

**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**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LIỆU ĐIỆN TỬ

Hà Nội - 2024

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 TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA
BẰNG TÁC ĐỘNG CƠ HỌC VÀ ĐIỆN ÁP

LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LIỆU ĐIỆN TỬ

Mã số: 9 44 01 23

Xác nhận của Học viện
Khoa học và Công nghệ

Người hướng dẫn 1

Người hướng dẫn 1

TS. Bùi Sơn Tùng

GS.TS. Vũ Đình Lãm

Hà Nội - 2024

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu khoa học của riêng tôi dưới sự hướng dẫn của GS. TS. Vũ Đình Lãm và TS. Bùi Sơn Tùng. Các số liệu, kết quả trình bày trong luận án được trích dẫn lại từ các bài báo đã được xuất bản của tôi và các công sự. Các số liệu, kết quả nghiên cứu là trung thực và chưa được công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả luận án

Lê Văn Long

LỜI CẢM ƠN

Trước hết, nghiên cứu sinh muốn thể hiện lòng biết ơn chân thành và sâu sắc đối với hai người thầy vô cùng quý báu, GS. TS. Vũ Đình Lâm và TS. Bùi Sơn Tùng. Không gì có thể tượng trưng cho mức độ biết ơn của nghiên cứu sinh đối với thời gian, tâm huyết và kiến thức mà các thầy đã dành để hướng dẫn và định hướng cho hành trình nghiên cứu khoa học của nghiên cứu sinh. Các thầy không chỉ đơn thuần là người hướng dẫn, mà còn là nguồn cảm hứng quý báu, luôn truyền lửa, động viên và giúp đỡ nghiên cứu sinh vượt qua những khó khăn trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thiện luận án.

Không thể không bày tỏ lòng biết ơn tới TS. Bùi Xuân Khuyến từ Viện Khoa học vật liệu, thầy đã chia sẻ tận tình và hỗ trợ một cách chân thành trong hành trình thực hiện luận án của nghiên cứu sinh. Sự tận tụy và sự hỗ trợ nhiệt tình từ thầy đã là nguồn động viên mạnh mẽ, giúp tôi vượt qua những thách thức trong công việc nghiên cứu và tiến gần hơn đến mục tiêu của mình.

Nghiên cứu sinh không thể không gửi lời cảm ơn chân thành đến toàn bộ đội ngũ các thầy cô và đồng nghiệp tại Phòng Vật lý vật liệu từ và siêu dẫn, cũng như Phòng Công nghệ plasma thuộc Viện Khoa học vật liệu. Sự hỗ trợ và tạo điều kiện thuận lợi từ phía các thầy cô và đồng nghiệp đã góp phần quan trọng, tạo nên môi trường thích hợp cho quá trình học tập và nghiên cứu của nghiên cứu sinh.

Không thể không nhắc đến sự đồng hành và hỗ trợ không ngừng từ các thầy cô giáo, nghiên cứu sinh và học viên cao học tại Nhóm nghiên cứu Vật liệu biến hóa cũng như Phòng Vật liệu biến hoá và ứng dụng thuộc Viện Khoa học vật liệu. Sự chia sẻ kiến thức, hướng dẫn và sự đồng cảm đã giúp nghiên cứu sinh vượt qua những thách thức và hoàn thành luận án này một cách tốt nhất trong khả năng.

Nghiên cứu sinh muốn bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến Học viện Khoa học và Công nghệ, cùng với Viện Khoa học vật liệu, đã tạo điều kiện thuận lợi trong suốt quá trình học tập và thực hiện luận án của nghiên cứu sinh. Cảm giác được ở trong môi trường có sự đồng cảm và hỗ trợ đã giúp nghiên cứu sinh tự tin hơn trong việc theo đuổi mục tiêu nghiên cứu của mình.

Nghiên cứu sinh cũng xin bày tỏ lòng biết ơn đặc biệt đến Thường vụ Đảng uỷ, Ban Lãnh đạo và các cơ quan thuộc Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga đã tạo mọi điều kiện thuận lợi cho nghiên cứu sinh trong quá trình học tập và thực hiện luận án.

Luận án này cũng không thể thiếu sự ủng hộ và tài trợ từ đề tài, dự án nghiên cứu thuộc Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED), mã số 103.99-2020.23. Sự hỗ trợ từ Quỹ đã cung cấp cho nghiên cứu sinh cơ hội thực hiện những nghiên cứu có ý nghĩa và có tiềm năng ứng dụng trong thực tế.

Cuối cùng, nghiên cứu sinh muốn dành những lời cảm ơn chân thành tới gia đình và bạn bè. Sự ủng hộ không ngừng, sự tin tưởng và tình thương vô điều kiện từ gia đình và bạn bè đã là nguồn động viên to lớn, giúp nghiên cứu sinh vượt qua mọi khó khăn và đạt được thành công trong hành trình thực hiện luận án này.

Tác giả luận án

Lê Văn Long

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	ii
LỜI CẢM ƠN	iii
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU	viii
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	xi
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ	xii
MỞ ĐẦU	1
Chương 1. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU BIẾN HÓA ĐIỀU KHIỂN BẰNG TÁC ĐỘNG NGOẠI VI	7
1.1. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ và nguyên lý hoạt động	7
1.1.1. Đặc trưng điện từ của vật liệu biến hóa dựa trên nguyên lý cộng hưởng	7
1.1.2. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ và phân loại cấu trúc	11
1.2. Nguyên lý điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng tác động ngoại vi	14
1.2.1. Điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng tác động cơ học ..	14
1.2.2. Điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng điện áp ngoài	20
1.2.3. Điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng từ trường ngoài ..	27
1.2.4. Điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng nhiệt độ	30
1.2.5. Điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng quang học	33
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	37
1.3.1. Ứng dụng của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ điều khiển bằng tác động ngoại vi cơ học	37
1.3.2. Ứng dụng của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ điều khiển bằng tác động ngoại vi điện áp	39
1.4. Kết luận chương 1	42
Chương 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	43
2.1. Phương pháp tính toán tính chất điện từ của vật liệu biến hóa	43
2.1.1. Mô hình mạch điện tương đương	43
2.1.2. Trở kháng của vật liệu	45
2.2. Phương pháp mô phỏng vật liệu biến hóa	48
2.2.1. Phần mềm mô phỏng CST Microwave	48

2.2.2. <i>Thiết kế cấu trúc vật liệu</i>	49
2.2.3. <i>Mô phỏng và phân tích các đặc trưng điện từ của vật liệu</i>	51
2.3. Phương pháp chế tạo vật liệu biến hóa	54
2.4. Phương pháp đo đặc tính chất điện từ của vật liệu biến hóa.....	57
2.5. Kết luận chương 2	59
Chương 3. ĐIỀU KHIỂN ĐẶC TÍNH HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HOÁ BẰNG TÁC ĐỘNG CƠ HỌC.....	60
3.1. Điều khiển dải tần số hấp thụ sóng điện từ ở vùng GHz bằng cách xoay vị trí tương đối giữa các lớp trong vật liệu biến hóa.....	60
3.1.1. <i>Cấu trúc vật liệu biến hóa đa lớp</i>	60
3.1.2. <i>Điều khiển dải tần số hấp thụ của vật liệu biến hóa bằng cách thay đổi vị trí tương đối giữa các lớp</i>	62
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	70
3.2.1. <i>Mô hình thiết kế vật liệu biến hóa làm từ giấy</i>	70
3.2.2. <i>Điều khiển độ hấp thụ của vật liệu biến hóa bằng kỹ thuật gấp giấy origami</i>	72
3.3. Điều khiển dải tần số hấp thụ sóng điện từ ở vùng THz bằng cách uốn cong vật liệu biến hóa	79
3.3.1. <i>Mô hình thiết kế vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ ở vùng THz có khả năng uốn cong</i>	79
3.3.2. <i>Điều khiển dải tần số hấp thụ của vật liệu biến hóa bằng cách uốn cong</i> ..	81
3.4. Kết luận chương 3	87
Chương 4. ĐIỀU KHIỂN ĐẶC TÍNH HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HOÁ BẰNG ĐIỆN ÁP NGOÀI.....	90
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.....	90
4.1.1. <i>Cấu trúc vật liệu biến hóa đa chức năng</i>	90
4.1.2. <i>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</i>	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	99
4.2.1. Mô hình thiết kế vật liệu biến hóa có khả năng điều khiển tần số hấp thụ bằng điện áp ngoài	99
4.2.2. Điều khiển tần số hấp thụ của vật liệu biến hóa bằng điện áp ngoài	101
4.3. Kết luận chương 4	106
KẾT LUẬN CHUNG.....	109
KIẾN NGHỊ NHỮNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO	111
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN.....	112
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	113

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU**1. Danh mục các ký hiệu viết tắt**

A_M	Độ hấp thụ
C	Dung kháng
E	Điện trường
f	Tần số
H	Từ trường
k	Hướng truyền sóng
L	Cảm kháng
PCR	Hệ số chuyển đổi phân cực
R	Điện trở
R_M	Độ phản xạ
S_{11}	Tham số phản xạ
S_{21}	Tham số truyền qua
T_M	Độ truyền qua
V	Điện áp
Z	Trở kháng

2. Danh mục chữ viết tắt

Viết tắt	Nguyên bản tiếng Anh	Tạm dịch
a-SRR	Asymmetric split-ring resonator	Vòng cộng hưởng có rãnh bất đối xứng
BMM	Bi-functional metamaterial	Vật liệu biến hóa đa chức năng
CRC	Crossed ring configuration	Cấu hình vòng vuông góc
CST MWS	Computer Simulation Technology, Microwave studio	Phần mềm mô phỏng tương tác điện từ
CW	Cut wire	Dây bị cắt
CWP	Cut-wire pair	Cặp dây bị cắt
DPC	Dual polarization-conversion	Chuyển đổi phân cực dải kép
FIT	Finite integration technique	Kỹ thuật tích phân hữu hạn
FWHM	Full width at half maximum	Độ bán rộng phổ
GCI	Graphene-based conductive ink	Mực dẫn điện dựa trên graphene
MA	Metamaterial absorber	Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ
MM	Metamaterial	Vật liệu biến hóa
MRC	Matched ring configuration	Cấu hình vòng đồng bộ
OBMM	Origami-based metamaterial	Vật liệu biến hóa dựa trên kỹ thuật gấp giấy
SP	Slotted plus	Cấu trúc cộng hưởng dạng dấu cộng
SPA	Single-peak absorption	Hấp thụ đơn đỉnh
SRR	Split-ring resonator	Vòng cộng hưởng có rãnh
s-SRR	Symmetric split-ring resonator	Vòng cộng hưởng có rãnh đối xứng
TE	Transverse electric	Điện trường ngang
TL	Transmission line	Đường truyền

TM	Transverse magnetic	Từ trường ngang
TSMA	Thermal-switchable metamaterial absorber	Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ điều khiển bằng nhiệt độ
VNA	Vector Network Analyzer	Máy phân tích mạng véctơ

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

<i>Bảng 1.1.</i> Bảng giá trị các tham số cấu trúc của MA được tích hợp VO ₂ .	32
<i>Bảng 3.1.</i> So sánh giữa cấu trúc hấp thụ MM đề xuất với các thiết kế trước đó	79
<i>Bảng 3.2.</i> Giá trị các tham số cấu trúc của mẫu vật liệu biến hóa được mô phỏng.	81
<i>Bảng 3.3.</i> So sánh giữa các nghiên cứu điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ bằng tác động cơ học trong luận án với các nghiên cứu khác.	88
<i>Bảng 4.1.</i> Các giá trị tham số hiệu dụng của diode.	91
<i>Bảng 4.2.</i> Các tham số cấu trúc của MA băng tần đơn.	100
<i>Bảng 4.3.</i> Các tham số cấu trúc của MA băng tần kép.	100
<i>Bảng 4.4.</i> Các thông số mạch tương đương cho diode biến dung.	100
<i>Bảng 4.5.</i> Tính chất hấp thụ của MA dải kép ở các điện áp ngoài khác nhau.	104
<i>Bảng 4.6.</i> So sánh giữa các nghiên cứu điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ bằng điện áp ngoài trong luận án với các nghiên cứu khác	107

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

<i>Hình 1.1.</i>	Mô hình cấu tạo của vật liệu trong tự nhiên và MM có cấu trúc nhân tạo.	7
<i>Hình 1.2.</i>	Mô hình lưới dây kim loại và phổ độ điện thâm: (a) dài liên tục và (b) ngắn không liên tục.	8
<i>Hình 1.3.</i>	(a) Cấu trúc SRR tạo ra cộng hưởng điện. (b) Phổ giá trị phần thực và phần ảo của độ điện thâm.	9
<i>Hình 1.4.</i>	(a) Mô hình vật liệu tổ hợp tạo bởi các hạt điện môi dạng cầu. (b) Phổ giá trị điện thâm và từ thâm tương ứng.	9
<i>Hình 1.5.</i>	(a) Cấu trúc SRR. (b) Nguyên lý hoạt động. (c) Phổ giá trị của độ từ thâm.	10
<i>Hình 1.6.</i>	(a) Cấu trúc CWP. (b) Mô hình mạch điện tương đương.	11
<i>Hình 1.7.</i>	MA sử dụng cấu trúc: (a) ba lớp kim loại - điện môi - kim loại, (b) chỉ có kim loại và (c) hai lớp kim loại điện môi.	12
<i>Hình 1.8.</i>	MA sử dụng cấu trúc kim loại - điện môi - kim loại và mô hình mạch điện tương đương.	13
<i>Hình 1.9.</i>	Cấu trúc ô cơ sở của MA hoạt động ở vùng GHz: (a) dạng ba chiều, (b) hình chiếu mặt ngang và (c) hình chiếu mặt trên.	15
<i>Hình 1.10.</i>	(a) Sơ đồ khối của cấu hình MA thực nghiệm tích hợp cơ cấu truyền động. Mũi tên thể hiện quá trình điều khiển. (b) Hình ảnh phóng đại của MA và các bộ phận của cơ cấu truyền động: (1) Lớp cấu trúc cộng hưởng của vật liệu biến hóa ở mặt trước, (2) Lớp kim loại liên tục ở mặt sau, (3) Bộ truyền động, (4) Bảng mạch điều khiển.	15
<i>Hình 1.11.</i>	(a) Hệ số phản xạ đo đạc của MA ở các giá trị độ dày khác nhau của lớp không khí. (b) Sự phụ thuộc của tần số cộng hưởng vào độ dày lớp không khí của MA. (c) Cấu hình đo đạc mẫu MA.	16
<i>Hình 1.12.</i>	Cấu hình thực nghiệm: (a) Mô hình cấu trúc MA. Mặt kim loại vàng phản xạ được gắn trên một bộ áp điện để điều khiển khoảng cách giữa tấm vàng và lớp cấu trúc SRR sắp xếp tuần hoàn. b) Hình ảnh kính hiển vi quang học lớp cấu trúc SRRs tuần hoàn làm từ vàng trên đế thạch anh. c) Thiết lập phép đo tín hiệu phản xạ ở	18

tần số THz trong miền thời gian và phép đo giao thoa ánh sáng trắng để xác định độ dày khoang.

