

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Lê Văn Long

**NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN ĐẶC TRƯNG HẤP THỤ
SÓNG ĐIỆN TỬ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA
BẰNG TÁC ĐỘNG CƠ HỌC VÀ ĐIỆN ÁP**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LIỆU ĐIỆN TỬ

Mã số: 9 44 01 23

Hà Nội - 2024

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học:

1. Người hướng dẫn 1: TS. Bùi Sơn Tùng, Học viện Khoa học và Công nghệ/ Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam.
2. Người hướng dẫn 2: GS.TS. Vũ Đình Lãm, Học viện Khoa học và Công nghệ/ Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam.

Phản biện 1: GS. TS. Lê Anh Tuấn

Phản biện 2: PGS. TS. Nguyễn Xuân Ca

Phản biện 3: PGS. TS. Nguyễn Thị Hoà

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi 09 giờ 00, ngày 05 tháng 7 năm 2024.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
2. Thư viện Quốc gia Việt Nam.

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Lịch sử của vật liệu biến hóa (Metamaterial-MM) có nguồn gốc từ đóng góp của các nhà khoa học như Jagadis Chunder Bose, Karl F. Lindman, và Winston E. Kock. Victor Veselago đã định hình khái niệm về MM vào năm 1968, mở đường cho nghiên cứu về vật liệu có chiết suất âm. John Pendry và Giáo sư David R. Smith tiếp tục đóng góp với mô hình và thực nghiệm chứng minh về vật liệu biến hóa. Tiến triển trong nghiên cứu MM đã tạo ra nhiều ứng dụng trong quang học, viễn thông, cảm biến, và khai thác năng lượng. Trong đó, vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ (metamaterial absorber - MA) đóng vai trò quan trọng. MA có khả năng tương tác và hấp thụ sóng ở nhiều dải tần số, từ vi sóng đến quang học, mở ra nhiều ứng dụng như năng lượng, công nghệ tàng hình, cảm biến và liên lạc. Tuy nhiên, các MA truyền thống thường có hạn chế trong việc điều chỉnh tần số và cường độ hấp thụ. Ở Việt Nam, nghiên cứu về MA đã thu hút sự quan tâm, nhưng chủ yếu tập trung vào tối ưu đặc trưng hấp thụ, chưa nghiên cứu về cách điều khiển tính chất hấp thụ bằng tác động ngoại vi. Do đó, nghiên cứu về MA có khả năng điều khiển tính chất bằng tác động ngoại vi là rất cần thiết, và đề tài "*Nghiên cứu điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa bằng tác động cơ học và điện áp*" được chọn để giải quyết yêu cầu này và nâng cao ứng dụng thực tế của MA.

2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

- Thiết kế, chế tạo các MM có khả năng điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ bằng các tác động cơ học và điện áp.
- Làm rõ cơ chế hấp thụ và sự biến đổi tính chất hấp thụ sóng điện từ của MM dưới tác động ngoại vi.

3. Phương pháp nghiên cứu của luận án

- Luận án được thực hiện dựa trên sự kết hợp giữa tính toán, mô phỏng, chế tạo và đo đạc thực nghiệm.
- Các tính chất điện từ như phản xạ, truyền qua và hấp thụ của vật liệu sẽ được

mô phỏng và được so sánh với các kết quả tính toán. Sau đó, dựa trên các kết quả lý thuyết, mẫu MM sẽ được chế tạo dựa trên phương pháp quang khắc. Cuối cùng, tính chất điện từ của MM sẽ được đo đạc bởi máy phân tích mạng véctor.

4. Những nội dung nghiên cứu và đóng góp mới của luận án:

- Luận án đã thiết kế và chế tạo thành công các cấu trúc MM có khả năng điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ một cách chủ động bằng các tác động cơ học đơn giản như xoay, kéo và uốn cong.
- Đã làm rõ được cơ chế hấp thụ và nguyên lý điều khiển tính chất hấp thụ bằng tác động cơ học.
- Luận án đã thiết kế thành công các cấu trúc MM có khả năng điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ một cách chủ động bằng điện áp ngoài.
- Luận án đã chế tạo được MM đa chức năng có thể điều khiển bằng điện áp ngoài, cho phép chuyển đổi linh hoạt từ chức năng hấp thụ sóng điện từ sang chức năng xoay góc phân cực của sóng điện từ.
- Đã phân tích cơ chế hoạt động của các MM điều khiển bằng điện áp ngoài.

Luận án bao gồm phần mở đầu, 4 chương nội dung và kết luận.

Chương 1. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU BIẾN HÓA ĐIỀU KHIỂN BẰNG TÁC ĐỘNG NGOẠI VI

1.1. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ và nguyên lý hoạt động

1.1.1. Đặc trưng điện từ của vật liệu biến hóa dựa trên nguyên lý cộng hưởng

Các vật liệu tổ hợp nhân tạo, như MM, có thể được tạo ra bằng cách thiết kế các nguyên tử nhân tạo hoặc cấu trúc ô cơ sở với kích thước nhỏ hơn bước sóng. Điều này tạo ra môi trường đồng nhất với các thông số điện từ vĩ mô, dựa trên lý thuyết môi trường hiệu dụng. Bằng cách này, MM có thể vượt qua giới hạn của vật liệu thông thường và điều chỉnh tính chất vật liệu theo ý muốn. Cấu trúc ô cơ sở của MM thường được thiết kế dạng cấu trúc cộng hưởng, như cấu trúc dạng dây kim loại, dạng LC và điện môi, để tạo ra các

đặc trưng điện từ mong muốn. Bằng cách khai thác các đặc trưng cộng hưởng, MM có thể tạo ra các vật liệu biến hóa với tính chất điện từ đa dạng, bao gồm cả vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ (metamaterial absorber - MA).

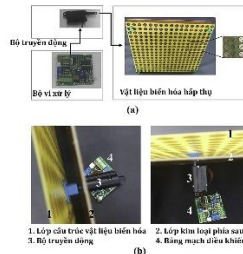
1.1.2. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ và phân loại cấu trúc

Có thể phân loại thiết kế của cấu trúc MA thành một số dạng cơ bản như: Cấu trúc dạng ba lớp kim loại - điện môi - kim loại, cấu trúc chỉ có kim loại và cấu trúc dạng hai lớp kim loại điện môi.

1.2. Nguyên lý điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng tác động ngoại vi

1.2.1. Điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng tác động cơ học

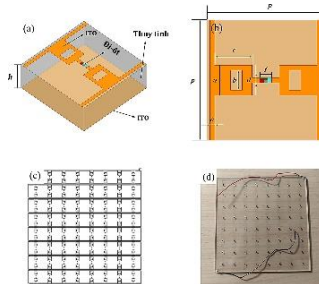
Bằng cách tích hợp một cơ cấu truyền động, độ dày của lớp điện môi không khí của mẫu MA được điều khiển. Kết quả cho thấy tần số hấp thụ của MA dịch chuyển với mức độ điều khiển tần số hấp thụ là 0,12 GHz/mm.



Hình 1.10. (a) Sơ đồ khối MA tích hợp cơ cấu truyền động. (b) Ảnh phóng đại.

1.2.2. Điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng điện áp ngoài

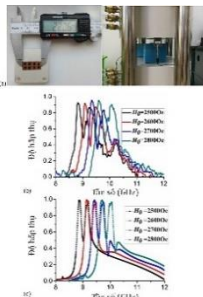
Yang Liu đã thiết kế MA có thể điều chỉnh được bằng điện áp ngoài bằng cách sử dụng các đi-ốt biến dung. Khi thay đổi điện áp ngoài, dải tần số hấp thụ và độ hấp thụ của MA thay đổi do giá trị điện dung của đi-ốt thay đổi.



Hình 1.14. (a) Ô cơ sở của MA. (b) Ảnh mặt trên của ô cơ sở. (c) Mô hình và (d) ảnh mẫu thực tế của MA

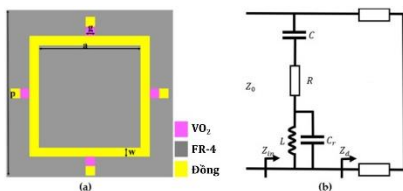
1.2.3. Điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng từ trường ngoài

MA có điều khiển bằng từ trường ngoài, sử dụng khối ferrite từ garnet sắt yttri (YIG) đặt trên một tấm đồng. Kết quả đo đạc cho thấy độ hấp thụ cao được duy trì ổn định, và phổ hấp thụ của MA có thể được điều khiển dịch về phía tần số cao khi cường độ từ trường ngoài tăng cường.



