (NF - Ni Film)	NF		Kích thước mẫu (Dài \times Rộng): $8 \times 8 \text{ mm}$
Màng cấu trúc micro với ô cơ sở hình vuông (NS - Ni Square)	NS40		Kích thước ô cơ sở $L = 200 \mu\text{m}; w = 40 \mu\text{m}$
	NS20		Kích thước ô cơ sở $L = 200 \mu\text{m}; w = 20 \mu\text{m}$

Hình 3.15. Hình ảnh từ kính hiển vi quang học nhìn từ trên xuống của



màng mỏng Ni cấu trúc micro có vô cơ sở hình vuông, kích thước ô cơ sở $L = 200 \mu\text{m}; w = 40 \mu\text{m}$ (a) và $L = 200 \mu\text{m}; w = 20 \mu\text{m}$ (b).



Hình 3.16. Đường cong từ hóa đo trên mẫu màng mỏng Ni (50 nm) chế tạo trên thủy tinh vẽ trong thang từ trường lớn (a) và nhỏ (b).

CHƯƠNG 4

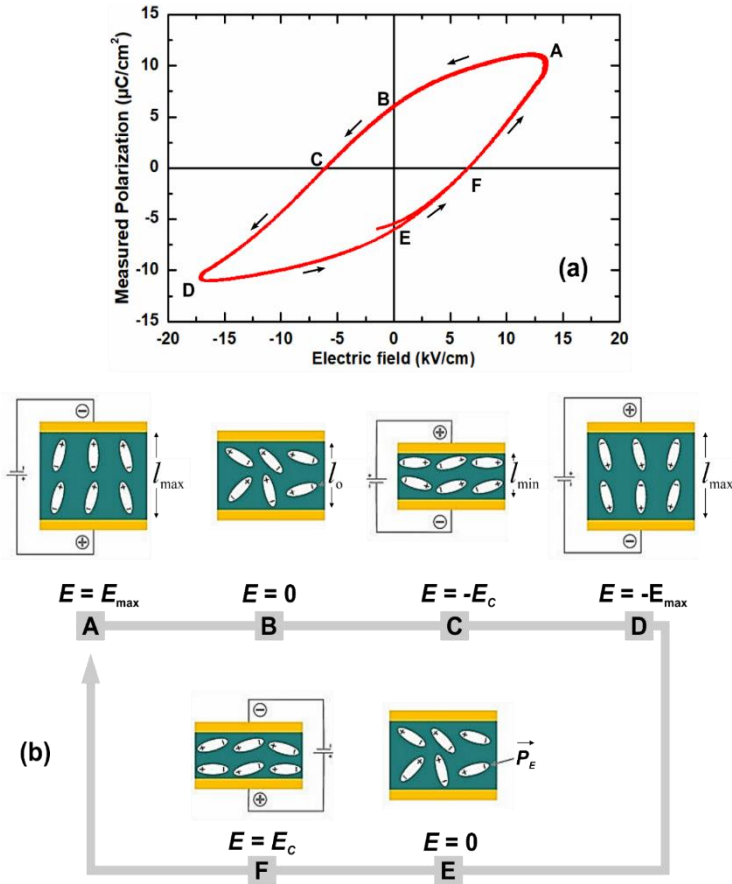
NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN TỪ TÍNH BẰNG ỨNG SUẤT TRÊN CÁC VẬT LIỆU MULTIFERROICS CẤU TRÚC MICRO - NANO DẠNG LỚP