- Hình 1.13.* Phổ phản xạ ở vùng THz cho các giá trị khác nhau của kích thước khoang. (a, b) Kết quả đo đặc ở hai lần đo khác nhau và (c) kết quả mô phỏng. (d-f) Các giá trị tần số cộng hưởng được chuẩn hóa theo tần số hấp thụ hoàn hảo f_0 (d), giá trị cực tiểu của phổ phản xạ trên (e) thang tuyến tính và (f) thang dB, thay đổi theo độ dày khoang. Dữ liệu được hiển thị cho hai lần đo thực nghiệm (dấu chéo, dấu chấm) và dữ liệu mô phỏng (đường liền). 19
- Hình 1.14.* (a) Mô hình thiết kế ô cơ sở của MA. (b) Ảnh mặt trên và các tham số cấu trúc của ô cơ sở. (c) Mô hình và (d) ảnh mẫu thực tế của MA điều khiển bằng điện áp ngoài. 21
- Hình 1.15.* Giản đồ mạch điện tương đương của diode. 21
- Hình 1.16.* Các bước cơ bản chế tạo mẫu MA: (a) phun xạ lớp ITO layer, (b) ăn mòn cấu trúc bằng laser và (c) hàn các diode trên bề mặt. (d) Bố trí hệ đo sử dụng máy phân tích mạng. 22
- Hình 1.17.* Phổ hấp thụ (a) đo đặc và (b) nội suy dựa trên các kết quả thực nghiệm ở các giá trị điện áp ngoài khác nhau. So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm của (c) tần số và (d) cường độ đỉnh hấp thụ thay đổi theo điện áp đặt vào. 23
- Hình 1.18.* (a) Mô hình cấu trúc ô cơ sở và kích thước của MA. (b) Mặt cắt ngang của MA. (c) Sơ đồ minh họa MA điều khiển bằng điện áp ngoài ở vùng THz. (d) Mẫu vật liệu được chế tạo với hình ảnh quang học được phóng to hiển thị cấu trúc của MA. 24
- Hình 1.19.* Kết quả thực nghiệm điều khiển tính chất của MA ở tần số xung quanh 0,2 THz. (a, b) Sự biến đổi của phổ phản xạ dưới điện áp phân cực khác nhau, phân cực của điện áp trong (b) bị đảo ngược so với trường hợp (a). Ảnh hưởng của giá trị điện áp lên (c) biên độ cộng hưởng ($\pm 0,3$ dB), (d) tần số cộng hưởng ($\pm 2 \times 10^{-4}$ THz), (e) Độ bán rộng FWHM của phổ ($\pm 3 \times 10^{-4}$ THz) và (f) hệ số phẩm chất Q ($\pm 0,5$). 25
- Hình 1.20.* Kết quả mô phỏng phổ phản xạ của MA khi thay đổi độ dẫn của graphene từ 40 đến 250 mS. 26
- Hình 1.21.* (a) Mô hình cấu trúc của MA sử dụng vật liệu từ được đề xuất. (b) 27

Phổ phản xạ và phổ hấp thụ của MA với $H_0 = 2600$ Oe.

- Hình 1.22.* (a) Mẫu chế tạo MA và nam châm điện. Phổ hấp thụ (b) đo đạc và (c) mô phỏng dưới các từ trường khác nhau. 28
- Hình 1.23.* Mô hình cấu trúc MA dải rộng sử dụng ferrite. 29
- Hình 1.24.* (a) MA dải rộng được chế tạo và hệ thống thử nghiệm nam châm điện. (b) Phổ hấp thụ đo đạc trong các từ trường đặt vào khác nhau. 29
- Hình 1.25.* (a) Thiết kế MA có cấu trúc kim loại/điện môi/kim loại và (b) mô hình mạch điện tương đương: Z_0 là trở kháng của không khí, Z_{in} là trở kháng của mạch điện, R, L, C tương ứng là điện trở, cảm kháng và điện dung của lớp mặt trên, Z_d là trở kháng của điện môi với tấm đồng đằng sau. 30
- 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. 30
- Hình 1.27.* Mẫu vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ điều khiển bằng nhiệt độ (TSMA) (ảnh trên-trái), TSMA với đế gia nhiệt (ảnh trên-phải), và ảnh cấu hình đo đạc của TSMA. 31
- Hình 1.28.* Phổ phản xạ mô phỏng và đo đạc của TSMA. 31
- Hình 1.29.* a) Hình ảnh ba chiều của các ô đơn vị. Ở đây, các lớp kim loại là phần màu vàng, lớp SU-8 là phần màu xám và lớp VO₂ là phần màu xanh lục. (b) Mặt cắt ngang xoz của ô đơn vị được đề. (c) Ảnh SEM của mẫu. 32
- Hình 1.30.* (a) Phổ hấp thụ đo được trong quá trình gia nhiệt. (b) Sơ đồ nguyên lý của thực nghiệm. 33
- Hình 1.31.* (a) Hình minh họa của MA có thể điều khiển bằng quang học được chiếu sáng bởi chùm tia 800 nm và (b) ô đơn vị của MA (mặt trên và mặt cắt). 34
- Hình 1.32.* Hình ảnh MA được chế tạo. (a) Hình ảnh hiển vi của MA; (b) ảnh phóng đại một ô cơ sở eSRR, $l_i = 54$ μm , $l = 50$ μm , $w = 4$ μm , $g = 4$ μm , $P = 57$ μm và (c) MA được bọc trong lọ nhựa. 35
- Hình 1.33.* Phổ hấp thụ đo đạc ở các công suất chiếu sáng khác nhau. 36
- Hình 1.34.* Mô phỏng phổ hấp thụ với độ dẫn khác nhau của GaAs. 36

- Hình 1.35.* (a) Mẫu cảm biến lực dựa trên MA được chế tạo. (b) Mô hình đo đạc. Kết quả đo đạc sự biến đổi của tần số hấp thụ theo (c) lực nén và (d) độ nén. (e) Phổ phản xạ đo đạc theo các chu kỳ lặp lại của cảm biến áp lực. 38
- Hình 1.36.* (a) Mẫu chế tạo MA điều khiển bằng điện áp và (b) cấu hình đo đạc. Phổ hấp thụ sóng điện từ (c) mô phỏng và (d) thực nghiệm với các điện áp phân cực khác nhau. 39
- Hình 1.37.* (a) Phân bố nhiệt độ của các khu vực mục tiêu; (b) Chiến lược kiểm soát điện áp ở các giai đoạn khác nhau; (c) Tốc độ gia nhiệt trung bình của các khu vực mục tiêu ở trạng thái bật và tắt; (d) Hình ảnh nhiệt của vật liệu carbon ở cuối mỗi giai đoạn và kết quả mô phỏng mật độ tổn hao thể tích tương ứng. 40
- Hình 1.38.* Hiển thị ảnh nhiệt của các chữ số. 41
- Hình 2.1.* (a) Mô hình mạch tương đương và (b) hình dạng của cấu trúc cộng hưởng SRR. 43
- 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. 45
- Hình 2.3.* Mô hình cấu trúc của MA đề xuất hoạt động ở vùng tần số GHz. 46
- Hình 2.4.* Phổ hấp thụ của MA đề xuất. 47
- Hình 2.5.* Trở kháng hiệu dụng của MA. 47
- Hình 2.6.* (Trái) Mô hình cấu trúc MA ba lớp kim loại - điện môi - kim loại. 48
(Phải) Mô hình mạch tương đương dựa trên lý thuyết TL.
- Hình 2.7.* Giao diện phần mềm mô phỏng CST Microwave. 49
- Hình 2.8.* Minh họa việc lựa chọn loại vật liệu dùng trong thiết kế cấu trúc vật liệu cần nghiên cứu. 50
- Hình 2.9.* Minh họa thiết kế cấu trúc hình học của vật liệu cần nghiên cứu. 50
- Hình 2.10.* Minh họa chọn điều kiện biên trong mô phỏng vật liệu. 51
- Hình 2.11.* Minh họa kết quả mô phỏng các tham số tán xạ điện từ của vật liệu được thiết kế. 51
- Hình 2.12.* Giao diện tính toán độ hấp thụ của phần mềm CST và kết quả mô 52

- phông phổ hấp thụ của vật liệu.
- Hình 2.13.* Mô phỏng phân bố dòng điện trên bề mặt vật liệu tại tần số cộng hưởng. 53
- Hình 2.14.* Mô phỏng phân bố tổn hao năng lượng bên trong vật liệu tại tần số cộng hưởng. 53
- Hình 2.15.* Hệ thiết bị chế tạo MM đặt tại Viện Khoa học vật liệu. 54
- Hình 2.16.* Các bước cơ bản để chế tạo MM hoạt động ở vùng tần số GHz sử dụng phương pháp quang khắc. 55
- Hình 2.17.* Ảnh MM được chế tạo bằng phương pháp quang khắc. 56
- Hình 2.18.* Ảnh hệ thiết bị phân tích mạng Rohde&Schwarz ZNB20 Vector Network Analyzer chuyên dùng để đo đặc tính chất điện từ của vật liệu dưới sự tương tác của sóng điện từ lan truyền trong không khí. 57
- Hình 3.1.* Thiết kế của MA nhiều 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. 61
- Hình 3.2.* (a) Sơ đồ của MA nhiều lớp có thể cấu hình lại được đặt trên ổ đỡ bàn xoay và hình ảnh của nguyên mẫu (b) khi quay, (c) sau khi quay ở cấu hình CRC và (d) sau khi quay ở cấu hình MRC. 62
- Hình 3.3.* (a) Phổ hấp thụ mô phỏng của MA ứng với hai cấu hình MRC và CRC khi sóng điện từ tới phân cực ở chế độ TE và TM. Kết quả tính toán (b) phần thực và (c) phần ảo của trở kháng MA. 63
- Hình 3.4.* Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của loại vật liệu cấu thành cấu trúc vòng cộng hưởng lên tính chất hấp thụ của MA ở cấu hình CRC khi sóng điện từ tới phân cực ở chế độ TE. 64
- Hình 3.5.* Kết quả mô phỏng dòng điện cảm ứng trên các lớp của MA ở cấu hình CRC khi sóng điện từ phân cực ở chế độ TE. 65
- Hình 3.6.* Kết quả mô phỏng sự biến đổi của phổ hấp thụ ở cấu hình CRC khi các cấu trúc cộng hưởng được nối tắt: (a) các vòng trung tâm được nối tắt, (b) các vòng ở cạnh dọc được nối tắt và (c) các vòng ở cạnh ngang được nối tắt. 66

<i>Hình 3.7.</i>	Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của phổ hấp thụ ở cấu hình CRC vào góc phân cực của sóng điện từ.	68
<i>Hình 3.8.</i>	Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của phổ hấp thụ ở cấu hình CRC vào góc tới của sóng điện từ ở chế độ TE và TM.	68
<i>Hình 3.9.</i>	Phổ hấp thụ được mô phỏng và đo đạc ở cấu hình CRC và MRC ở chế độ (trái) TE và (phải) TM.	69
<i>Hình 3.10.</i>	Minh họa về hai chế độ: hấp thụ và phản xạ bằng cách sử dụng MM trên origami.	70
<i>Hình 3.11.</i>	(a-b) Sơ đồ của ô cơ sở được thiết kế với các tham số cấu trúc và (c) mạch tương đương TL tương ứng.	71
<i>Hình 3.12.</i>	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.	73
<i>Hình 3.13.</i>	Phân bố dòng điện mô phỏng ở chế độ I ở 5,8 GHz và 15,1 GHz.	74
<i>Hình 3.14.</i>	Kết quả mô phỏng đặc tính hấp thụ theo các giá trị khác nhau của (a) độ dẫn của mực σ và (b) độ dài 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 dài h .	75
<i>Hình 3.15.</i>	Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của phổ hấp thụ (chế độ I) vào góc gập β trong chế độ (a) điện trường ngang (TE) và (b) từ trường ngang (TM).	77
<i>Hình 3.16.</i>	Phổ hấp thụ mô phỏng (chế độ I) dưới các (a) góc phân cực khác nhau và (b, c) các góc tới khác nhau tại chế độ TE và TM, tương ứng.	78
<i>Hình 3.17.</i>	Mô hình thiết kế MA ở vùng THz.	80
<i>Hình 3.18.</i>	Phổ hấp thụ mô phỏng của MA khi thay đổi độ dày lớp điện môi.	82
<i>Hình 3.19.</i>	Phổ hấp thụ mô phỏng của MA khi chỉ có (a) cấu trúc SP và (b) SRR với $t_d = 10 \mu\text{m}$.	83
<i>Hình 3.20.</i>	Mô phỏng phân bố mật độ dòng điện tại tần số cộng hưởng 0,76 THz.	84