Hình 1.22. (a) Mẫu MA và nam châm điện. Phổ hấp thụ (b) đo đạc và (c) mô phỏng dưới các từ trường khác nhau.

1.2.4. Điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng nhiệt độ

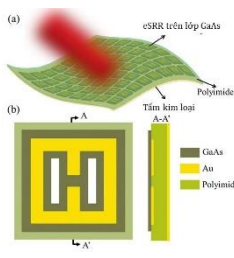


Hình 1.26. (a) Thiết kế MA có cấu trúc kim loại/điện môi/kim loại được tích hợp VO₂ và (b) mô hình mạch điện tương đương.

MA điều khiển bằng nhiệt độ được đề xuất dựa trên vật liệu chuyển pha vanadium dioxide (VO₂). Mẫu MA cho cực tiểu phản xạ ở 7,1 GHz tại nhiệt độ phòng. Sau khi VO₂ chuyển pha, cực tiểu này dịch về 6,3 GHz. Sự gia tăng độ tự cảm ở pha kim loại đã khiến cộng hưởng dịch về phía tần số thấp.

1.2.5. Điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng quang học

MA có khả năng điều khiển chủ động thông qua kích thích quang từ hạt tải trong GaAs để điều khiển linh động đáp ứng của các cấu trúc cộng hưởng điện dạng vòng có rãnh (eSRR) trên lớp đệm GaAs. Trong điều kiện không có chùm tới, xuất hiện hai cộng hưởng ở 0,78 THz (độ hấp thụ 80%) và 1,75 THz (độ hấp thụ 99%). Khi có chùm tới và tăng công suất, phổ hấp thụ dải kép giảm và chuyển sang phổ hấp thụ đơn đỉnh tại 0,95 THz.

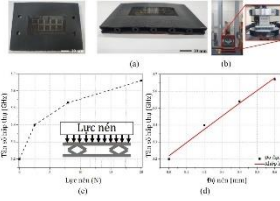


Hình 1.31. (a) MA có thể điều khiển bằng quang học và (b) ô đơn vị của MPA (mặt trên và mặt cắt).

1.3. Tiềm năng ứng dụng của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ điều khiển bằng tác động ngoại vi cơ học và điện áp

1.3.1. Ứng dụng của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ điều khiển bằng tác động ngoại vi cơ học

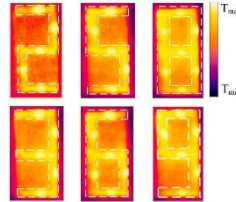
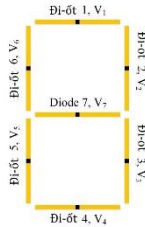
Bằng phương pháp in 3D, cảm biến lực điện từ sử dụng MA được tạo bởi nhựa dẻo và mực in dẫn điện. Khi chịu áp suất tới 20 N, tần số cộng hưởng thay đổi từ 5,2 GHz đến 5,66 GHz. Cảm biến áp lực đề xuất thể hiện độ nhạy $7,75 \times 10^8$ Hz/mm ($0,2 \times 10^8$ Hz/N) và hiệu suất ổn định trong hơn 100 chu kỳ. *hấp thụ theo (c) lực nén và (d) độ nén.*



Hình 1.35. (a) Cảm biến lực dựa trên MA. (b) Mô hình và Kết quả đo đặc sự biến đổi của tần số

1.3.2. Ứng dụng của MM hấp thụ sóng điện từ điều khiển bằng tác động ngoại vi điện áp

Mẫu MA được tạo thành từ cấu trúc cộng hưởng CW trên lớp polyimide và lớp vật liệu tổ hợp sợi carbon/epoxy dưới cùng. Các đi-ốt biến thiên tích hợp giữa các CW, có thể điều chỉnh điện dung khi điện áp thay đổi. Bằng cách đặt các cấu trúc theo hình số "8" và điều khiển độc lập điện áp, ảnh nhiệt của các chữ số "2", "3", "5", "6", "8", và "9" đã xuất hiện.



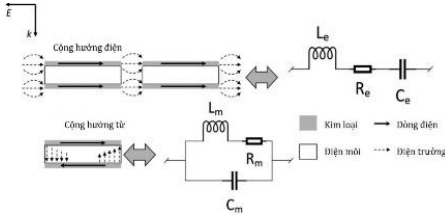
Hình 1.38. *Hiện thị ảnh nhiệt của các chữ số.*

Chương 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp tính toán tính chất điện từ của vật liệu biến hóa

2.1.1. Mô hình mạch điện tương đương

Tần số cộng hưởng của MM có thể được tính toán dựa trên mô hình mạch điện tương đương LC, trong đó các thành phần kim loại và điện môi sẽ có đóng góp vào các giá trị L và C hiệu dụng của mạch điện tương đương.



Hình 2.2. Sự phân bố dòng điện và điện trường được đơn giản hóa, và mô hình mạch tương đương của CWP ở chế độ cộng hưởng điện và từ.

2.1.2. Trở kháng của vật liệu

Đối với MA, bên cạnh việc triệt tiêu thành phần truyền qua (thường sử dụng tấm kim loại liên tục), thành phần phản xạ được triệt tiêu thông qua hiện tượng phối hợp trở kháng. Nếu trở kháng của MA có phần thực và phần ảo xấp xỉ bằng 1 và 0, sóng điện từ tới vật liệu hầu như không bị phản xạ ngược lại không khí. Trở kháng của MA có thể được tính theo công thức:

$$Z(f) = \sqrt{\frac{[1+S_{11}(f)]^2 - [S_{21}(f)]^2}{[1-S_{11}(f)]^2 - [S_{21}(f)]^2}}$$

Bên cạnh phương pháp tính toán nêu trên, trở kháng của MA cũng có thể được tính toán dựa trên mô hình lý thuyết đường truyền (transmission line - TL). Cấu trúc cộng hưởng ở mặt trước (ký hiệu là FSS), tương đương với mạch cộng hưởng, được biểu diễn bằng trở kháng Z_{FSS} . Lớp đế điện môi ở giữa và lớp kim loại liên tục ở mặt sau (ký hiệu là GND) của MA tương đương với đường truyền ngắn mạch, được biểu diễn bằng trở kháng Z_d . Trở kháng Z_d được tính toán thông qua độ dày h và độ điện thẩm ϵ_d của lớp điện môi theo công thức:

$$Z_d = i \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_d}} \tan(k_0 \sqrt{\epsilon_d} h),$$

ở đó, Z_0 và k_0 là trở kháng và số sóng của không khí. Khi đó, trở kháng của MA, ký hiệu là Z_T , được coi như tổ hợp song song giữa 2 thành phần trở kháng Z_{FSS} và Z_d :

$$Z_T = Z_{FSS} // Z_d = \frac{Z_{FSS} Z_d}{Z_{FSS} + Z_d}$$

2.2. Phương pháp mô phỏng vật liệu biến hóa

2.2.1. Phần mềm mô phỏng CST Microwave

CST MWS là một trong những phần mềm thương mại mô phỏng điện từ 3D, dựa trên kỹ thuật tích phân hữu hạn (FIT), chuyên dùng trong việc thiết kế và nghiên cứu tính chất điện từ của các loại vật liệu, linh kiện và thiết bị điện tử, trong đó có MM.

2.2.2. Thiết kế cấu trúc vật liệu

Thiết kế MM bao gồm các bước cơ bản là lựa chọn vật liệu (kim loại, điện môi, ...) và linh kiện (tụ điện, đi-ốt, ...) thành phần với các thông số điện từ của vật liệu và linh kiện cụ thể. Tiếp theo, cấu trúc hình học của ô cơ sở MM được thiết kế theo mong muốn. Cuối cùng, điều kiện biên tuần hoàn được áp dụng, đảm bảo rằng vật liệu được mô phỏng sẽ tương tự như vật liệu thực tế.

2.2.3. Mô phỏng và phân tích các đặc trưng điện từ của vật liệu

Sau quá trình mô phỏng, phần mềm CST sẽ tính toán các tham số tán xạ điện từ, bao gồm cả đồng trục và vuông góc, cho phản xạ và truyền qua vật liệu, từ đó tính được độ hấp thụ và hệ số chuyển đổi góc phân cực của sóng điện từ. Ưu điểm của phần mềm là mô phỏng được các hiện tượng vật lý cụ thể của vật liệu một cách trực quan, bao gồm phân bố dòng điện, điện trường, từ trường, và tổn hao năng lượng, giúp làm rõ cơ chế hoạt động của vật liệu.