4.1. Khảo sát độ phân cực điện và ứng suất của tấm áp điện

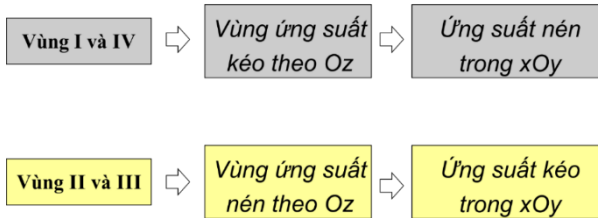
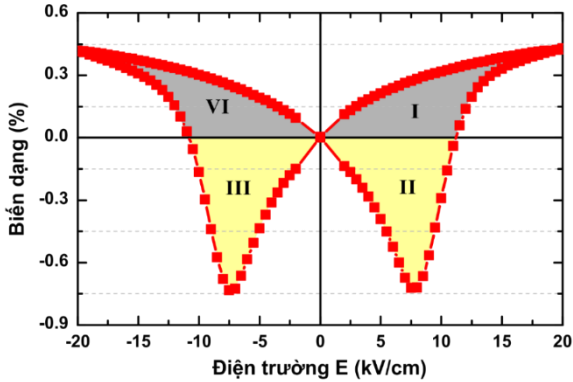
Vật liệu áp điện thương phẩm APC854 (APC International, Ltd.) được tin tưởng lựa chọn bởi nhiều nhóm nghiên cứu trên khắp thế giới do những đặc tính ấn tượng của nó cho các ứng dụng cảm biến [74]. Ưu điểm vượt trội nhất của vật liệu này là có hệ số cơ điện d_{33} cao (khoảng 600 pm/V) kết hợp với nhiệt độ Curie khoảng 250°C, các phẩm chất cần thiết hướng đến các cảm biến không những có độ nhạy cao mà còn có khả năng hoạt động trong các môi trường nhiệt độ cao.

Từ các các thông số độ phân cực dư và lực kháng điện của vật liệu PZT được đo đạc và khảo sát thực nghiệm có thể kết luận vật liệu sử dụng trong Luận án này có phẩm chất sắt điện tốt và phù hợp cho các ứng dụng cho cảm biến, đặc biệt cho các nghiên cứu điều khiển từ độ

bởi ứng suất tạo ra bằng cách đặt điện trường vào tấm vật liệu áp điện có các đặc trưng này.



Hình 4.1. Đường cong thực nghiệm đo độ phân cực của tấm vật liệu áp điện APC854 (a) và hình minh họa sắp xếp các lưỡng cực điện theo điện trường theo chu trình khép kín.

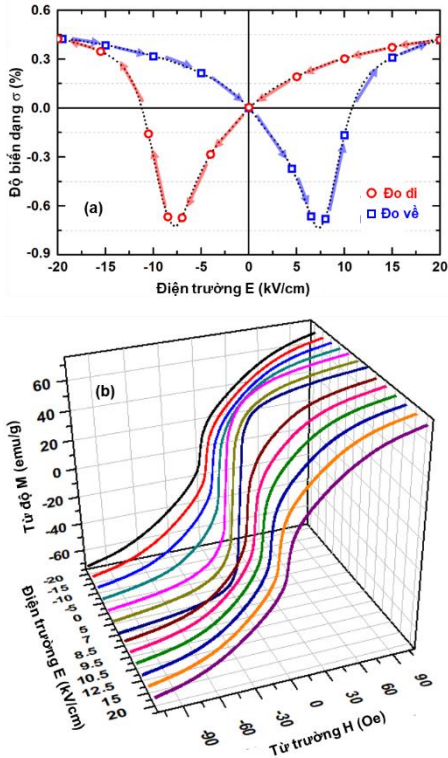


Hình 4.2. Kết quả đo độ biến dạng của vật liệu áp điện APC được thực hiện và tính toán bằng phương pháp đo phản xạ quang học (hình trên) và hình minh họa các vùng ứng suất kéo và nén (hình dưới).