- Hình 3.21.* Mô phỏng phân bố mật độ dòng điện tại tần số cộng hưởng 0,91 THz. 84
- Hình 3.22.* Mô phỏng phân bố mật độ dòng điện tại tần số cộng hưởng 0,94 THz. 84
- Hình 3.23.* (a) Vật liệu hấp thụ 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. 85
- Hình 3.24.* Phổ hấp thụ mô phỏng của mẫu MA 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. 86
- Hình 4.1.* (a) Sơ đồ cấu trúc ô đơn vị BMM được đề xuất. (b) Ảnh mặt trên của ô đơn vị với tham số cấu trúc: $L = 24,5$, $R_1 = 10$, $R_2 = 5,8$, $s = 1$, $d = 8,5$, $g = 0,5$, $h = 0,5$, $t = 2$, $t_m = 0,035 \text{ mm}$. (c) Mẫu BMM được chế tạo có tích hợp với các tụ điện và diode và (d) cấu hình phép đo phổ hấp thụ sử dụng máy phân tích mạng ZNB20. 90
- Hình 4.2.* (a) Các hệ số phản xạ đồng trục và phản xạ vuông góc được mô phỏng và (b) độ hấp thụ mô phỏng của BMM ở điện áp phân cực 0 V. Kết quả đo đạc tại 0 V của (c) các hệ số phản xạ và (d) độ hấp thụ tương ứng. 91
- 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 BMM ở điện áp phân cực -19 V. Kết quả đo đạc tại -19 V của (c) các hệ số phản xạ và (d) hệ số PCR tương ứng. 92
- Hình 4.4.* Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt tại lớp đồng (a) trên cùng và (b) dưới cùng ở tần số cộng hưởng 3,84 GHz ở 0 V. 93
- Hình 4.5.* Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt tại các lớp đồng (trái) trên cùng và (phải) dưới cùng ở tần số cộng hưởng là (a)-(b) 4,59 GHz và (c)-(d) 4,86 GHz ở -19 V. 94
- Hình 4.6.* (a) Ô đơn vị của BMM được nối tắt với các thanh kim loại đồng giữa hai lớp đồng trước và sau. Kết quả mô phỏng phổ phản xạ đồng trục và vuông góc của BMM được nối tắt ở điện áp phân cực (b) -19 V và (c) 0 V. 96

- Hình 4.7.* (a) Sơ đồ trực quan của điện trường phân tách theo hướng u và v . 97
 (b) Cường độ của các hệ số phản xạ theo hướng u và v . Các pha của (c) phổ phản xạ đồng trục và phổ phản xạ vuông góc và (d) độ lệch giữa hai pha theo hướng u và v .
- Hình 4.8.* Cấu trúc ô cơ sở của MA (a) băng tần đơn và (b) băng tần kép. 98
- Hình 4.9.* Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của phổ hấp thụ MA đơn băng tần vào điện áp ngoài. 100
- Hình 4.10.* Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt trên MA ở tần số hấp thụ 4,7 GHz tương ứng với điện áp đặt vào là 0V. 101
- Hình 4.11.* Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt trên MA ở tần số hấp thụ 6,4 GHz tương ứng với điện áp đặt vào là 19 V. 101
- Hình 4.12.* Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của phổ hấp thụ MA dải kép vào điện áp ngoài. 102
- Hình 4.13.* Mô phỏng 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. 104
- Hình 4.14.* Mô phỏng 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 0V. 104
- Hình 4.15.* Mô phỏng 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 -19V. 105
- Hình 4.16.* Mô phỏng 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 -19V. 105

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Sự phát triển và khám phá vật liệu biến hóa (metamaterial - MM), một loại vật liệu mang tính cách mạng với các đặc tính phi thường, có một lịch sử phong phú kéo dài vài thập kỷ. Nguồn gốc của MM có thể bắt nguồn từ những cột mốc quan trọng mà các nhà khoa học và kỹ sư tiên phong đạt được trong các thế kỷ trước. Năm 1898, Jagadis Chunder Bose đã có một đóng góp mang tính đột phá khi đề xuất một trong những vật liệu nhân tạo đầu tiên sử dụng các thành phần bất đối xứng phản chiếu (chiral) [1]. Dựa trên công trình này, vào năm 1914, Karl F. Lindman đã có những tiến bộ hơn nữa bằng cách giới thiệu môi trường có tính bất đối xứng phản chiếu bao gồm nhiều vòng xoắn dây được sắp xếp ngẫu nhiên trong một môi trường chủ [2]. Những thí nghiệm ban đầu này đã đặt nền móng cho việc điều khiển sóng điện từ thông qua các vật liệu có cấu trúc được thiết kế đặc biệt.

Tiếp đến những năm 1948, Winston E. Kock đã đạt được những bước tiến đáng chú ý trong lĩnh vực này bằng cách phát triển thấu kính vi sóng. Ông đã tạo ra bằng cách chèn các dải kim loại, dây và đĩa một cách hợp lý vào môi trường chủ, cho phép kiểm soát chính xác giá trị chiết suất của môi trường nhân tạo [3]. Thấu kính nhân tạo này đã mở ra những khả năng mới để điều khiển và tập trung sóng điện từ.

Nhiều năm sau, mãi đến năm 1968, khái niệm về MM mới bắt đầu thực sự được biết đến. Khi đó, Victor Veselago đưa ra một suy đoán lý thuyết rằng các vật liệu có đồng thời độ điện thẩm và độ từ thẩm âm có thể biểu hiện các hiện tượng quang học dị thường khi sóng điện từ hoặc ánh sáng truyền qua chúng [4]. Cái nhìn sâu sắc mang tính đột phá này đã mở đường cho việc khám phá các vật liệu có chiết suất âm, thách thức các quan niệm truyền thống về điện từ và quang học.

Tuy nhiên, nghiên cứu của Veselago vào thời điểm đó nhận được nhiều sự hoài nghi do không có bất kỳ vật liệu có chiết suất âm nào tồn tại trong tự nhiên. Đến những năm 1996 và 1999, nhóm nghiên cứu của nhà khoa học người Anh, John Pendry, lần lượt đề ra các mô hình vật liệu nhân tạo có các đặc trưng như độ điện thẩm âm và độ từ thẩm âm [5, 6]. Các mô hình vật liệu này có thể được tối ưu để hoạt động trên cùng một dải tần số, mở ra khả năng hiện thực hóa các vật liệu có chiết suất âm và những con đường mới để điều khiển sóng điện từ với khả năng kiểm soát chưa từng có.

Ngay sau đó, vào năm 2000, Giáo sư David R. Smith và nhóm nghiên cứu của ông tại Đại học Duke đã chứng minh bằng thực nghiệm về MM có chiết suất âm ở tần số vi sóng [7,8]. Công trình của Smith đã xác nhận những dự đoán mô hình lý thuyết của Pendry và ghi dấu mốc đặc biệt trong lĩnh vực này. Nhóm của Smith đã đạt được chiết suất âm bằng cách thiết kế MM bao gồm một loạt các lưới dây kim loại và cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh (split-ring resonator - SRR). MM này tương tác với sóng điện từ theo cách khiến sóng bị khúc xạ ngược khi đi qua MM, với tia khúc xạ nằm ở bên kia mặt phẳng pháp tuyến so với những gì được quan sát thấy trong các vật liệu có chiết suất dương thông thường. Kết quả thử nghiệm thành công của nhóm của Smith đã mở ra một lĩnh vực mới về khả năng tùy biến các đặc điểm của ánh sáng và sóng điện từ, cũng như mở đường cho nhiều ứng dụng khác nhau, chẳng hạn như chụp ảnh siêu phân giải và các thiết bị che giấu.

Cơ sở lý thuyết của Veselago, mô hình đề xuất của Pendry và kiểm chứng thực nghiệm của Smith liên quan đến vật liệu chiết suất âm đã ghi dấu quan trọng trong nghiên cứu các vật liệu có cấu trúc nhân tạo, mà đã được phát triển mạnh mẽ về sau này thành một hướng nghiên cứu vật liệu mới với tên gọi là MM. Theo thời gian, khi các kỹ thuật và công nghệ chế tạo tiếp tục phát triển, kích thước của các cấu trúc nhân tạo được giảm xuống. Việc thu nhỏ các thành phần MM này cho phép thiết kế linh hoạt hơn và cho phép tạo ra các MM với các đặc tính phù hợp trên một loạt các dải tần số hoạt động khác nhau, từ MHz [9-11], GHz [12-14] cho đến THz [15-17], quang học [18-20].

Tiến bộ không ngừng trong nghiên cứu MM hứa hẹn sẽ tạo ra các ứng dụng tiên tiến trong các lĩnh vực khác nhau, bao gồm quang học, viễn thông, cảm biến và khai thác năng lượng. Với mỗi tiến bộ, các nhà khoa học càng nghiên cứu sâu hơn và tìm thấy nhiều hơn sự hấp dẫn của MM, cũng như tiềm năng to lớn của chúng có thể giúp vượt qua nhiều rào cản, giới hạn đang tồn tại trong các vật liệu thông thường.

Trong các hướng nghiên cứu chính về MM, vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ (metamaterial absorber - MA) đóng vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực khoa học và công nghệ. Các MA có thể được thiết kế cấu trúc một cách linh hoạt, nhờ đó các vật liệu này có khả năng tương tác và hấp thụ sóng điện từ ở các dải tần số đa dạng khác nhau, từ vùng vi sóng, THz, hồng ngoại, đến khả kiến. MA đầu tiên được

đề xuất và kiểm chứng bởi Landy và các cộng sự vào năm 2008 cho thấy những đặc trưng ưu việt như độ hấp thụ lớn với kích thước nhỏ gọn so với bước sóng hoạt động [21]. Kể từ đó đến nay, sự phát triển của MA đã thu hút được sự chú ý đáng kể do các ứng dụng tiềm năng của chúng trong các lĩnh vực khác nhau như năng lượng [22,23], công nghệ tàng hình [24,25], cảm biến [26,27] và hệ thống liên lạc [28,29]. Bằng cách điều chỉnh thiết kế và các tham số cấu trúc của MA, các nhà nghiên cứu đã có thể tạo ra được các MA với hiệu suất hấp thụ cao [30,31], băng thông rộng [32,33] và không phụ thuộc với sự phân cực của sóng điện từ tới [34,35].

Mặc dù các MA truyền thống cung cấp các khả năng độc đáo, chúng lại thường được thiết kế để hoạt động tại một dải tần số cụ thể hoặc với độ hấp thụ cố định. Hạn chế này cản trở khả năng thích ứng và tính linh hoạt của chúng trong các môi trường hoặc ứng dụng đòi hỏi sự thay đổi linh hoạt về tần số hoặc cường độ hấp thụ. Trong bối cảnh đó, các MA có thể điều khiển hoặc cấu hình lại sau quá trình chế tạo sẽ cung cấp khả năng chủ động kiểm soát các đặc tính hấp thụ của chúng, cho phép điều chỉnh tần số hấp thụ hoặc băng thông cũng như độ hấp thụ theo thời gian thực. Khả năng điều chỉnh này sẽ giúp tiết kiệm chi phí và tăng hiệu suất hoạt động thay vì sử dụng nhiều MA thụ động độc lập với nhau. Hơn nữa, việc nghiên cứu các MA có thể điều chỉnh hoặc có thể cấu hình lại bắt nguồn từ nhu cầu ngày càng tăng đối với các thiết bị điện tử đa chức năng và có thể thích ứng linh hoạt. Trong các ứng dụng như hệ thống liên lạc, hệ thống radar hoặc thiết bị hình ảnh, khả năng điều chỉnh chủ động các đặc tính hấp thụ của MA càng trở nên quan trọng. Ví dụ, trong công nghệ ngụy trang, tàng hình hoặc che chắn sóng điện từ, các MA này có thể cung cấp khả năng kiểm soát chủ động đối với sự phản xạ và hấp thụ sóng điện từ tới, nhờ đó cho phép che giấu hoặc điều khiển tín hiệu một cách hiệu quả và thích ứng theo các dải tần số khác nhau.

Nhìn chung, việc nghiên cứu các MA có thể điều khiển được hoặc cấu hình lại được sau quá trình chế tạo là cấp thiết nhằm khắc phục những hạn chế của các MA thụ động truyền thống, cung cấp khả năng thích ứng, tính linh hoạt và hiệu suất nâng cao trong nhiều ứng dụng yêu cầu sự kiểm soát chủ động các đặc trưng hấp thụ sóng điện từ... Xuất phát từ thực tế đó, nghiên cứu sinh đã lựa chọn 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”. Luận án hướng đến việc nghiên cứu điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa bằng các tác động ngoại vi cơ học và điện áp. Luận án lựa chọn của nghiên cứu sinh có nhiều điểm mới và sự khác biệt so với các luận án trước đây tại Việt Nam về lĩnh vực vật liệu biến hóa. Các luận án trước đây đã nghiên cứu các đối tượng như vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm, vật liệu biến hóa có chiết suất âm và vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ hoạt động ở vùng tần số GHz hoặc THz [36-41]. Các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào các yếu tố như cấu trúc, ảnh hưởng của các thông số hình học của cấu trúc và vật liệu cấu thành lên tính chất và dải tần làm việc của vật liệu biến hóa. Về cơ bản, các vật liệu biến hóa đã được nghiên cứu trong các luận án trước đây đều là vật liệu dạng bị động, tức là tính chất điện từ của vật liệu bị cố định, không thể thay đổi sau khi được chế tạo. Trong khi đó, luận án của nghiên cứu sinh tập trung vào việc nghiên cứu điều khiển một cách chủ động các đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa thông qua tác động ngoại vi là cơ học và điện áp. Điều này có ý nghĩa lớn trong việc mở rộng tiềm năng ứng dụng vật liệu biến hóa trong thiết bị và linh kiện điện tử, cung cấp khả năng điều khiển chủ động và linh hoạt sóng điện từ.

2. Mục đích nghiên cứu

Thiết kế và chế tạo các vật liệu biến hoá có khả năng điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ bằng các tác động ngoại vi cơ học và điện áp.

Làm rõ cơ chế hấp thụ và sự biến đổi tính chất hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa dưới tác động ngoại vi.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Các vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ bao gồm:

- Vật liệu biến hóa có khả năng điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ bằng tác động ngoại vi cơ học.

- Vật liệu biến hóa có khả năng điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ bằng điện áp ngoài.