2.3. Phương pháp chế tạo vật liệu biến hóa

Để chế tạo mẫu MA hoạt động ở vùng GHz, hệ chế tạo mẫu bằng phương pháp quang khắc được sử dụng, bao gồm các bộ phận chính như chiếu sáng, ăn mòn kim loại và tẩy rửa cảm quang.

2.4. Phương pháp đo đặc tính chất điện từ của vật liệu biến hóa

Ở vùng GHz, hệ thiết bị đo đặc sự tương tác của sóng điện từ với vật liệu được sử dụng là hệ thiết bị phân tích mạng vectơ Rohde & Schwarz ZNB20 được kết nối với hai ăng ten, có vai trò phát và thu tín hiệu của sóng lan truyền.



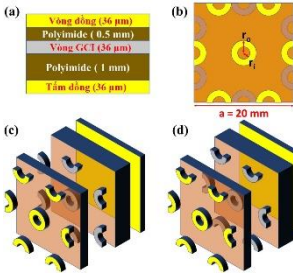
Hình 2.20. Ảnh hệ thiết bị phân tích mạng chuyên dùng để đo đặc tính chất điện từ của MA.

Chương 3. ĐIỀU KHIỂN ĐẶC TÍNH HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỬ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HOÁ BẰNG TÁC ĐỘNG CƠ HỌC

3.1. Điều khiển dải tần số hấp thụ sóng điện tử ở vùng GHz bằng cách xoay vị trí tương đối giữa các lớp trong vật liệu biến hóa

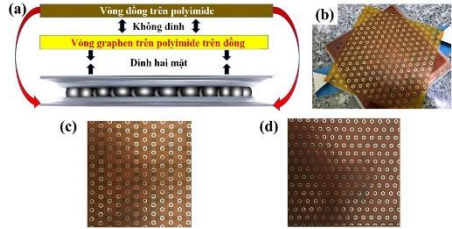
3.1.1. Cấu trúc vật liệu biến hóa đa lớp

Cấu trúc bao gồm năm lớp: lớp kim loại vòng đồng, lớp kim loại vòng GCI, và lớp đồng liên tục ở mặt sau; lớp điện môi polyimide có độ dày 0,5 và 1 mm nằm giữa các lớp kim loại. Độ dày của lớp kim loại là 0,036 mm, và vật liệu đồng có độ dẫn điện $5,96 \times 10^7$ S/m, trong khi GCI có điện trở 6,5 ohm/sq.



Hình 3.1. Thiết kế của MA đa lớp.

(a) mặt bên, (b) mặt trước ở cấu hình CRC, (c) mô hình ba chiều của cấu hình CRC và (d) mô hình ba chiều của cấu hình MRC.

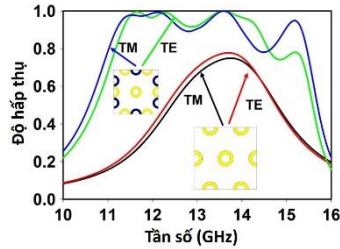


Hình 3.2. (a) Sơ đồ MA nhiều lớp có thể cấu hình lại được đặt trên ổ đỡ bàn xoay (b) khi quay, (c) sau khi quay ở cấu hình CRC và (d) sau khi quay ở cấu hình MRC.

Lớp điện môi polyimide có hằng số điện môi là 3,5 và hệ số tổn hao là 0,0027. Các vòng có bán kính ngoài $r_o = 2,5$ mm và bán kính trong $r_i = 1,5$ mm, tạo thành hình lục giác xung quanh vòng ở trung tâm. Có thể xoay các lớp trên cùng để chuyển đổi giữa cấu hình vòng đồng bộ (matched ring configuration - MRC) và vòng vuông góc (crossed ring configuration - CRC). MA có thể điều khiển bằng cơ học, khi xoay bàn xoay để chuyển đổi giữa hai cấu hình. Hình ảnh của mẫu MA chế tạo và vị trí xếp chồng sau khi xoay được hiển thị trong Hình 3.2.

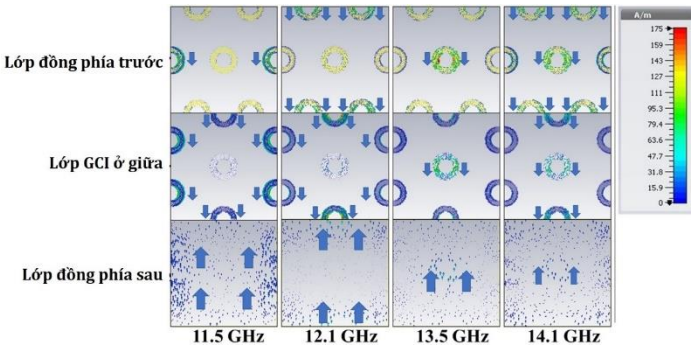
3.1.2. Điều khiển dải tần số hấp thụ của vật liệu biến hóa bằng cách thay đổi vị trí tương đối giữa các lớp

Trong trường hợp của MRC, đỉnh hấp thụ gần như đạt 80% ở 13,7 GHz và có thể nhìn thấy một vai nhỏ ở 12,8 GHz ở cả hai chế độ từ trường ngang (TM) và điện trường ngang (TE) của sóng tới. Tuy nhiên, khi lớp trên được xoay 90° so với CRC, độ hấp thụ được tăng cường đáng kể và đạt 100% ở 11,5, 12,1 và 13,5 GHz và hơn 95% ở 14,1 GHz ở chế độ TE của sóng tới. Đối với chế độ TM, độ hấp thụ ở 14,1 GHz giảm nhẹ, nhưng đỉnh hấp thụ ở 15,1 GHz tăng từ dưới 80% lên 94%. Nhìn chung, việc chuyển đổi cấu hình của cấu trúc từ MRC sang CRC không chỉ giúp tăng cường đáng kể cường độ hấp thụ mà còn mở rộng đáng kể dải tần hấp thụ. Ứng với độ hấp thụ 50% trở lên, dải tần của CRC gần như gấp đôi dải tần của MRC. Ở mức hấp thụ 70% trở lên, dải tần hấp thụ được cải thiện đáng kể lần lượt là 360% và 469% ở chế độ TE và TM.



Hình 3.3. Phổ hấp thụ mô

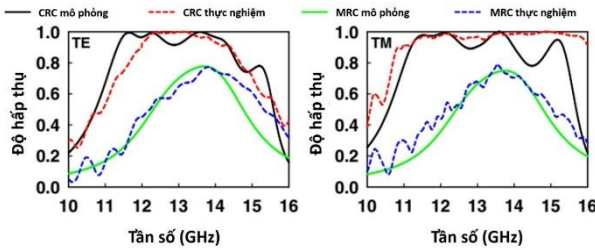
phỏng của MA ứng với hai cấu hình phân cực ở chế độ TE và TM.



Hình 3.5. Dòng điện cảm ứng trên các lớp của MA khi sóng điện từ phân cực ở chế độ TE.

Ở tần số 11,5 GHz, dòng điện trên lớp đồng ở dưới cùng tập trung chủ yếu xung quanh các cạnh thẳng đứng của ô đơn vị. Hướng dòng điện này là phản song song với hướng trên các vòng GCI và các vòng đồng ở cùng một vị trí. Điều này có nghĩa là cộng hưởng từ được kích thích tại tần số 11,5 GHz [81]. Hiện tượng này khá giống nhau ở các đỉnh hấp thụ sau này ở 12,1, 13,5 và

14,1 GHz, nhưng khác ở vị trí dòng điện. Cụ thể, dòng điện cảm ứng tập trung ở các cạnh nằm ngang để tạo ra cộng hưởng ở tần số 12,1 GHz, ở trung tâm để tạo ra cộng hưởng ở tần số 13,5 GHz và ở các vị trí khác nhau để tạo ra cộng hưởng ở tần số 14,1 GHz, bao gồm cả các vòng cộng hưởng trung tâm và các vòng cộng hưởng nằm ở cạnh ngang.



Hình 3.9. Phổ hấp thụ được mô phỏng và đo đạc ở cấu hình CRC và MRC ở chế độ (trái) TE và (phải) TM.