4.2. Multiferroics dựa trên vật liệu dạng băng

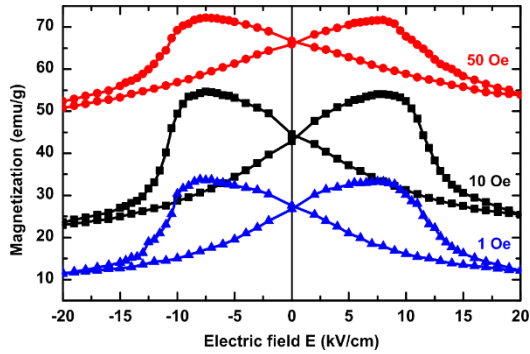
Để nghiên cứu ảnh hưởng của ứng suất gây ra khi có điện trường ngoài đặt vào tấm vật liệu áp điện, trong nội dung này, Luận án tập trung nghiên cứu và khảo sát hệ mẫu vật liệu tổ hợp dạng lớp RB/PZT, trong đó RB (viết tắt của ribbon) là băng từ có cấu trúc liên tục (ribbon). Ở đây, mẫu được khảo sát thông qua phép đo từ độ thay đổi theo điện áp đặt vào tấm vật liệu áp điện khác nhau thay $E = -20$ kV/cm đến -20 kV/cm và ngược lại (tương ứng với điện áp đặt vào hai mặt của tấm áp điện thay đổi trong khoảng từ -400 V đến 400 V) theo một chu trình khép kín tương ứng như phép đo đường cong điện trở và

đường cong độ biến dạng được thực hiện trong Mục **Error! Reference source not found.** của chương này.



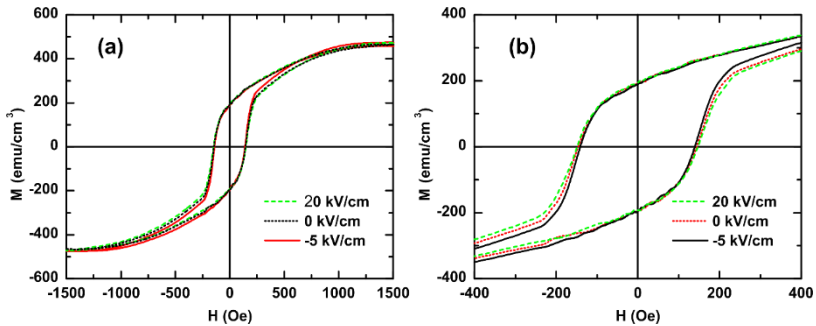
Hình 4.5. Đường cong minh họa chu trình thiết lập điện trường cho tâm vật liệu áp điện (a) và đường cong từ hóa của mẫu HS60/PZT vẽ trong vùng từ trường thấp được đo tại các giá trị điện trường khác nhau (b).

Kết quả cho thấy chúng ta hoàn toàn có thể điều khiển được tính chất từ của các hệ vật liệu multiferroics dạng băng bằng cách áp dụng các ứng suất khác nhau.



Hình 4.8. Đường cong hưởng ứng từ độ của mẫu HS60/PZT phụ thuộc vào điện trường ngoài được ghi nhận tại các giá trị từ trường ngoài $H = 1, 10$ và 50 Oe.

4.3. Multiferroics dựa trên vật liệu dạng màng dạng lớp dựa trên màng mỏng Ni cấu trúc micro



Hình 4.20. Đường cong từ hóa đo trên mẫu màng Ni tổ hợp với PZT cấu trúc micro lắng đọng trên đế thủy tinh NS20/PZT với từ trường đo nằm trong mặt phẳng mẫu và được ghi nhận tại các điện trường đặt vào tấm PZT khác nhau.

KẾT LUẬN

Luận án “Nghiên cứu đặc tính điều khiển từ tính bằng ứng suất trong các hệ vật liệu Multiferroics cấu trúc micro - nano dạng lớp” trong quá trình nghiên cứu triển khai đã đạt được một số kết quả chính sau đây:

- Nghiên cứu, chế tạo thành công các hệ vật liệu từ dạng băng và dạng màng mỏng sử dụng các công nghệ khắc laser kết hợp với các công nghệ ăn mòn hóa ướt và phún xạ với chất lượng mẫu tốt, độ lặp lại cao, phương pháp chế tạo đơn giản chủ động công nghệ và không phụ thuộc vào các thiết bị công nghệ hiện đại trong phòng sạch.
- Khảo sát và đánh giá đầy đủ các tính chất của vật liệu từ mềm dạng băng vô định hình nền Fe cấu trúc micro với các ô cơ sở, và kích thước ô cơ sở, mật độ ô cơ sở khác nhau; Các phân tích lập luận đã giải thích được quy luật thay đổi tính chất từ trên các cấu trúc này theo xu thế ô cơ sở có độ rộng cạnh càng nhỏ thì càng có lợi cho tính chất từ mềm và nhờ đó kích thước đômen càng nhỏ cũng như mật độ vách đômen càng lớn.
- Nghiên cứu, chế tạo và khảo sát các tính chất của vật liệu từ dạng màng mỏng Ni cấu trúc micro bằng phương pháp phún xạ kết hợp công nghệ khắc laser và đã khảo sát đánh giá cấu trúc, chất lượng, tính chất từ của các vật liệu cấu trúc micro-nano dạng băng và màng mỏng nghiên cứu chế tạo được; Các quy luật thay đổi từ tính trên nhóm vật liệu dạng màng mỏng chiều dày nanomet này cũng phù hợp với các kết quả quan được trên mẫu vật liệu băng từ cấu trúc micro.
- Nghiên cứu, chế tạo và khảo sát tính chất từ, tính chất áp điện và hiệu ứng điều khiển từ tính bằng ứng suất của hệ vật multiferroics

dạng lớp cấu trúc micro-nano và lựa chọn được cấu hình vật liệu tối ưu cho hiệu ứng điều khiển từ tính bằng ứng suất thu được trên cả hai nhóm vật liệu multiferroics dạng lớp cấu trúc micro dựa trên băng từ chiều dày micromet và màng mỏng chiều dày nano.

- Hiệu ứng lớn nhất thu được trên mẫu HS60/PZT sử dụng pha từ mềm là băng từ cấu trúc micro với ô cơ sở hình lục giác có độ rộng $w = 60 \mu\text{m}$ với hệ số từ điện đảo lớn nhất $\alpha_{\text{CME}} = 915 \text{ Gauss/V}$ lớn hơn nhiều bậc độ lớn so với các kết quả công bố hiện nay.
- Nghiên cứu, mô phỏng, tính toán và phân tích các vi cấu trúc từ (đômen, vách đômen) làm cơ sở để giải thích các hiện tượng và các quy luật quan sát được sử dụng công cụ mô phỏng số pha trường (Phase-Field).

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

1. Vu Nguyen Thuc, Ho Anh Tam, Do Thi Huong Giang, Nguyen Huu Duc, Nguyen Thi Ngoc, Vu Thi Ngoc Khanh, Le Van Lich, Van-Hai Dinh (2021), "Hierarchical geometric designs for Fe-based amorphous materials with tunable soft magnetic properties", *Journal of Alloys and Compounds* 895 (2021), 162628.
2. Vũ Nguyên Thúc, Hồ Anh Tâm, Nguyễn Thị Ngọc, Vũ Thị Thao, Nguyễn Hữu Đức, Vũ Thị Ngọc Khánh, Đỗ Thị Hương Giang (2022), “Nghiên cứu, chế tạo cấu trúc xấp micro nhân tạo sử dụng công nghệ khắc laser và ăn mòn hóa ướt”, Tuyển tập Hội nghị Vật lý chất rắn và Khoa học Vật liệu Toàn quốc - SPMS 2021, trang 78.
3. Vũ Nguyên Thúc, Hồ Anh Tâm, Lê Văn Lịch, Đinh Văn Hải, Nguyễn Văn Tuấn, Nguyễn Thị Ngọc, Nguyễn Hữu Đức, Đỗ Thị Hương Giang (2022), “Nghiên cứu và điều khiển tính chất từ - điện trong từ trường thấp của vật liệu tổ hợp từ - điện dựa trên băng từ FeCSi vô định hình cấu trúc xấp micro nhân tạo”, Tuyển tập Hội nghị Vật lý chất rắn và Khoa học Vật liệu Toàn quốc - SPMS 2021, trang 83.
4. Vũ Nguyên Thúc, Vũ Thị Ngọc Khánh, Hồ Anh Tâm, Nguyễn Hữu Đức, Nguyễn Thị Ngọc, Đỗ Thị Hương Giang, “Phương pháp tạo hình cấu trúc micro không cần phòng sạch, (Số đơn: 1-2021-01146. Quyết định chấp nhận đơn số 5345w/QĐ-SHTT ngày 31/03/2021)

Danh mục này gồm 04 công trình.