4. Phương pháp nghiên cứu

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 phổ phản xạ, truyền qua và hấp thụ của vật liệu sẽ

được mô phỏng bằng phần mềm mô phỏng chuyên dụng và được so sánh với các kết quả tính toán. Sau đó, dựa trên các kết quả lý thuyết, mẫu vật liệu biến hóa sẽ được chế tạo dựa trên phương pháp quang khắc. Cuối cùng, tính chất điện từ của vật liệu biến hóa sẽ được đo đạc và kiểm chứng bởi máy phân tích mạng véctor.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Ý nghĩa khoa học:

- Góp phần xây dựng các mô hình cấu trúc vật liệu biến hóa đơn giản có khả năng điều khiển được bằng tác động ngoại vi cơ học và điện áp.
- Làm rõ cơ chế hoạt động của các vật liệu biến hóa điều khiển bằng tác động ngoại vi cơ học và điện áp.
- Làm sáng tỏ sự phụ thuộc của cấu trúc và vật liệu cấu thành vào tính chất và khả năng hoạt động của vật liệu biến hóa được đề xuất.

Ý nghĩa thực tiễn:

Kết quả nghiên cứu của luận án là tiền đề quan trọng để tiến gần hơn đến khả năng ứng dụng vật liệu biến hóa trong các thiết bị điện tử thông minh tiên tiến.

6. Những điểm mới của luận án

- Luận án đã thiết kế và chế tạo thành công các cấu trúc vật liệu biến hóa 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.
- Luận án 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 vật liệu biến hóa 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 vật liệu biến hóa 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.
- Luận án đã phân tích và giải thích cơ chế hoạt động của các vật liệu biến hóa điều khiển bằng điện áp ngoài.

Bố cục của luận án

Luận án có **124** trang, bao gồm phần mở đầu, 4 chương nội dung và kết luận. Cụ thể như sau:

Mở đầu

Chương 1. Tổng quan về vật liệu biến hóa điều khiển bằng tác động ngoại vi

Giới thiệu tổng quan về vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ, nguyên lý điều khiển bằng tác động ngoại vi và một số tiềm năng ứng dụng.

Chương 2. Phương pháp nghiên cứu

Trình bày các phương pháp nghiên cứu tính toán, mô phỏng, chế tạo và đo đạc được lựa chọn trong luận án để thực hiện nghiên cứu điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa.

Chương 3. Điều khiển đặc tính hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hoá bằng tác động cơ học

Trình bày các kết quả nghiên cứu đạt được liên quan đến điều khiển đặc tính hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hoá bằng tác động cơ học như tác động xoay, kéo-gấp và uốn cong.

Chương 4. Điều khiển đặc tính hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hoá bằng điện áp ngoài

Trình bày các kết quả nghiên cứu chính của luận án liên quan đến điều khiển đặc tính hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hoá bằng điện áp ngoài, bao gồm chuyển đổi đa chức năng và điều khiển tần số hấp thụ.

Kết luận

Luận án này được thực hiện và sử dụng trang thiết bị chủ yếu tại Viện Khoa học vật liệu.

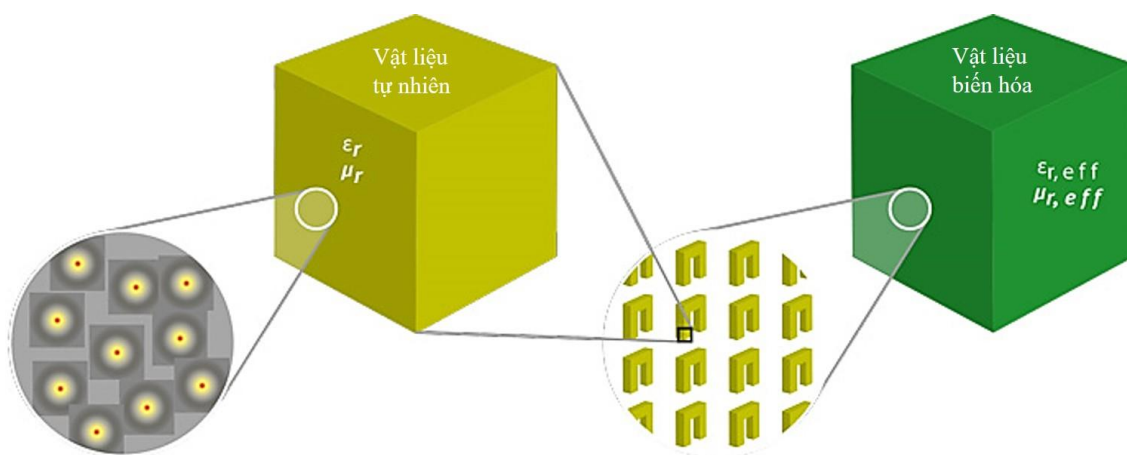
Kết quả chính của luận án được công bố trên 03 bài báo quốc tế thuộc tạp chí SCIE, 01 bài báo trên tạp chí khoa học chuyên ngành trong nước và 01 bài báo thuộc kỷ yếu hội nghị quốc tế.

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

Hằng số điện môi ϵ và độ thấm μ là các đại lượng đặc trưng cơ bản quyết định đáp ứng của vật liệu và sóng điện từ. ϵ và μ của các vật liệu tự nhiên không đồng thời nhỏ hơn 0. Lần đầu tiên được Veselago giới thiệu về mặt lý thuyết vào năm 1968, một vật liệu có đồng thời ϵ và μ âm sở hữu nhiều tính năng mới, chẳng hạn như khúc xạ âm, truyền sóng ngược, dịch chuyển Doppler ngược và Bức xạ Cerenkov ngược [4]. John Pendry đã đề xuất một cách sáng tạo các mô hình lưới dây dẫn mỏng có hằng số điện môi hiệu dụng âm và cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh (split-ring resonator - SRR) có độ từ thấm hiệu dụng âm lần lượt vào năm 1996 và 1999 [5,6]. Ngay sau đó, David Smith đã chứng minh một môi trường tổng hợp, dựa trên một dãy tuần hoàn của các SRR và lưới dây liên tục, có đồng thời độ từ thấm và điện thẩm âm hiệu dụng, cũng như xác nhận sự khúc xạ âm của vật liệu bằng thực nghiệm [7, 8]. Các nghiên cứu trên là các nghiên cứu bản lẻ và đã mở ra một hướng nghiên cứu mới trong lĩnh vực khoa học vật liệu với đối tượng nghiên cứu thường được gọi tên là MM.

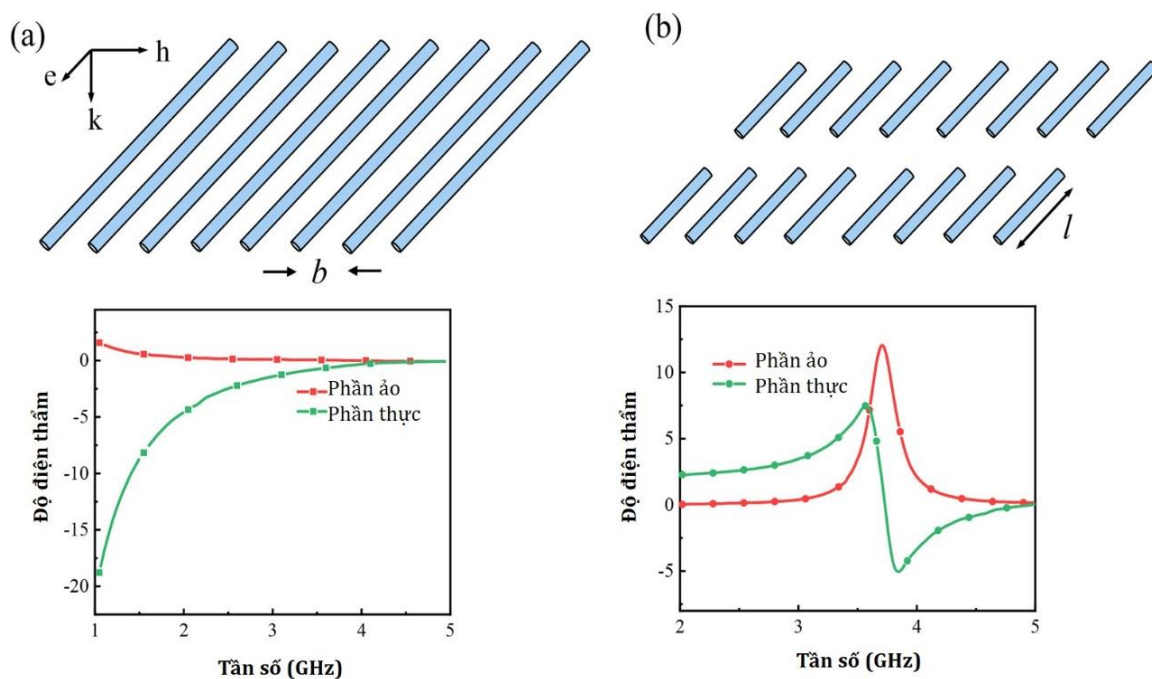


Hình 1.1. Mô hình cấu tạo của vật liệu trong tự nhiên và MM có cấu trúc nhân tạo.

Nhìn chung, tương tự như các vật liệu trong tự nhiên được cấu thành từ các nguyên tử, các vật liệu tổ hợp nhân tạo với các cấu trúc ô cơ sở có kích thước nhỏ hơn bước sóng vẫn có thể được coi là môi trường đồng nhất với các thông số điện từ

vĩ mô dựa trên lý thuyết môi trường hiệu dụng. Dựa trên nguyên lý đó, bằng cách thiết kế các nguyên tử nhân tạo hay các cấu trúc ô cơ sở, MM có thể vượt qua các giới hạn của vật liệu thông thường, mở rộng đáng kể các đặc tính vật liệu và điều chỉnh tính chất của vật liệu theo ý muốn chẳng hạn như độ từ thẩm âm [42], chiết suất âm [43], hấp thụ sóng điện từ [44], làm chậm sóng điện từ [45], ... Về cơ bản, cấu trúc ô cơ sở của MM thường được thiết kế dạng cấu trúc cộng hưởng (Hình 1.1) để thu được các đặc trưng điện từ mong muốn khác nhau.

Dạng cấu trúc cộng hưởng điện thường gặp nhất là dạng cấu trúc ăng ten cộng hưởng lưỡng cực. Vật liệu tổng hợp bởi các dây kim loại dài liên tục, song song có khả năng sinh ra các dao động plasma ở tần số rất thấp so với tần số plasma của kim loại. Hiện tượng này có thể được đặc trưng bởi sự tán sắc của giá trị điện môi hiệu dụng theo hàm Drude với độ điện thẩm âm đạt được ở các tần số thấp hơn tần số plasma (ω_p), như thể hiện trong Hình 1.2(a).

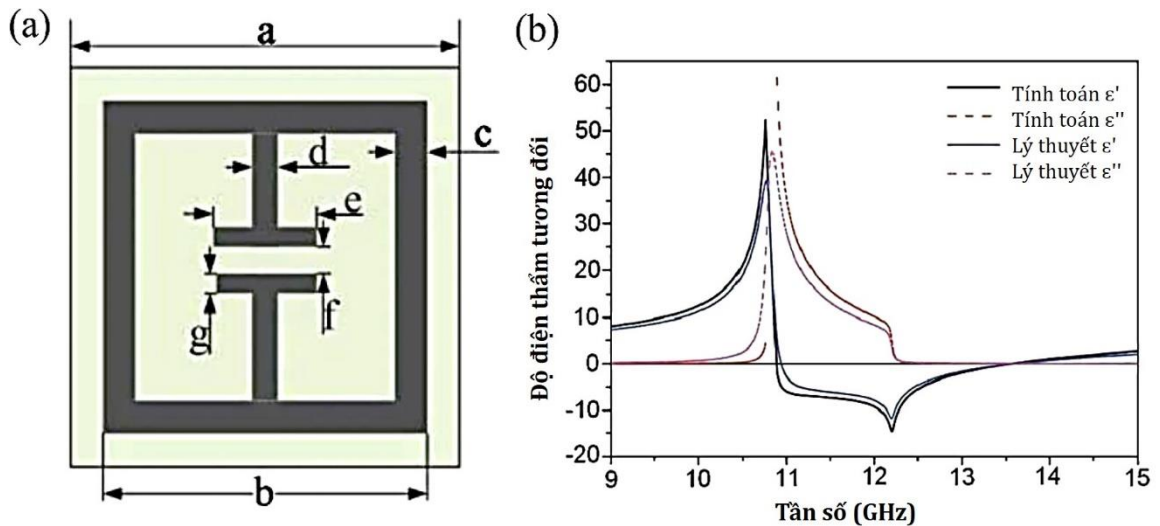


Hình 1.2. Mô hình lưới dây kim loại và phổ độ điện thẩm: (a) dài liên tục và (b) ngắn không liên tục [48].

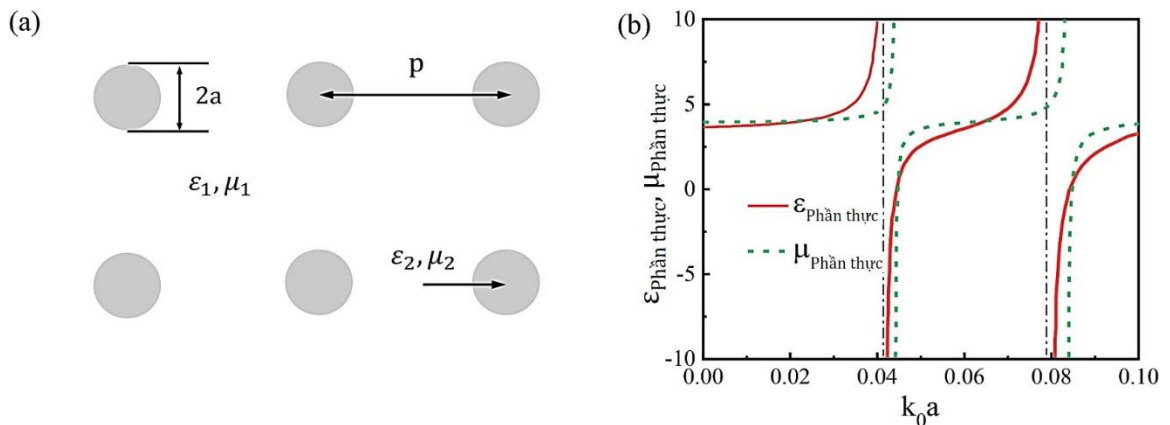
Đối với các lưới dây kim loại ngắn không liên tục, các nghiên cứu cho thấy rằng các vật liệu tổng hợp tạo bởi lưới dây ngắn tuần hoàn được đặc trưng bởi phổ tán sắc dạng cộng hưởng của độ điện thẩm hiệu dụng khi các lưới dây không liên tục này hoạt động như ăng ten lưỡng cực với tần số cộng hưởng xác định bởi: $f_R =$

$c/2l\sqrt{\epsilon_m}$, trong đó ϵ_m là độ điện thẩm của ma trận tạo bởi lưới dây [46,47]. Khi cộng hưởng đủ mạnh và điện trở suất của dây kim loại thấp, độ điện thẩm âm có thể thu được trong dải tần cao hơn tần số cộng hưởng, như thể hiện trong Hình 1.2(b). Do bản chất cộng hưởng, vùng có độ điện thẩm âm thường sẽ hẹp hơn khi so với cấu trúc lưới dây kim loại dài liên tục.