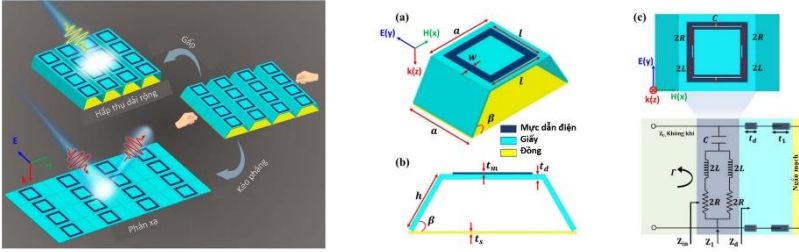
Kết quả thực nghiệm phù hợp khá tốt với kết quả mô phỏng. Kết quả cho thấy rằng, bằng tác động cơ học làm xoay các lớp của MA, độ hấp thụ ở cấu hình CRC được tăng cường và mở rộng đáng kể so với cấu hình MRC, các đỉnh hấp thụ ở 11,5 và 15,1 GHz ở chế độ TE bị giảm nhẹ và nhiều đỉnh hấp thụ từ 12-14,5 GHz được hợp nhất. Mặt khác, ở chế độ TM, phổ hấp thụ đo được tổng thể bao phủ hoàn toàn phổ hấp thụ mô phỏng, cho thấy hiệu suất hấp thụ dải rộng tốt. Những khác biệt trong thực nghiệm có thể đến từ sự phức tạp khi xoay mẫu đa lớp trong thực tế. Hơn nữa, các vòng GCI được chế tạo có thể không hoàn toàn đồng nhất như trong mô phỏng. Tuy nhiên, MA vẫn đảm bảo tốt chức năng chuyển đổi giữa các chế độ hấp thụ đơn đỉnh và dải rộng bằng tác động cơ học.

3.2. Điều khiển độ hấp thụ sóng điện từ ở vùng GHz bằng cách biến đổi hình dạng cấu trúc vật liệu biến hóa dựa trên kỹ thuật gấp giấy origami

3.2.1. Mô hình thiết kế vật liệu biến hóa làm từ giấy

MM đa chức năng có thể thay đổi cấu trúc với tên gọi vật liệu biến hóa dựa trên kỹ thuật gấp giấy (Origami-Based Metamaterial - OBMM) (Hình 3.10) đã được thiết kế từ giấy với lớp mực in dẫn điện trên bề mặt và phủ một lớp đồng mỏng phía dưới. Cấu trúc OBMM đề xuất bao gồm hai lớp: lớp giấy

với các cấu trúc tuần hoàn được in bằng mực dẫn điện và một lớp kim loại. Giấy được sử dụng như một lớp điện môi với độ dày t_d , phần thực của độ điện thẩm là $\epsilon_r = 2,85$ và phần ảo $\epsilon_i = 0,035$. Mực dẫn điện sử dụng trong mô phỏng có độ dẫn điện σ với độ dày t_m . Các thông số này được khảo sát nhằm tối ưu hóa khả năng hấp thụ.



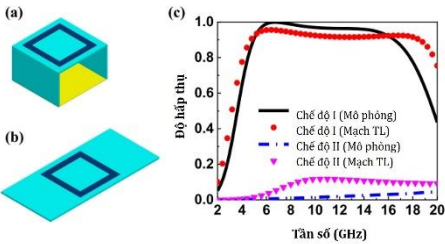
Hình 3.10. Minh họa về hai chế độ Hình 3.11. (a-b) Sơ đồ của ô cơ sở được độ: hấp thụ và phản xạ bằng thiết kế với các tham số cấu trúc và (c) cách sử dụng MM trên origami. mạch tương đương TL tương ứng.

Bằng cách điều chỉnh tỷ lệ các thành phần trong mực in, độ dẫn điện của nó có thể thay đổi nhằm khảo sát tính chất hấp thụ của OBMM. Phía sau là một lớp đồng liên tục với độ dẫn điện $5,8 \times 10^7$ S/m có độ dày $t_s = 0,036$ mm. Kích thước ô cơ sở được thiết lập theo cả hai trục x và y đều là $a = 10$ mm. Hình dạng của cấu trúc cũng phụ thuộc vào góc nghiêng β , làm thay đổi cả chiều cao và kích thước của ô cơ sở. Vì cấu trúc đề xuất tuân theo tính chất auxetic, kích thước trục x giảm thì góc nghiêng β tăng. Cấu trúc được in là một vòng hình vuông có chiều dài cạnh $l = 8$ mm với độ rộng cạnh $w = 1,5$ mm. Độ dày của giấy, cấu trúc in và lớp đồng được chọn lần lượt là $t_d = 0,254$ mm, $t_m = 0,05$ mm và $t_s = 0,036$ mm. Độ dài nghiêng h của giấy là 6 mm và độ dẫn của mực in là $\sigma = 700$ S/m.

3.2.2. Điều khiển độ hấp thụ của vật liệu biến hóa bằng kỹ thuật gấp giấy origami

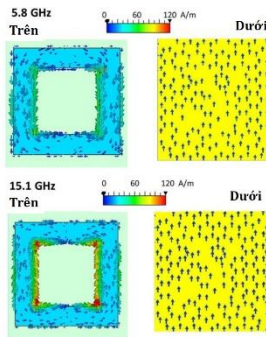
Trong chế độ I - chế độ gấp, OBMM hoạt động như một cấu trúc hấp thụ, và trong chế độ II - chế độ kéo phẳng, nó hoạt động như một cấu trúc phản xạ.

Tại chế độ I, góc nghiêng β là 90° , mô phỏng thu được độ hấp thụ đạt hơn 95% trong dải tần rộng từ 5,5 đến 16 GHz. Kết quả tính toán thu được từ mạch TL là khá trùng khớp với kết quả mô phỏng; theo đó chỉ ra độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần từ 7 GHz đến hơn 20 GHz. Trong khi đó, bằng cách kéo phẳng cấu trúc theo phương ngang, có thể tạo ra một cấu trúc phản xạ tuyệt đối (chế độ II). Tính năng này cũng được thể hiện bằng mô phỏng và mạch TL để so sánh. Đối với cấu hình này, độ hấp thụ mô phỏng gần như bằng 0, do sóng tới bị phản xạ lại hoàn toàn bởi lớp đồng.



Hình 3.12. Cấu hình cấu trúc ở (a) chế độ I và (b) chế độ II. (c) Độ hấp thụ tương ứng trong so sánh giữa mô phỏng và tính toán mạch tương đương TL.

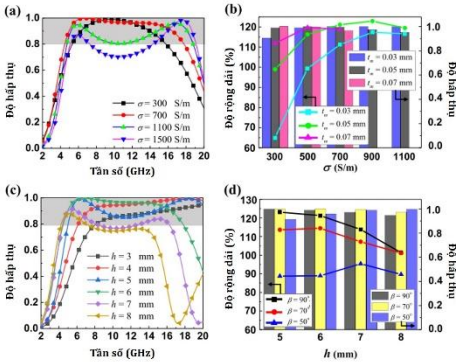
Tại cả hai đỉnh hấp thụ, dòng chủ yếu tập trung vào hai cạnh dọc của vòng hình vuông phía trước theo hướng E trong khi được phân bố đều trên tấm đồng phía sau. Tuy nhiên, phân bố dòng giữa các lớp phía trên và dưới là song song tại tần số 15,1 GHz nhưng lại đối song song tại tần số 5,8 GHz. Kết quả này có thể được giải thích bởi sự tương tác giữa cấu trúc vòng vuông in và lớp đồng. Dưới sự kích thích của sóng điện từ tới, cấu trúc hoạt động gần tương tự như MM dạng cặp dây bị cắt, và do đó, thu được hai tần số cộng hưởng khác nhau: một tần số cộng hưởng từ gây ra phân bố dòng đối song và một tần số cộng hưởng điện gây ra phân bố dòng song song [95-97].



Hình 3.13. Phân bố dòng điện mô phỏng ở chế độ I ở 5,8 GHz và 15,1 GHz.

Do đó, đỉnh hấp thụ tại 5,8 GHz có thể được lí giải bởi sự xuất hiện của cộng hưởng từ, trong khi đó đỉnh hấp thụ tại 15,1 GHz được tạo ra bởi cộng hưởng

điện. Tiếp theo, luận án khảo sát sự thay đổi tính chất hấp thụ của cấu trúc OBMM thay đổi giá trị của σ và h để xem xét ảnh hưởng của chúng đến tần số và dải tần hấp thụ. Dải hấp thụ đạt giá trị tối ưu là 117% với độ dẫn và độ dày của lớp mực là $\sigma = 700 \text{ S/m}$ và $t_m = 0,05 \text{ mm}$, tương ứng. Bên cạnh đó, khi giá trị của h tăng từ 6 đến 8 mm, hấp thụ tối đa của cấu trúc đề xuất đạt trên 90% trong tất cả các trường hợp $\beta = 90^\circ, 70^\circ$ và 50° . Khi h bằng 5 mm, cả độ rộng dải và giá trị hấp thụ tối đa đều giảm khi β giảm. Ngoài ra, cấu trúc OBMM đề xuất không phụ thuộc vào góc phân cực φ do sự đối xứng trong cấu trúc và suy giảm mạnh khi góc tới θ lớn từ 60° trở lên.



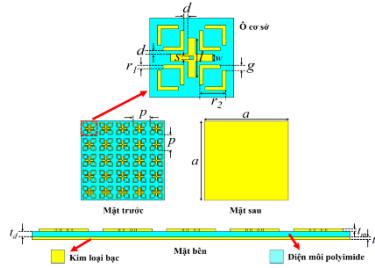
Hình 3.14. Đặc tính hấp thụ theo các giá trị khác nhau của (a) độ dẫn của mực σ và (b) độ dày h . Các giá trị tối ưu của độ rộng dải và cường độ hấp thụ theo (c) độ dẫn σ và độ dày t_m của cấu trúc, và (d) góc β và độ dày h .

3.3. Điều khiển dải tần số hấp thụ sóng điện từ ở vùng THz bằng cách uốn cong vật liệu biến hóa

3.3.1. Mô hình thiết kế vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ ở vùng THz có khả năng uốn cong

Mô hình thiết kế MA ở vùng THz có khả năng uốn cong được thể hiện trên Hình 3.17, gồm ba phần chính là lớp kim loại liên tục ở dưới cùng, lớp điện môi liên tục ở giữa và lớp kim loại không liên tục ở trên cùng được tạo hình thành các cấu trúc cộng hưởng. Mỗi ô cơ sở chứa một cấu trúc cộng hưởng dạng dấu cộng với khe trống (slotted plus - SP), được đặt ở giữa ô cơ sở và bốn cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh (split-ring resonator - SRR), nằm đối xứng ở bốn góc. Các tham số cấu trúc hình học của MA được trình bày cụ thể trên Bảng 3.2. Vật liệu điện môi và vật liệu kim loại được sử dụng trong

mô phỏng tương ứng là polyimide (độ điện thẩm là 3,5 với hệ số tổn hao là 0,0027) và bạc (độ dẫn điện là $6,3 \times 10^7$ S/m).

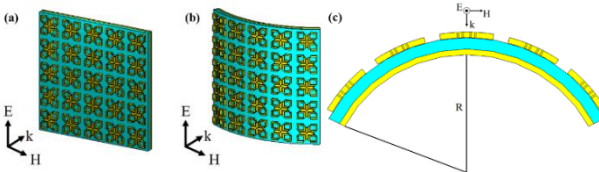


Hình 3.17. Mô hình thiết kế MA ở vùng THz.

Bảng 3.2. Giá trị các tham số cấu trúc của mẫu MA được mô phỏng.

Tham số cấu trúc	Ký hiệu	Giá trị (μm)
Kích thước của MA	a	1100
Độ dày lớp điện môi	t_d	2
Độ dày lớp kim loại	t_m	0,2
Kích thước của ô cơ sở	p	220
Chiều dài của SP	l	110
Chiều rộng của SP	w	20
Kích thước của khe trên SP	s	10
Khoảng cách giữa SP và SRR	d	5
Kích thước của SRR	r_1	10
Độ rộng của SRR	r_2	70
Kích thước khe rãnh hình vuông của SRR	g	15

3.3.2. Điều khiển dải tần số hấp thụ của vật liệu biến hóa bằng cách uốn cong

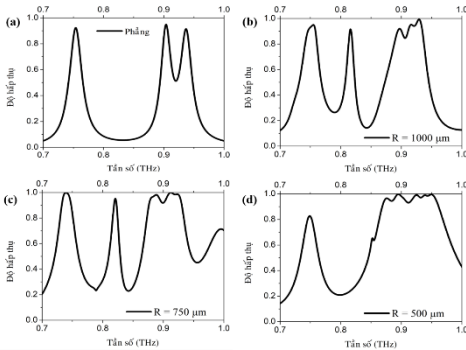


Hình 3.23. (a) MA ở trạng thái phẳng, (b) vật liệu hấp thụ ở trạng thái uốn cong,

(c) Định nghĩa mức độ uốn cong của vật liệu theo bán kính uốn cong R .

Khi MA ở trạng thái phẳng cho ba đỉnh hấp thụ nằm ở khoảng 0,76, 0,91 và 0,94 THz, mỗi đỉnh thể hiện độ hấp thụ trên 90%. Khi MA bị uốn cong với bán kính cong là $1000 \mu\text{m}$, có sự xuất hiện của 5 cực đại hấp thụ lần lượt tại các tần số 0,76, 0,81, 0,89, 0,92 và 0,93 THz, cùng với giá trị độ hấp thụ

tương ứng là 95%, 91%, 92%, 95% và 99%. Khi $R = 750 \mu\text{m}$, có hai đỉnh hấp thụ đơn lẻ ở 0,74 và 0,82 THz, có độ hấp thụ lần lượt là 99,8% và 95%. Các đỉnh hấp thụ ở phía tần số cao hơn đã kết hợp với nhau, tạo ra dải hấp thụ liền mạch kéo dài từ 0,88 đến 0,93 THz, với độ hấp thụ trên 90%. Khi $R = 500 \mu\text{m}$, độ hấp thụ ở các đỉnh khoảng 0,75 THz và 0,82 THz đã bị suy giảm. Mặc dù vậy, dải hấp thụ rộng từ 0,86 THz đến 0,96 THz vẫn hiện hữu và duy trì khả năng hấp thụ trên 90%.



Hình 3.24. Phổ hấp thụ mô phỏng của mẫu vật liệu biến hóa có độ dày lớp điện môi $t_d = 10 \mu\text{m}$ ở trạng thái phẳng và uốn cong với bán kính uốn cong R khác nhau.

3.4. Kết luận chương 3

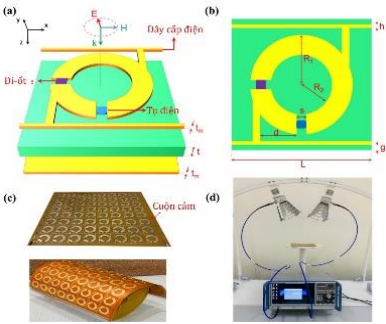
- Đã thiết kế và chế tạo MA đa lớp có thể điều khiển giữa hấp thụ đơn đỉnh và hấp thụ dải rộng bằng tác động xoay cơ học các lớp cấu trúc của MA. Đã làm rõ cơ chế điều khiển là do tác động xoay cơ học đã tái cấu hình vật liệu và tạo ra các cấu trúc khác nhau của MA.
- Đã thiết kế MA đơn giản làm từ giấy có thể chuyển đổi giữa hấp thụ và phản xạ dải rộng bằng cách gấp hoặc kéo giãn. Đã làm rõ cơ chế điều khiển là do tác động gấp hoặc kéo giãn đã tái cấu hình làm tạo ra hoặc triệt tiêu lớp điện môi của MA.
- Đã thiết kế MA ở vùng THz với dải tần số hấp thụ của vật liệu biến hóa được điều khiển bằng cách uốn cong MA.
- Đã khảo sát và đánh giá tính chất điện từ của các MA đề xuất dưới ảnh hưởng của tham số cấu trúc cũng như góc tới và góc phân cực của sóng điện từ.

Chương 4. ĐIỀU KHIỂN ĐẶC TÍNH HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HOÁ BẰNG ĐIỆN ÁP NGOÀI

4.1. Vật liệu biến hóa đa chức năng hoạt động ở vùng GHz có khả năng chuyển đổi giữa chức năng hấp thụ và chức năng xoay góc phân cực của sóng điện từ

4.1.1. Cấu trúc vật liệu biến hóa đa chức năng

Cấu trúc đề xuất của vật liệu biến hóa bao gồm ba lớp: một lớp điện môi và hai lớp kim loại, như trong Hình 4.1(a). Lớp điện môi là polyimide, có hằng số điện môi và tiếp tuyến tổn hao lần lượt là 3,5 và 0,0027. Lớp này được kẹp bởi hai lớp đồng có độ dẫn điện $\sigma = 5,8 \times 10^7$ S/m. Lớp đồng dưới cùng được cố ý thiết kế liên tục để ngăn sóng EM truyền qua cấu trúc.