Dạng cấu trúc cộng hưởng thứ hai thường gặp là cộng hưởng LC. Thông thường, cấu trúc SRR chủ yếu được sử dụng để tạo ra độ từ thẩm âm [49]. Mặc dù vậy, một số SRR cũng được biến đổi để thu được đáp ứng cộng hưởng với điện trường và tạo ra độ điện thẩm âm, như trong Hình 1.3 [49]. Bản chất vật lý của SRR khi đó vẫn là cộng hưởng dạng LC với tần số cộng hưởng $\omega = 1/\sqrt{LC}$.



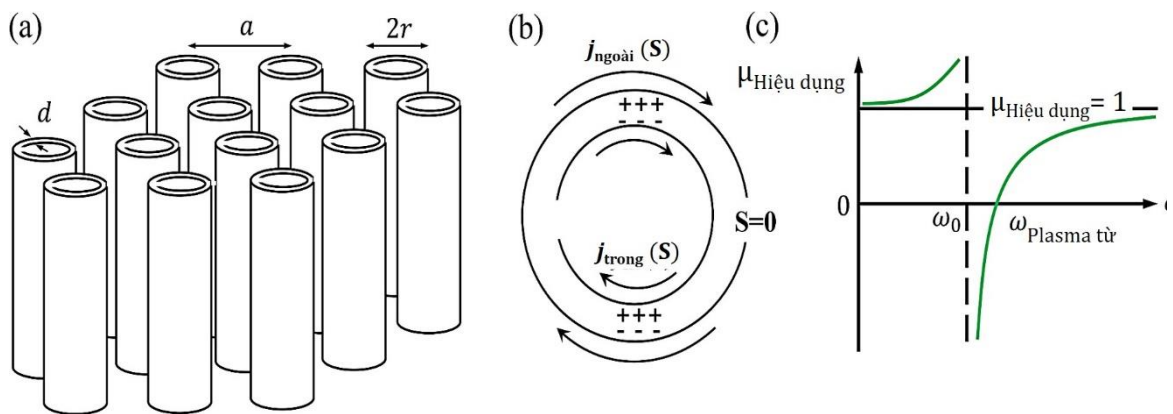
Hình 1.3. (a) Cấu trúc SRR tạo ra cộng hưởng điện. (b) Phổ giá trị phần thực và phần ảo của độ điện thẩm [49].



Hình 1.4. (a) Mô hình vật liệu tổ hợp tạo bởi các hạt điện môi dạng cầu. (b) Phổ giá trị điện thẩm và từ thẩm tương ứng [52].

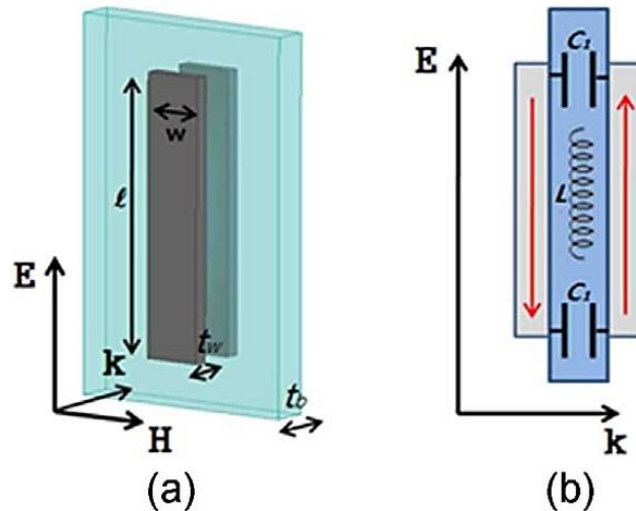
Một dạng cấu trúc cộng hưởng khác cũng được khai thác trong cấu trúc MM là cộng hưởng điện môi. Bên cạnh vật liệu kim loại, vật liệu điện môi có thể được khai thác để tạo ra hiện tượng cộng hưởng. Hiệu ứng cộng hưởng Mie của các hạt điện môi cho phép tạo ra cộng hưởng từ và điện, do đó dẫn đến độ từ thẩm và độ điện thẩm âm trong các dải tần số nhất định [50-52]. Hình 1.4 trình bày một ví dụ về cộng hưởng tạo ra bởi các hạt điện môi hình cầu được sắp xếp tuần hoàn.

Đối với cộng hưởng từ, hai dạng cấu trúc cơ bản thường gặp nhất trong các MM là cấu trúc SRR (Hình 1.5) và cấu trúc cặp dây bị cắt [cut-wire pair (CWP)] (Hình 1.6) [53]. Điểm chung giữa hai cấu trúc này nằm ở nguyên lý cộng hưởng. Từ trường ngoài tạo ra các dòng điện tròn chạy trong cấu trúc của MM, từ đó sinh ra một từ trường cảm ứng mới. Xung quanh tần số cộng hưởng LC của cấu trúc, từ trường cảm ứng của MM biến thiên mạnh và tạo ra hiện tượng cộng hưởng từ.



Hình 1.5. (a) Cấu trúc SRR. (b) Nguyên lý hoạt động. (c) Phổ giá trị của độ từ thẩm [49].

Điểm khác biệt cơ bản giữa hai cấu trúc này nằm ở sự phân cực của sóng điện từ tới để có thể cảm ứng ra dòng điện tròn. Trong cấu trúc SRR, sóng tới sẽ song song và từ trường phân cực vuông góc với bề mặt vòng cộng hưởng. Với cấu trúc CWP, sóng tới sẽ vuông góc và từ trường sẽ song song với bề mặt CWP (song song với chiều rộng của thanh CW). Do sự khác biệt này, MM sử dụng cấu trúc CWP thường có dạng đơn lớp trong khi MM sử dụng cấu trúc SRR thường có dạng đa lớp mới bao phủ được toàn bộ chùm sóng chiếu tới.

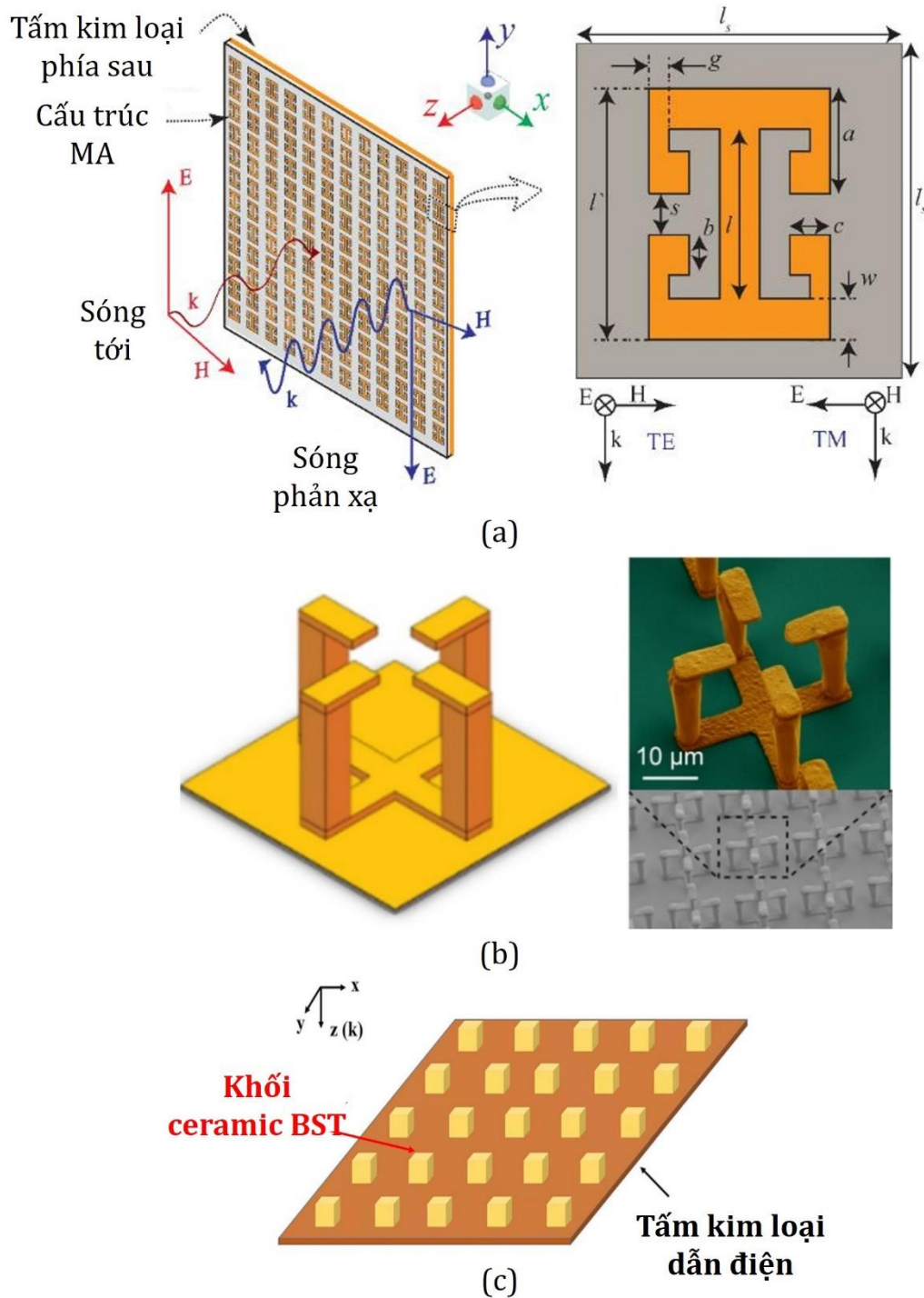


Hình 1.6. (a) Cấu trúc CWP. (b) Mô hình mạch điện tương đương [53].

Ngoài hai cấu trúc SRR, CWP và các biến thể của chúng, để tạo ra các cộng hưởng từ trong MM, các vật liệu điện môi với cộng hưởng Mie dạng từ có thể được khai thác như đã đề cập ở phần trên. Bên cạnh đó, việc tích hợp các vật liệu từ tính như ferrite cũng có thể được sử dụng để khai thác các đặc trưng cộng hưởng sắt từ của loại vật liệu này [54].

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

Một trong những cấu trúc MA đầu tiên được đề xuất bởi Landy và các cộng sự vào năm 2008 [21]. MA đề xuất đạt được đỉnh hấp thụ tại tần số 11,48 GHz với độ hấp thụ đạt đến 96% trong mô phỏng và tại tần số 11,5 GHz với độ hấp thụ xấp xỉ 88% trong thực nghiệm. Khả năng hấp thụ sóng điện từ được giải thích do hiện tượng cộng hưởng từ được cảm ứng bởi sự tương tác giữa phần trung tâm của cấu trúc vòng cộng hưởng ở mặt trước và cấu trúc dây bị cắt ở mặt sau. Đồng thời, tính chất điện cũng được điều khiển một cách phù hợp xung quanh vùng cộng hưởng từ thông qua các tham số cấu trúc của vật liệu. Nhờ đó, sự phối hợp trở kháng của MA và môi trường không khí được tạo ra. Lúc này, thành phần sóng phản xạ bị loại bỏ do sự phối hợp trở kháng, kết hợp với thành phần sóng truyền qua bị triệt tiêu thông qua hiện tượng cộng hưởng từ, dẫn đến hệ quả là năng lượng sóng điện từ tới bị hấp thụ bên trong vật liệu. Năng lượng hấp thụ sẽ được tiêu tán qua hai cơ chế là tổn hao điện môi và tổn hao Ohmic, trong đó MA ở vùng tần số GHz đề xuất bởi Landy, chủ yếu tiêu tán năng lượng thông qua tổn hao điện môi.

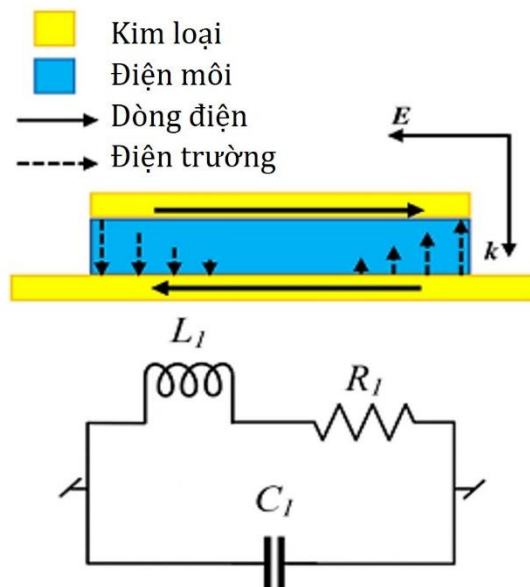


Hình 1.7. MA sử dụng cấu trúc: (a) ba lớp kim loại - điện môi - kim loại [57], (b) chỉ có kim loại [56] và (c) hai lớp kim loại điện môi [58].