Hình 4.1. (a) Sơ đồ cấu trúc ô đơn vị MM được đề xuất. Bảng 4.1. Các giá trị tham số hiệu dụng của đi-ốt.

VR (V)	C (pF)	R (Ω)	L (nH)
0	2,31	4,51	0,7
-4	0,84	4,04	0,7
-7	0,55	3,66	0,7
-11	0,38	3,18	0,7
-14	0,31	2,86	0,7
-16	0,27	2,65	0,7
-19	0,24	2,38	0,7

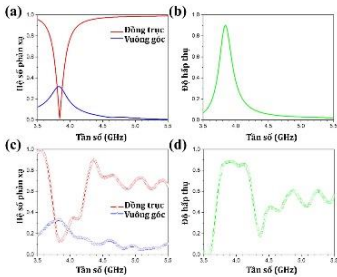
(b) Ảnh mặt trên của ô đơn vị với tham số cấu trúc: $L = 24,5$, $R_1 = 10$, $R_2 = 5,8$, $s = 1$, $d = 8,5$, $g = 0,5$, $h = 0,5$, $t = 2$, $tm = 0,035$ mm. (c) Mẫu MM được chế tạo có tích hợp với các tụ điện và đi-ốt và (d) Cấu hình phép đo phổ hấp thụ sử dụng máy phân tích mạng ZNB20.

Ngược lại, lớp kim loại trên cùng bao gồm các cấu trúc vòng cộng hưởng có hai rãnh sắp xếp tuần hoàn và các đường cấp nguồn điện một chiều. Hai đường cấp nguồn được thiết kế để cung cấp điện áp cho đi-ốt biến thiên trong mỗi ô cơ sở. Rãnh phía dưới của vòng được gắn một tụ điện có giá trị điện

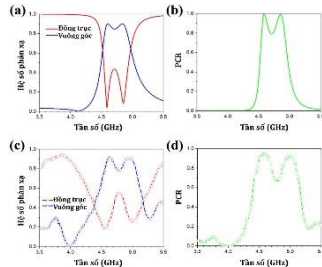
dung cố định để đạt được cấu trúc dị hướng cao ở trạng thái DPC. Tụ điện có điện dung 0,2 pF được sử dụng để tạo ra MM đa chức năng. Đi-ốt được sử dụng có số hiệu là SMV2019-079LF, với điện dung thay đổi từ 2,31 đến 0,24 pF khi điện áp phân cực DC ngược được cung cấp qua các đường cấp thay đổi từ 0 đến -19 V.

4.1.2. Chuyển đổi giữa chức năng hấp thụ sóng điện từ và chức năng xoay góc phân cực của sóng điện từ bằng điện áp ngoài

Ở trạng thái đầu tiên với điện áp đặt vào là 0 V, điều kiện phối hợp trở kháng hoàn hảo được đáp ứng và MM hoạt động ở trạng thái hấp thụ đơn đỉnh (single-peak absorption - SPA). Tần số cộng hưởng là 3,84 GHz với hệ số phản xạ đồng trục vẫn có giá trị vô cùng nhỏ là 0,03, trong khi hệ số phản xạ vuông góc cũng tương đối nhỏ cỡ 0,3 tại tần số này. Phổ hấp thụ thể hiện một cực đại ở tần số cộng hưởng với độ hấp thụ gần 90%. Kết quả đo đặc hiển thị một đỉnh hấp thụ khoảng 3,85 GHz với độ hấp thụ đạt gần 90%.



Hình 4.2. (a) Phản xạ đồng trục và phản xạ vuông góc được mô phỏng và (b) độ hấp thụ mô phỏng của MM ở điện áp phân cực 0 V. Kết quả đo đặc tại 0 V của (c) hệ số phản xạ và (d) độ hấp thụ.



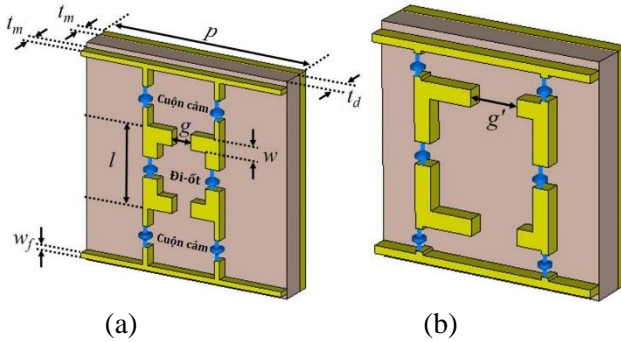
Hình 4.3. (a) Các hệ số phản xạ đồng trục và phản xạ vuông góc được mô phỏng và (b) hệ số chuyển đổi góc phân cực PCR tương ứng của MM ở điện áp phân cực -19 V. Kết quả đo đặc tại -19 V của (c) các hệ số phản xạ và (d) hệ số PCR tương ứng.

Tiếp theo, điện áp phân cực được đặt vào với giá trị khoảng -19 V. Ở điện áp này, điện dung của đi-ốt biến thiên đạt đến giá trị tối thiểu và cấu trúc MM thể hiện trạng thái bộ chuyển đổi phân cực đôi kép (dual polarization-conversion - DPC). Ở tần số cộng hưởng 4,59 GHz, giá trị của hệ số phản xạ phân cực vuông góc là 0,9, trong khi mức cực đại ở 4,86 GHz có giá trị hệ số phản xạ phân cực vuông góc là 0,91. Đối với cả hai cực đại, các phản xạ phân cực đồng trục có giá trị lần lượt là 0,04 và 0,02 tại 4,59 và 4,86 GHz. Điều này cho thấy trạng thái phân cực của sóng phản xạ ở cả hai tần số cộng hưởng là gần như phân cực tuyến tính, với góc phân cực của sóng phản xạ đã bị quay đi 90 độ so với góc phân cực của sóng tới. Trong vùng tần số rộng từ 4,54 đến 4,9 GHz, cường độ PCR luôn cao hơn 80% và giá trị PCR ở hai tần số cộng hưởng xấp xỉ 100%. Các tần số cộng hưởng đo được là khoảng 4,6 và 5 GHz với hệ số PCR thực nghiệm tương ứng là 96% và 92%.

4.2. Điều khiển tần số hấp thụ sóng điện từ bằng điện áp dựa trên linh kiện ngoại vi được tích hợp vào vật liệu biến hóa

4.2.1. Mô hình thiết kế vật liệu biến hóa có khả năng điều khiển tần số hấp thụ bằng điện áp ngoài

Thiết kế ô cơ sở MA có khả năng hấp thụ ở băng tần đơn và băng tần kép. Các MA này bao gồm một dãy tuần hoàn các ô cơ sở được sắp xếp trong mặt phẳng mẫu tương ứng. Về cơ bản, cả hai loại MA đều bao gồm ba lớp: tâm kim loại liên tục phía sau, lớp điện môi liên tục ở giữa và cấu trúc kim loại phía trước có tích hợp cuộn cảm và đi-ốt. Đối với MA băng tần đơn, ô cơ sở sử dụng cấu trúc cộng hưởng vòng bốn rãnh đối xứng (s-SRR) với hai đi-ốt biến dung được tích hợp tại hai trong số các rãnh để điều khiển tần số cộng hưởng của cấu trúc. Đường cấp điện kim loại được thiết kế ở phía trên và dưới của s-SRR, điện áp DC được đặt vào các đi-ốt biến dung.



Hình 4.8. Cấu trúc ô cơ sở của MA (a) băng tần đơn và (b) băng tần kép.

Để ngăn các tín hiệu vi sóng gây nhiễu vào phân cực DC, cuộn cảm được đặt giữa đường cấp nguồn và s-SRR. Thiết kế của MA băng tần kép tuân theo cách tiếp cận tương tự. Tuy nhiên, khoảng cách trên và dưới của cấu trúc cộng hưởng được mở rộng về phía bên phải, tạo ra cấu trúc cộng hưởng vòng bốn rãnh không đối xứng (a-SRR). Lớp điện môi ở giữa là FR-4 có hằng số điện môi tương đối 4,3 và độ tổn hao 0,025. Đồng với độ dẫn điện $5,8 \times 10^7$ S/m được chọn là vật liệu sử dụng cho cả lớp trước và sau. Độ tự cảm của cuộn cảm AC là 100 μ H. Để kiểm soát tính chất điện từ của MA, đi-ốt biến dung SMV2019-079LF được lựa chọn.