Kể từ đó, nhiều cấu trúc MA khác nhau đã được mô phỏng và kiểm chứng bằng thực nghiệm ở nhiều vùng tần số khác nhau, trải dài từ MHz [54,56], GHz [57,58], sóng mm [59,60], THz [61,62], hồng ngoại [63,64] và khả kiến [65,66]. Nhìn chung, có thể phân loại thiết kế của cấu trúc MA thành một số dạng cơ bản như trên Hình 1.7:

- Cấu trúc dạng ba lớp kim loại - điện môi - kim loại
- Cấu trúc chỉ có kim loại
- Cấu trúc dạng hai lớp kim loại điện môi

Cấu trúc dạng hai lớp kim loại điện môi [Hình 1.7(b)] có tính chất chủ yếu phụ thuộc vào cấu trúc và tính chất nội tại của vật liệu điện môi. Tần số cộng hưởng của MA dạng hai lớp kim loại điện môi được quyết định bởi cộng hưởng riêng của lớp cấu trúc điện môi. Với cấu trúc chỉ có kim loại [Hình 1.7(c)], tần số cộng hưởng của MA cũng chủ yếu được quyết định bởi tần số cộng hưởng của lớp cấu trúc kim loại ở trên. Đối với hai loại cấu trúc này, tầm đồng chủ yếu đóng góp vào việc triệt tiêu thành phần truyền qua để tăng cường sự hấp thụ. Khác với hai cấu trúc trên, cộng hưởng của cấu trúc dạng ba lớp kim loại - điện môi - kim loại [Hình 1.7(a)] được đóng góp bởi cả cấu trúc kim loại ở mặt trên và tấm kim loại ở mặt dưới. Trong ba cấu trúc nêu trên, MA có thiết kế cấu trúc dạng ba lớp kim loại - điện môi - kim loại thường được sử dụng do sự đa dạng trong việc lựa chọn vật liệu cấu thành, dễ dàng trong chế tạo và linh hoạt trong thiết kế có thể phát triển thành MA đa lớp để mở rộng dải tần. Bên cạnh đó, bằng cách thay thế tấm kim loại liên tục ở mặt dưới bằng cấu trúc kim loại như ở mặt trên, MA dạng ba lớp kim loại - điện môi - kim loại cũng có thể được tối ưu để tạo ra khả năng hấp thụ hai chiều thay vì chỉ một chiều như các cấu trúc sử dụng tấm kim loại liên tục.



Hình 1.8. MA sử dụng cấu trúc kim loại - điện môi - kim loại và mô hình mạch điện tương đương [67].

Hình 1.8 trình bày mô hình thiết kế điển hình của MA sử dụng cấu trúc dạng ba lớp kim loại - điện môi - kim loại [67]. Trong đó, lớp kim loại ở dưới cùng là tấm kim loại liên tục đóng vai trò chính trong việc loại bỏ hoàn toàn thành phần truyền qua trên toàn bộ dải tần hoạt động. Lớp điện môi ở giữa đóng vai trò như một điện môi hiệu dụng giữa hai lớp kim loại ở trên và ở dưới. Lớp kim loại ở trên cùng không liên tục đóng vai trò quan trọng trong việc xác định tần số hấp thụ. Bằng cách thiết kế kích thước và hình dạng của lớp kim loại trên cùng này, cộng hưởng có thể được tạo ra ở bất kỳ tần số mong muốn nào. Cấu trúc MA có thể được mô hình hóa bằng mô hình mạch tương đương dựa trên đặc trưng cộng hưởng của vật liệu. Như trên Hình 18, MA hoạt động dựa trên hiện tượng cộng hưởng từ (hầu hết các MA dạng ba lớp kim loại - điện môi - kim loại cũng dựa trên hiện tượng cộng hưởng từ), được đặc trưng bởi dòng điện đối song giữa lớp kim loại ở mặt trên và mặt dưới. Do đó, tần số cộng hưởng của MA có thể được mô hình hóa và tính toán ước lượng thông qua mô hình mạch điện tương đương trên Hình 1.8.

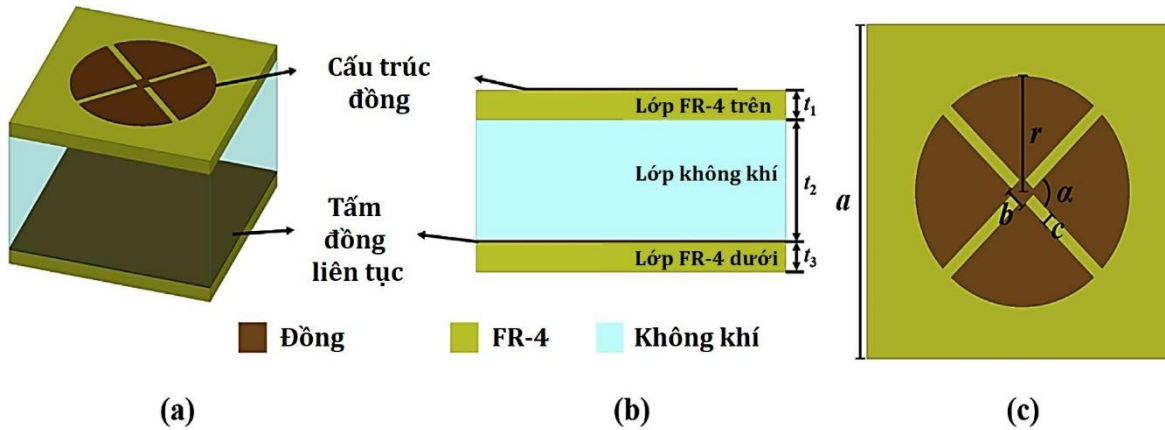
Về mặt cơ chế hoạt động, MA sử dụng cấu trúc dạng ba lớp kim loại - điện môi - kim loại cũng hoạt động dựa trên sự phối hợp trở kháng xung quanh tần số cộng hưởng từ nhằm triệt tiêu thành phần phản xạ, trong khi thành phần truyền qua bị chặn hoàn toàn do tấm kim loại liên tục ở mặt sau. Năng lượng hấp thụ sẽ được tiêu tán tại tần số cộng hưởng từ thông qua tổn hao điện môi, chủ yếu xảy ra ở tần số thấp GHz, và thông qua tổn hao Ohmic, chủ yếu xảy ra ở tần số cao THz.

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

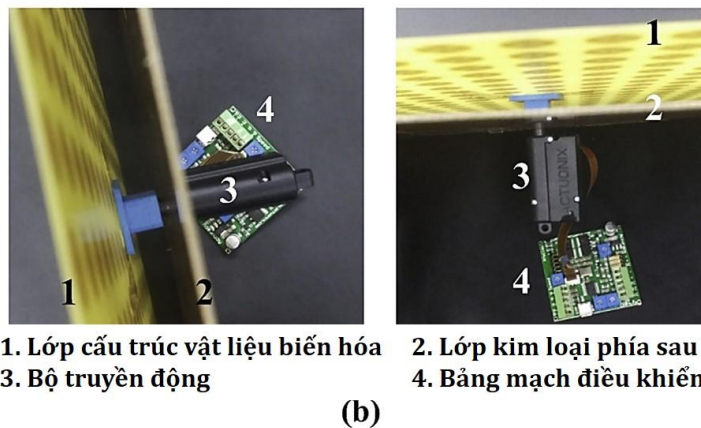
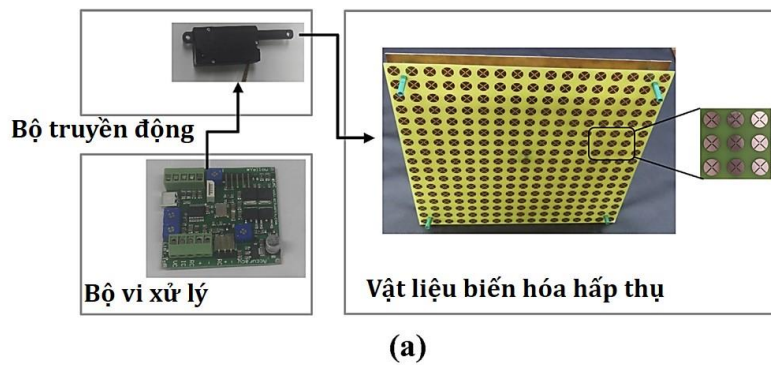
1.2.1. Điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng tác động cơ học

Như đã trình bày ở mục trước, tính chất điện từ của MM nói chung và MA nói riêng phụ thuộc vào các tham số cấu trúc, trong đó có độ dày của lớp điện môi ở giữa. Dựa vào đó, Kim và các cộng sự đã đề xuất một MA có thể điều khiển được tần số hấp thụ bằng phương pháp cơ học [68]. Phương pháp cơ học được xây dựng bằng cách tích hợp một cơ cấu truyền động vào MA. Phương pháp sử dụng cơ cấu truyền động này phù hợp để ứng dụng cho các MA có kích thước lớn hoạt động ở vùng tần số GHz. MA được thiết kế dựa trên cấu trúc kim loại/điện môi/kim loại để khai thác cộng hưởng LC như trên Hình 1.9. Ô cơ sở của cấu trúc MA được đề xuất bao gồm

lớp điện môi FR4 có độ dày cố định và lớp không khí với độ dày được kiểm soát bằng cơ học thông qua bộ truyền động.

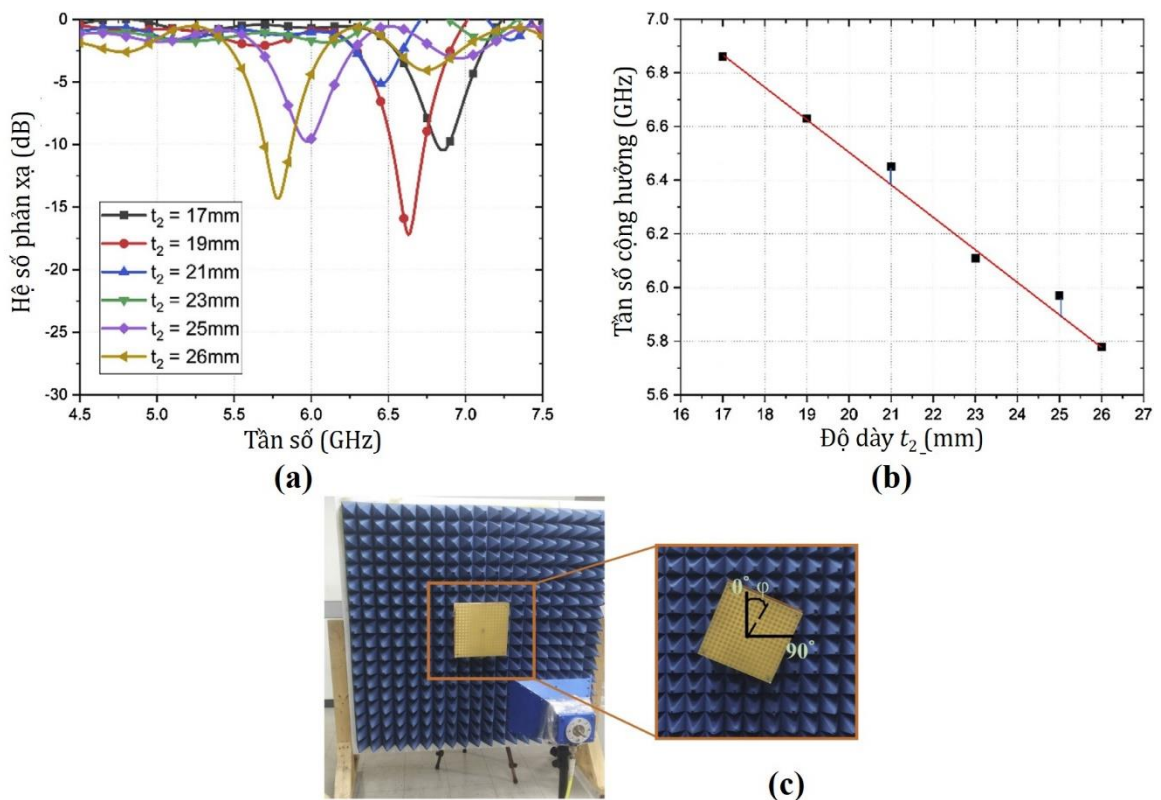


Hình 1.9. Cấu trúc ô cơ sở của MA hoạt động ở vùng GHz: (a) dạng ba chiều, (b) hình chiếu mặt ngang và (c) hình chiếu mặt trên [68].



Hình 1.10. (a) Sơ đồ khối của cấu hình MA thực nghiệm tích hợp cơ cấu truyền động. Mũi tên thể hiện quá trình điều khiển. (b) Hình ảnh phóng đại của MA và các bộ phận của cơ cấu truyền động: (1) Lớp cấu trúc cộng hưởng của vật liệu biến hóa ở mặt trước, (2) Lớp kim loại liên tục ở mặt sau, (3) Bộ truyền động, (4) Bảng mạch điều khiển [68].

Hình 1.10(a) trình bày sơ đồ khối của mẫu chế tạo MA có khả năng điều khiển tính chất hấp thụ bằng tác động cơ học. Trong nghiên cứu này, mẫu MA có kích thước tổng thể $289 \text{ mm} \times 289 \text{ mm}$, với 17×17 ô cơ sở. Lớp FR-4 trên cùng và lớp FR-4 dưới cùng được kết nối vật lý và được hỗ trợ bởi bốn trụ điện môi nằm trong các ống để tạo thành cơ cấu dịch chuyển. Các cột trụ được sản xuất bởi máy in 3D Ultimaker2 của Ultimaker. Một bộ truyền động Actuonix PQ12-P-100: 1 được gắn vào mặt sau của lớp FR-4 dưới cùng như thể hiện trong Hình 1.10(b) và nó có thể đẩy hoặc kéo lớp FR-4 dưới cùng dọc theo các ống trụ thông qua bộ vi xử lý với điện áp một chiều 6 V. Khi điện áp một chiều bị loại bỏ, bộ truyền động sẽ dừng lại và giữ nguyên vị trí. Dòng điện dừng của nó là 550 mA ở 6 V. Lực tối đa của bộ truyền động là 50 N và tốc độ tối đa của nó là 10 mm/s. Cơ cấu truyền động này giúp điều khiển độ dày của lớp không khí của mẫu MA trong khoảng từ 17 đến 26 mm.



Hình 1.11. (a) Hệ số phản xạ đo đạc của MA ở các giá trị độ dày khác nhau của lớp không khí. (b) Sự phụ thuộc của tần số cộng hưởng vào độ dày lớp không khí của MA. (c) Cấu hình đo đạc mẫu MA [68].

Hình 1.11(a) cho thấy phổ phản xạ đo được của mẫu MA ở các giá trị khác nhau của độ dày lớp không khí t_2 từ 17 đến 26 mm. Có thể thấy rằng tần số cộng

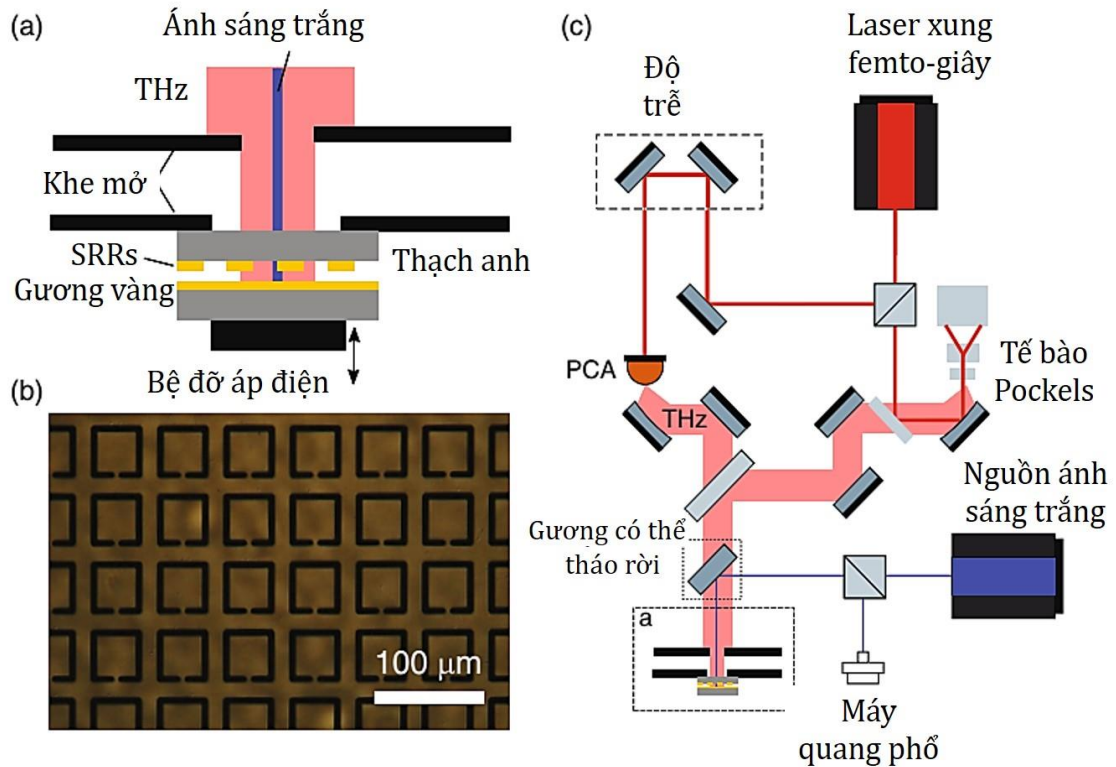
hường giảm từ 6,86 xuống 5,78 GHz khi t_2 tăng từ 17 đến 26 mm. Mối liên hệ giữa tần số cộng hưởng và độ dày lớp không khí được biểu diễn như trên Hình 1.11(b). Kết quả cho thấy tần số hấp thụ của MA gần như phụ thuộc tuyến tính với độ dày lớp không khí theo hàm số có dạng $y = -0,12x + 8,9$. Độ dốc của đường cong tuyến tính chỉ ra rằng mức độ điều khiển tần số hấp thụ của MA này là 0,12 GHz/mm.

Năm 2021, Piper và các cộng sự đề xuất một MA có thể điều khiển được tính chất hấp thụ ở vùng THz thông qua thiết bị truyền động áp điện [69]. Hình 1.12(b) cho thấy hình ảnh hiển vi quang học của cấu trúc các SRR tuần hoàn trên đế thạch anh. Các SRR làm từ vàng có chiều dài cạnh là 45 μm và độ dày là 100 nm, được chế tạo trên đế thạch anh bằng phương pháp quang khắc. Một lớp vàng liên tục được gắn riêng biệt trên một bề mặt chuyển áp điện như trên Hình 1.12(a). Lớp cấu trúc SRR tuần hoàn kết hợp với lớp gương phản xạ tạo thành một MA với kích thước của khoang không khí ở giữa có thể điều chỉnh được. Khoảng cách giữa lớp vàng liên tục với lớp cấu trúc SRR được điều khiển với độ chính xác $10 \pm 0,6$ nm bằng cách sử dụng bộ đỡ áp điện.

Máy quang phổ THz theo miền thời gian được sử dụng trong cấu hình phản xạ để đo tín hiệu phản xạ của mẫu MA. Hình 1.12(c) là thiết lập thí nghiệm đo đặc sử dụng máy quang phổ THz theo miền thời gian, được kết hợp với cấu hình giao thoa kế ánh sáng trắng để hiệu chuẩn độ dày của khoang. Độ phản xạ miền thời gian THz của thiết lập dựa trên một hệ thống thương mại (Mini Z, Zomega Terahertz Corporation) có chứa tia laser xung cực nhanh tạo ra THz bằng cách sử dụng ăng-ten quang dẫn (PCA), trong khi phép đo xung THz được thực hiện bằng cách sử dụng một hệ thống phát hiện hiệu ứng ZnTe Pockels dựa trên lăng kính phân cực với các diode quang cân bằng.

Một giao thoa kế ánh sáng trắng ở vùng nhìn thấy riêng biệt được sử dụng để thiết lập độ song song của các bề mặt và hiệu chỉnh độ dày của khoang. Ban đầu, đầu ra chuẩn trực từ nguồn sáng siêu liên tục (Fianium) được sử dụng làm nguồn dải rộng và ánh sáng phản xạ trên dải bước sóng từ 600 đến 800 nm được phân tích bằng quang phổ kế (Ocean Optics). Khoảng cách của các vân giao thoa etalon được sử dụng để xác định độ dày của khoang tại mỗi điểm dữ liệu trước khi thực hiện thí nghiệm đo THz. Chùm ánh sáng khả kiến được ghép vào đường dẫn chùm tia bằng cách sử dụng

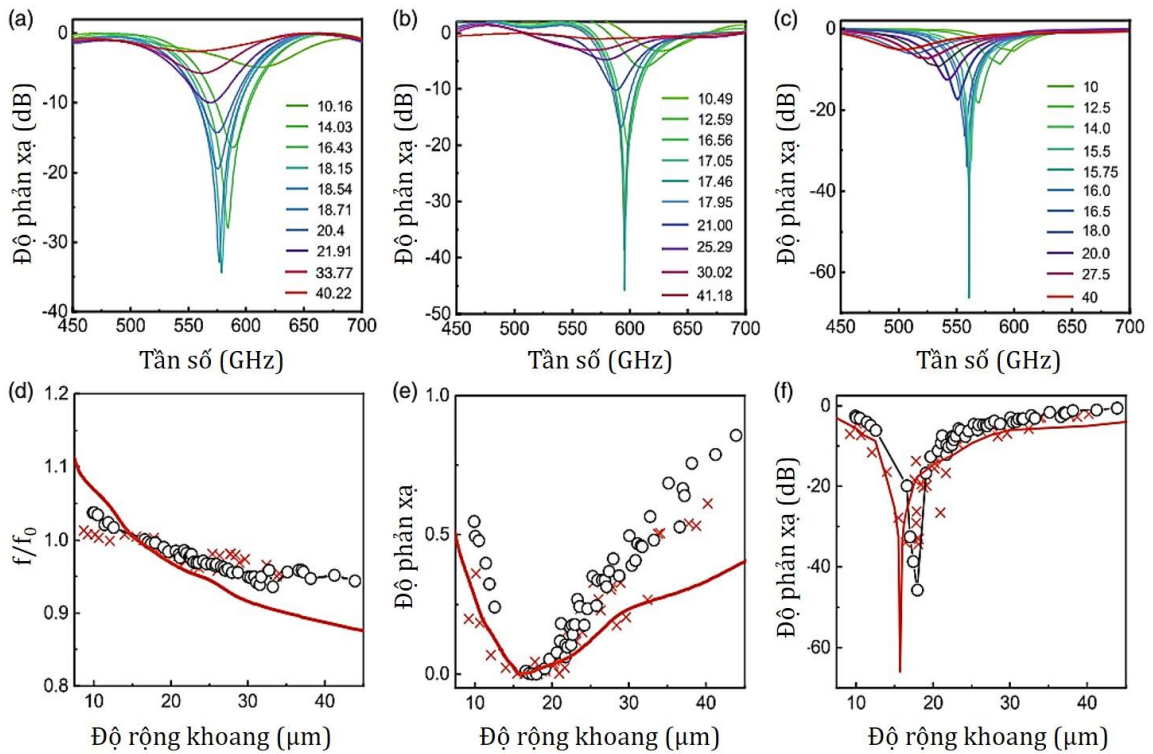
một gương có thể tháo rời trên một giá đỡ từ tính và gương này được đưa ra khỏi đường dẫn chùm tia THz sau mỗi bước hiệu chuẩn.



Hình 1.12. Cấu hình thực nghiệm: (a) Mô hình cấu trúc MA. Mặt kim loại vàng phản xạ được gắn trên một bộ áp điện để điều khiển khoảng cách giữa tấm vàng và lớp cấu trúc SRR sắp xếp tuần hoàn. b) Hình ảnh kính hiển vi quang học lớp cấu trúc SRRs tuần hoàn làm từ vàng trên đế thạch anh. c) Thiết lập phép đo tín hiệu phản xạ ở tần số THz trong miền thời gian và phép đo giao thoa ánh sáng trắng để xác định độ dày khoang [69].

Bức xạ THz được chuẩn trực và hướng về phía hốc bằng cách sử dụng gương parabol bằng vàng. Một tấm silicon dày 5 mm được sử dụng làm bộ tách chùm để hướng bức xạ THz phản xạ tới hệ thống phát hiện THz. Trong phân tích tín hiệu phản xạ THz miền thời gian, sự hiện diện của phản xạ không mong muốn từ các phần khác nhau của hệ thí nghiệm là một vấn đề cụ thể có thể làm phức tạp thêm phân tích. Do đó, một số phản xạ ngược THz không mong muốn từ các cạnh của giá đỡ mẫu đã được triệt tiêu bằng cách sử dụng hai khẩu độ đường kính 10 mm đặt phía trước SRR trên mẫu thạch anh, như thể hiện trong Hình 1.12(a). Hơn nữa, bộ tách chùm silicon với độ dày 5 mm đã được chọn để các xung bị trễ gây ra bởi phản xạ nhiều lần của

bộ tách chùm được đặt cách nhau đủ xa và suy giảm đủ để tránh trùng lặp với xung được đo đạc. Bằng phép biến đổi Fourier, phổ miền tần số THz của mẫu MA được đo cho các độ dày khoang khác nhau. Tín hiệu được chuẩn hóa với quá trình quét miền thời gian THz tham chiếu, trong đó MA có độ dày khoang là $50 \mu\text{m}$. Tại độ dày của khoang này, đáp ứng phổ bằng phẳng khi khoảng cách của khoang tiếp cận một nửa bước sóng, dẫn đến một nút của điện trường THz tại vị trí của các SRR, và do đó, ảnh hưởng của SRR trong phổ là nhỏ nhất. Phương pháp này được phát hiện là mang lại kết quả tốt hơn nhiều so với các phương pháp chuẩn hóa tín hiệu nền khác, chẳng hạn như thay thế SRR trên mẫu thạch anh bằng chất đế thạch anh trơn, do những thay đổi nhỏ không kiểm soát được về độ dày quang học có ảnh hưởng lớn đến quá trình chuẩn hóa.



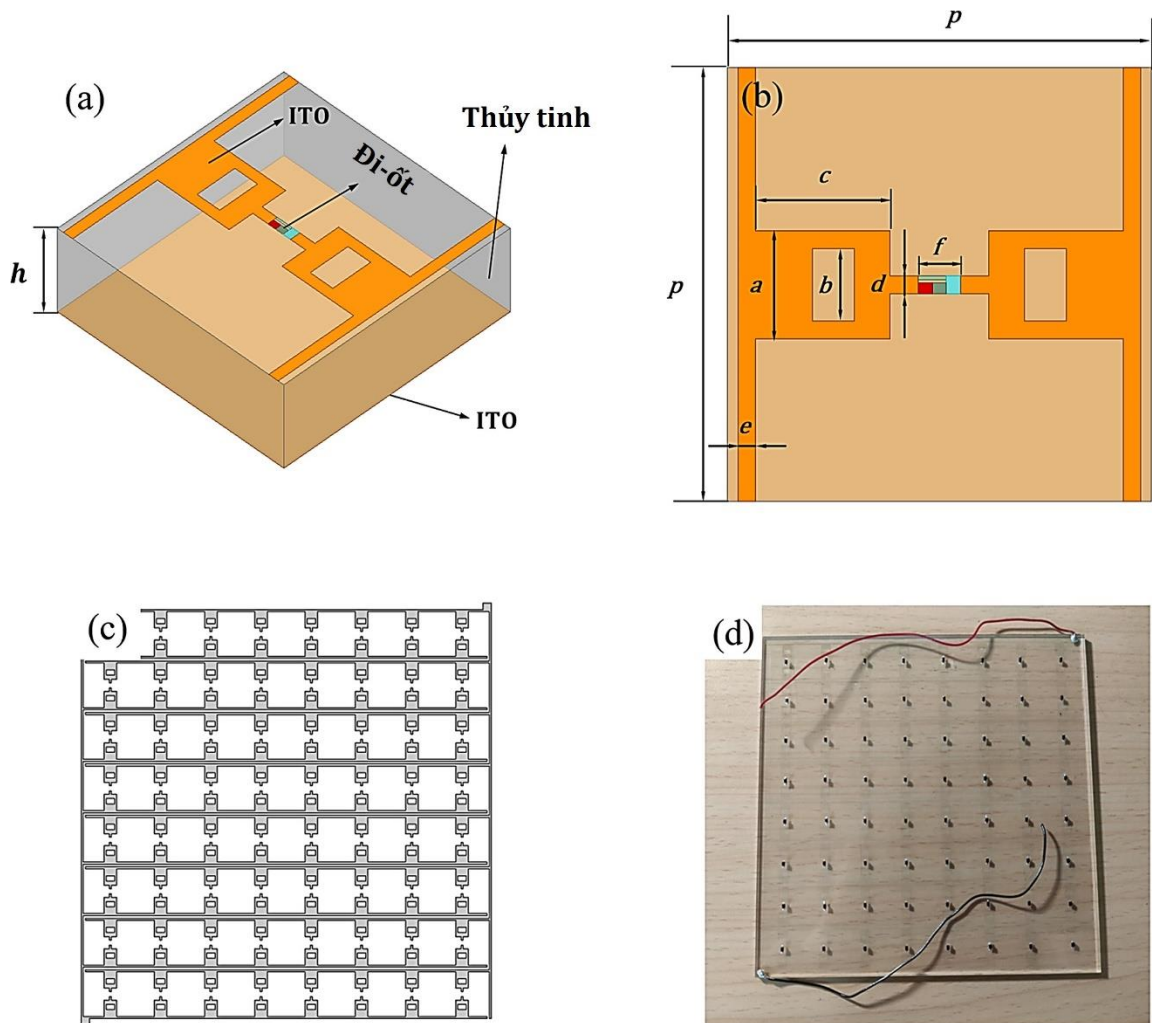
Hình 1.13. Phổ phản xạ ở vùng THz cho các giá trị khác nhau của kích thước khoang. (a, b) Kết quả đo đạc ở hai lần đo khác nhau và (c) kết quả mô phỏng. (d-f) Các giá trị tần số cộng hưởng được chuẩn hóa theo tần số hấp thụ hoàn hảo f_0 (d), giá trị cực tiểu của phổ phản xạ trên (e) thang tuyến tính và (f) thang dB, thay đổi theo độ dày khoang. Dữ liệu được hiển thị cho hai lần đo thực nghiệm (dấu chéo, dấu chấm) và dữ liệu mô phỏng (đường liền) [69].