Bảng 4.2. Các tham số cấu trúc của MA băng tần đơn.

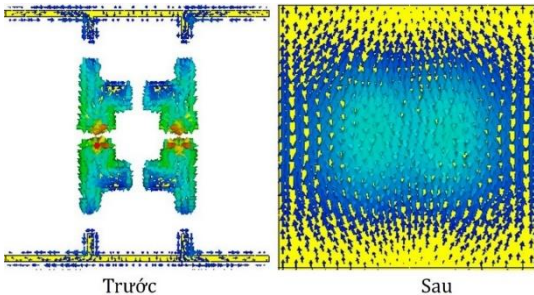
p (mm)	t_d (mm)	t_m (mm)	l (mm)	w (mm)	g (mm)	w_f (mm)
21	2,4	0,035	8	1,5	2	0,5

Bảng 4.3. Các tham số cấu trúc của MA băng tần kép.

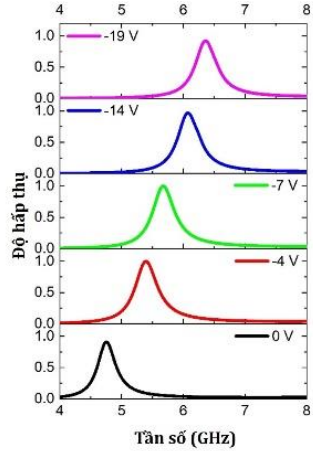
p (mm)	t_d (mm)	t_m (mm)	l (mm)	w (mm)	g (mm)	g' (mm)	w_f (mm)
14,6	2,2	0,035	9	1,05	2	3,1	0,5

4.2.2. Điều khiển tần số hấp thụ của vật liệu biến hóa bằng điện áp ngoài
Ban đầu, trong trường hợp không có điện áp được đặt vào đi-ốt biến dung, MA thu được một đỉnh hấp thụ nổi bật trong dải C ở tần số 4,7 GHz với độ hấp thụ đạt 91%.

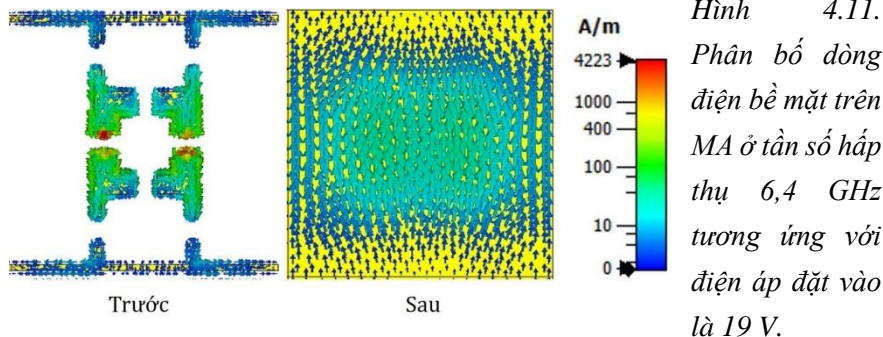
Khi áp điện áp phân cực -4 V, xảy ra sự thay đổi đáng chú ý khi đỉnh hấp thụ dịch chuyển lên tần số cao hơn là 5,4 GHz. Đồng thời, cường độ hấp thụ tăng đáng kể, đạt giá trị 99%. Sau đó, bằng cách tăng dần điện áp phân cực, đỉnh hấp thụ của MA tiếp tục dịch chuyển xanh. Cụ thể, tại các điện áp phân cực -7 V, -14 V và -19 V, các tần số hấp thụ tương ứng lần lượt là 5,7 GHz, 6,1 GHz và 6,4 GHz. Đáng chú ý là, bất chấp sự thay đổi của vị trí đỉnh hấp thụ, cường độ hấp thụ vẫn tương đối cao, với các giá trị 99%, 97% và 92% tương ứng. Điều này có nghĩa là MA duy trì khả năng hấp thụ một cách hiệu quả, ngay cả khi điện áp phân cực thay đổi. Những kết quả này góp phần mở ra tiềm năng ứng dụng điều khiển hấp thụ trong dải tần C của cấu trúc MA đề xuất. Để hiểu rõ hơn về đặc tính hấp thụ trong quá trình thay đổi điện áp ngoài, các mô phỏng dòng điện cảm ứng trên MA trong hai điều kiện riêng biệt: 0 V và -19 V.



Hình 4.10. Phân bố dòng điện bề mặt trên MA ở tần số hấp thụ 4,7 GHz tương ứng với điện áp đặt vào là 0 V.

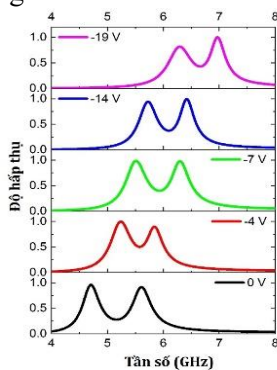


Hình 4.9. Sự phụ thuộc của phổ hấp thụ MA đơn băng tần vào điện áp ngoài.



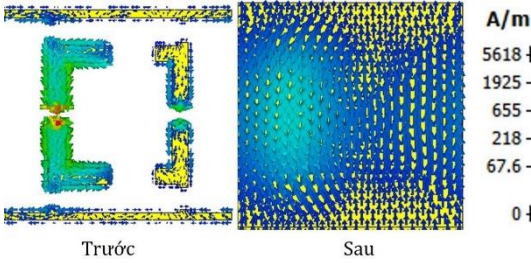
Trong cả hai trường hợp, dòng điện cảm ứng ở lớp đồng trước và sau đều đối xứng, cho thấy tại tần số hấp thụ xảy ra cộng hưởng từ. Ngoài ra, các dòng điện chủ yếu tập trung trong các vùng tương ứng với vị trí của các s-SRR, chứng tỏ rằng cộng hưởng từ chủ yếu được tạo ra bởi cấu trúc s-SRR, trong khi ảnh hưởng của đường cấp điện là không đáng kể.

Dựa vào tính bất đối xứng của cấu trúc cộng hưởng, a-SRR thu được hai đỉnh hấp thụ riêng biệt khi không có điện áp đặt vào. Đỉnh đầu tiên được quan sát thấy ở tần số 4,7 GHz với độ hấp thụ 95,8%, trong khi đỉnh thứ hai xuất hiện ở tần số 5,6 GHz với độ hấp thụ 91,5%. Khi áp điện áp -4V, phổ hấp thụ dịch chuyển sang vùng tần số cao hơn. Do đó, đỉnh hấp thụ thứ nhất và thứ hai lần lượt đạt 99,8% và 90% tại tần số 5,2 GHz và 5,8 GHz. Xu hướng dịch chuyển xanh vẫn tồn tại khi tăng điện áp ngoài.

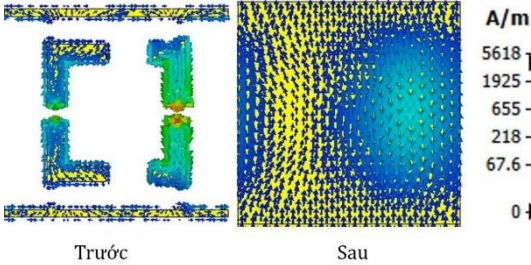


Hình 4.12. Sự phụ thuộc của phổ hấp thụ MA dải kép vào điện áp ngoài.

Đáng chú ý, MA băng tần kép duy trì mức hấp thụ trên 90% trong suốt quá trình điều chỉnh ngay cả khi điện áp ngoài lên đến -14V. Tuy nhiên, đối với điện áp đặt vào là -19 V, độ hấp thụ của đỉnh đầu tiên giảm nhẹ xuống còn 81,6%, trong khi độ hấp thụ của đỉnh thứ hai vẫn cao.

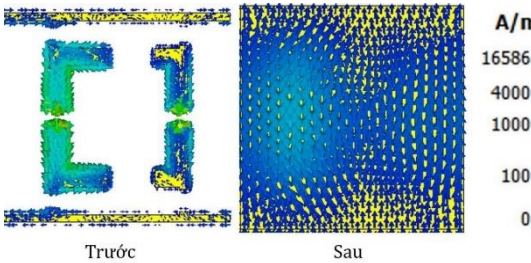


Hình 4.13. Phân bố dòng điện bề mặt trên MA ở tần số hấp thụ đầu tiên là 4,7 GHz tương ứng với điện áp đặt vào là 0V.

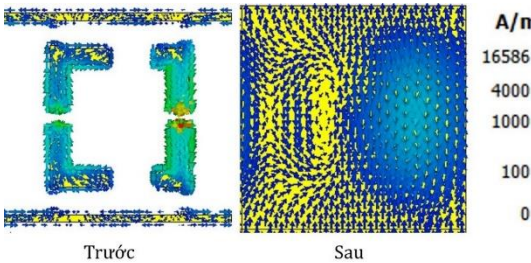


Hình 4.14. Phân bố dòng điện bề mặt trên MA ở tần số hấp thụ thứ hai là 5,6 GHz tương ứng với điện áp đặt vào là 0 V.

Tương tự như quan sát trong MA băng tần đơn, dòng điện cảm ứng ở lớp kim loại phía trước và sau là đối song ở cả hai tần số cộng hưởng, điều này xác nhận sự kích thích của cộng hưởng từ làm phát sinh các cực đại hấp thụ.



Hình 4.15. Phân bố dòng điện bề mặt trên MA ở tần số hấp thụ đầu tiên là 6,3 GHz tương ứng với điện áp đặt vào là -19 V.



Hình 4.16. Phân bố dòng điện bề mặt trên MA ở tần số hấp thụ thứ hai là 6,9 GHz tương ứng với điện áp đặt vào là -19 V.

Đáng chú ý, ở tần số cộng hưởng đầu tiên, các dòng điện chủ yếu tập trung tại các vùng tương ứng với vị trí của các phần bên trái a-SRR, trong khi ở tần

số cộng hưởng thứ hai, chúng tập trung chủ yếu trong các vùng tương ứng với vị trí của các phân bên phải a-SRR.

4.3. Kết luận chương 4

- Đã thiết kế và chế tạo MM đa chức năng điều khiển bằng điện áp ngoài. Chức năng hấp thụ và chức năng xoay góc phân cực của sóng điện từ có thể được chuyển đổi bằng cách thay đổi điện thế trên đi-ốt tích hợp trong MM. Cơ chế điều khiển là do trục đối xứng của cấu trúc MM thay đổi khi tính chất của đi-ốt thay đổi theo điện thế.

- Đã thiết kế và mô phỏng các MA băng tần đơn và kép có khả năng điều khiển tần số hấp thụ bằng điện áp hoạt động trong vùng C. Cơ chế điều khiển là do điện dung hiệu dụng của MA bị thay đổi khi tính chất của đi-ốt thay đổi theo điện thế, dẫn đến tần số cộng hưởng LC bị dịch chuyển.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Luận án “*Nghiên cứu điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa bằng tác động cơ học và điện áp*” đã được thực hiện tại Học viện Khoa học và Công nghệ và Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Những kết quả nghiên cứu chính của luận án đã được công bố trên 03 bài báo tạp chí quốc tế thuộc danh mục SCIE, 01 bài báo tạp chí quốc gia và 01 bài kỷ yếu hội thảo, cụ thể bao gồm:

Luận án đóng góp cho nghiên cứu về Khoa học vật liệu nói chung và Vật liệu biến hóa nói riêng. Một số kết quả nghiên cứu chính cụ thể như sau:

1. Đã thiết kế và chế tạo thành công MA có thể điều khiển tính chất hấp thụ bằng tác động xoay cơ học. Ở trạng thái ban đầu, MA có cấu hình MRC cho độ hấp thụ 80% ở 13,7 GHz. Khi xoay lớp trên cùng đi 90°, MA chuyển sang cấu hình CRC cho độ hấp thụ dải rộng. Dải tần số với độ hấp thụ trên 70% của cấu hình CRC rộng hơn 360% và 469% so với cấu hình MRC, tương ứng với sóng điện từ tới ở các chế độ TE và TM.

2. Đã thiết kế được OBMM có thể điều khiển tính chất hấp thụ bằng tác động

kéo. Khi MA bị kéo phẳng, OBMM phản xạ sóng điện từ tới. Khi MA được gấp lại, OBMM hấp thụ sóng điện từ tới trên một dải tần số rộng từ 5,5 đến 16 GHz.

3. Đã thiết kế và chế tạo thành công BMM có thể điều khiển bằng điện áp ngoài. Khi không có điện áp ngoài, BMM hoạt động ở chức năng hấp thụ với độ hấp thụ 90% ở 3,85 GHz. Khi điện áp ngoài 19 V được đặt vào, BMM chuyển sang chức năng chuyển đổi phân cực dải kép với hệ số chuyển đổi phân cực là 96% và 92% tương ứng ở tần số 4,6 và 5 GHz. Ở hai tần số này, sóng điện từ chiếu đến BMM phần lớn sẽ bị phản xạ với góc phân cực của sóng phản xạ bị xoay đi 90° so với góc phân cực của sóng tới, hay nói cách khác sóng điện từ bị chuyển đổi từ chế độ TE sang TM.

Các kết quả đạt được của luận án có thể đóng góp quan trọng cho sự phát triển của các thiết bị thông minh trong tương lai liên quan đến che chắn sóng điện từ và radar hoặc trong các lĩnh vực thông tin liên lạc. Các kết quả này cũng góp phần giúp phát triển các thiết bị đa chức năng, dựa trên điều khiển chủ động tính chất điện từ của MM.

Các hướng nghiên cứu tiếp theo, mở rộng tới các vùng tần số cao hơn, như vùng hồng ngoại và vùng quang học, sẽ là một bước tiếp nối quan trọng. Việc khai thác tính chất hấp thụ của vật liệu biến hóa ở những dải tần này có thể dẫn đến các ứng dụng mới mẻ trong lĩnh vực truyền thông quang học, xử lý tín hiệu và cả trong lĩnh vực y học, nơi tần số cao có thể đem lại thông tin chi tiết về cấu trúc phân tử và tế bào.

Tóm lại, nghiên cứu về điều khiển biên độ và tần số hấp thụ của vật liệu biến hóa không chỉ đang mở ra những triển vọng ứng dụng đầy hứa hẹn, mà còn cung cấp nền tảng cho những nghiên cứu tiếp theo về việc tích hợp chúng vào các thiết bị điện tử thông minh và khám phá các ứng dụng mới ở các dải tần số cao hơn.

**DANH MỤC CÁC BÀI BÁO ĐÃ XUẤT BẢN
LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN**

1. **Le Van Long**, Dinh Ngoc Dung, Pham Thanh Son, Nguyen Thanh Tung, Vu Thi Hong Hanh, Duong Thi Ha, Do Thuy Chi, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, and Vu Dinh Lam, “*Robust reversion of dual-band polarization conversion and absorption based on flexible metamaterial*”, Journal of the Physical Society of Japan **92**, 024801 (2023).
2. **Le Van Long**, Nguyen Hoang Tung, Trinh Thi Giang, Pham Thanh Son, Nguyen Thanh Tung, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, and Vu Dinh Lam, “*Rotary bi-layer ring-shaped metamaterials for reconfiguration absorbers*”, Applied Optics **61**(30), 9078-9084 (2022).
3. The-Linh Pham, Bui Xuan Khuyen, Bui Son Tung, Le Dinh Hai, **Le Van Long**, Vu Dinh Lam and Nguyen Thanh Tung, “*Origami-based stretchable bi-functional metamaterials: reflector and broadband absorber*”, Journal of Physics D: Applied Physics **54**, 165111 (2021).
4. **Lê Văn Long**, Dương Thị Hà, Bùi Xuân Khuyến, Nguyễn Thanh Tùng, Bùi Sơn Tùng, Phạm Thanh Sơn, Trịnh Thị Giang, Vũ Đình Lãm, “*Nghiên cứu mô phỏng vật liệu biến hóa có khả năng uốn cong, hấp thụ sóng điện từ trong vùng THz*”, Kỷ yếu hội nghị **Những tiến bộ trong vật lý kỹ thuật và ứng dụng VII (CAEP-7)**, 7-13, Hà Nội (2022).
5. **Le Van Long**, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Bui Huu Nguyen, Vu Dinh Lam, “*Electrically reconfigurable metamaterial absorber operating in C band*”, Journal of Military Science and Technology **91**, 63-72 (2023).