Hình 1.13(a) và 1.13(b) biểu diễn phổ phản xạ thực nghiệm của MA cho các giá trị khác nhau của độ dày khoang được điều khiển từ 10 đến 45 μm , trong đó hai tập dữ liệu tương ứng với các lần chạy thử nghiệm khác nhau được đánh dấu tương ứng là Thí nghiệm 1 và 2. Thí nghiệm 1 và 2 là các thí nghiệm giống hệt nhau sử dụng cùng một SRR trên mẫu thạch anh và lớp gương vàng nhưng được thực hiện với việc sắp xếp lại hoàn toàn thiết lập thí nghiệm và vào những ngày khác nhau. Các kết quả mô phỏng tương ứng cho cùng SRR và kích thước khoang được thể hiện trong Hình 1.13(c). Phổ tín hiệu phản xạ phụ thuộc nhiều vào sự khoảng cách giữa SRR và gương vàng, và cho thấy sự suy giảm cường độ cộng hưởng rõ nét. Hình 1.13(a) cho thấy cực tiểu phản xạ có thể đạt đến -34 dB, xảy ra ở độ dày khoang xấp xỉ 18,1 μm , trong khi Hình 1.13(b) có cực tiểu phản xạ đạt đến -45,8 dB, xảy ra ở độ dày của khoang cỡ 17,4 μm . Các cực tiểu trong tín hiệu phản xạ lần lượt ở tần số 575,6 và 591 GHz trong hai thí nghiệm. Trong khi đó, kết quả mô phỏng sử dụng mô hình phần tử hữu hạn trong Hình 1.13(c) cho thấy độ phản xạ giảm xuống -66,7 dB ở tần số 561,1 GHz. Có thể thấy, MA ở vùng THz trong trường hợp này chủ yếu điều khiển biên độ hấp thụ thay vì tần số hấp thụ.

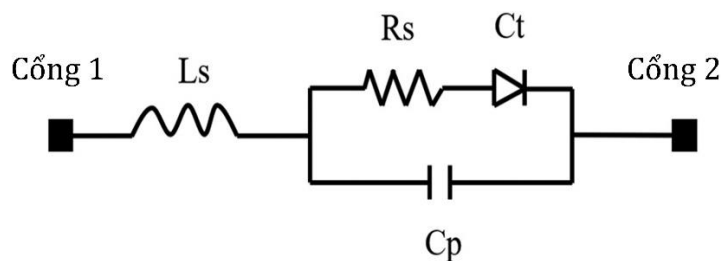
1.2.2. Điều khiển tính chất điện từ của vật liệu biến hóa bằng điện áp ngoài

Yang Liu và các cộng sự đã thiết kế MA có thể điều chỉnh được bằng điện áp ngoài bằng cách sử dụng các mẫu ITO và diode varactor [70]. Băng tần hoạt động hiệu quả của MA này là băng tần S, có thể điều chỉnh tần số đặc trưng bằng cách thay đổi điện áp đặt vào. MA trong suốt và điều chỉnh được bằng điện áp ngoài này hứa hẹn cho nhiều ứng dụng trong cho công nghệ tàng hình và che chắn điện từ.

Mẫu MA bao gồm ba lớp như thể hiện trong Hình 1.14. Lớp trên cùng là các cấu trúc làm từ ITO có với điện trở bề mặt là 3,13 Ω . Lớp giữa là đế thủy tinh và dưới cùng là lớp ITO nguyên vẹn có cùng điện trở bề mặt với lớp trên cùng. Một linh kiện ngoại vi được sử dụng ở trung tâm của ô cơ sở. Linh kiện ngoại vi được lựa chọn là diode biến dung, có mô hình mạch điện như trong Hình 1.15. Về cơ bản, đáp ứng điện từ của diode biến dung tương đương như một mạch điện với các thành phần cuộn cảm (Ls), điện trở (Rs), điện dung (Cp) và diode (Ct). Khi điện áp ngược được đặt vào, giá trị điện dung Cp sẽ bị thay đổi theo giá trị điện áp ngoài. Điện dung của nó có thể giảm từ 2,22 đến 0,30 pF dưới điện áp đặt vào từ 0 đến 20 V.



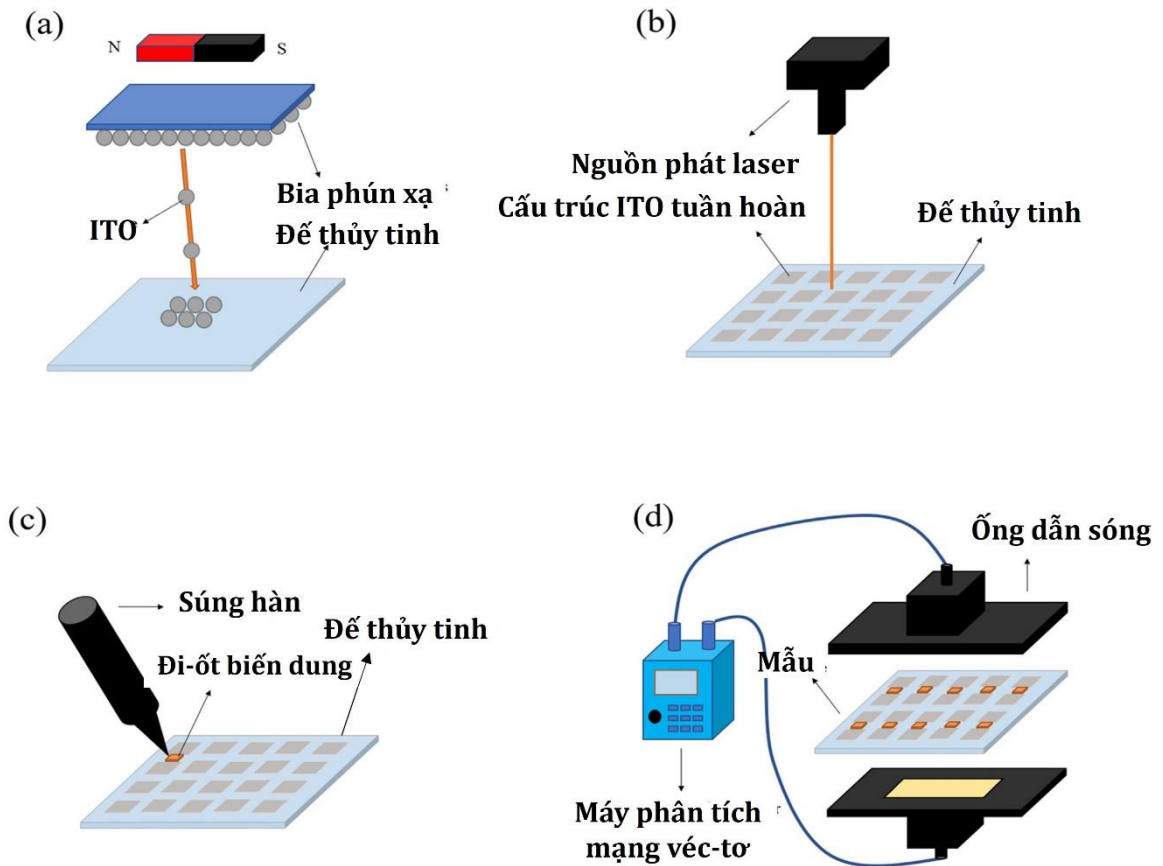
Hình 1.14. (a) Mô hình thiết kế ô cơ sở của MA. (b) Ảnh mặt trên và các tham số cấu trúc của ô cơ sở. (c) Mô hình và (d) ảnh mẫu thực tế của MA điều khiển bằng điện áp ngoài [70].



Hình 1.15. Giảm đồ mạch điện tương đương của diode [70].

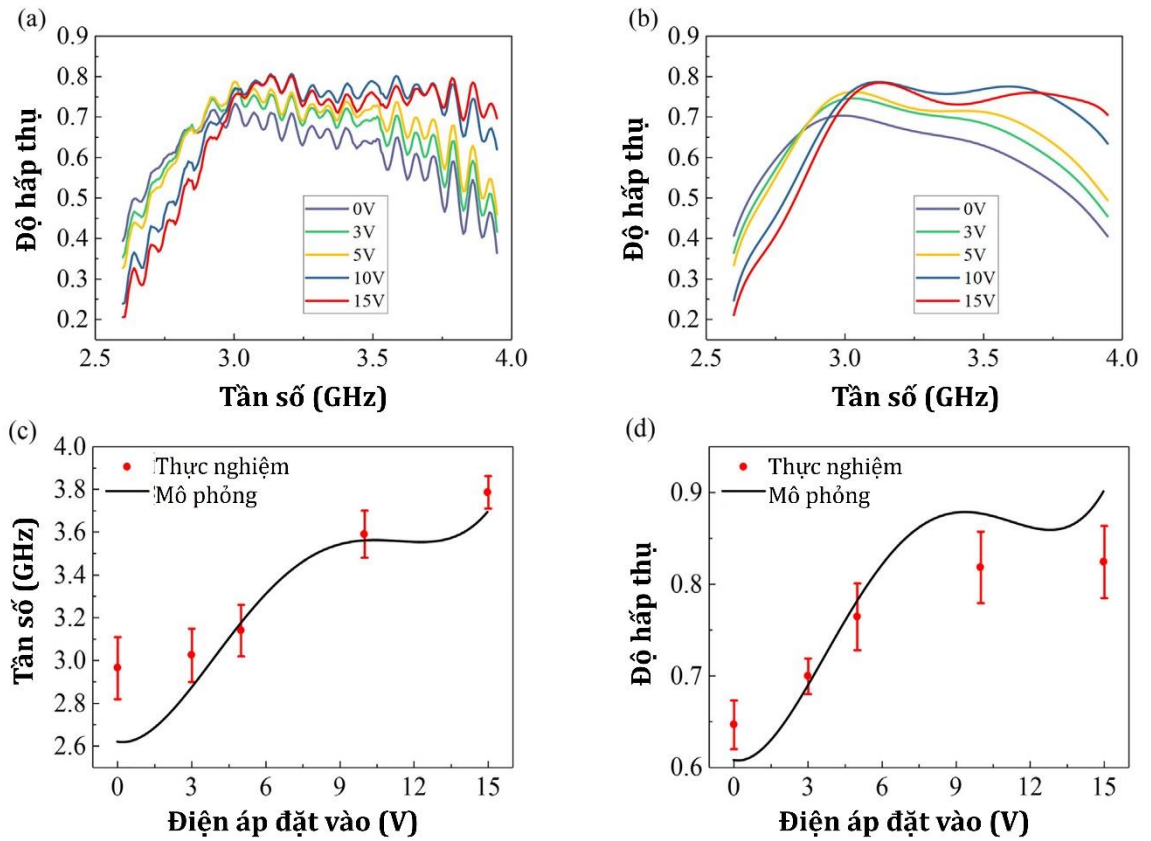
Quá trình chế tạo mẫu được thể hiện dưới dạng sơ đồ trong Hình 1.16(a) - 1.16(c). Đầu tiên, một lớp ITO được phủ trên đế thủy tinh bằng phương pháp phun xạ magnetron. Sau đó, các mảng cấu trúc vi mô được xử lý trên bề mặt mẫu bằng phương pháp khắc laser. Cuối cùng, diode được hàn vào bề mặt mẫu. Mẫu cuối cùng được thể hiện trong Hình 1.16(d). Phổ hấp thụ được đo đạc bằng máy phân tích mạng vector (N9918A) có trang bị ống dẫn sóng hình chữ nhật (WR-284). Máy phân tích

mạng vector được kết nối với các ống dẫn sóng thông qua các đường truyền dẫn tín hiệu và mẫu được đặt giữa hai ống dẫn sóng để kiểm tra thông số phản xạ.



Hình 1.16. Các bước cơ bản chế tạo mẫu MA: (a) phún xạ lớp ITO layer, (b) ăn mòn cấu trúc bằng laser và (c) hàn các diode trên bề mặt. (d) Bố trí hệ đo sử dụng máy phân tích mạng [70].

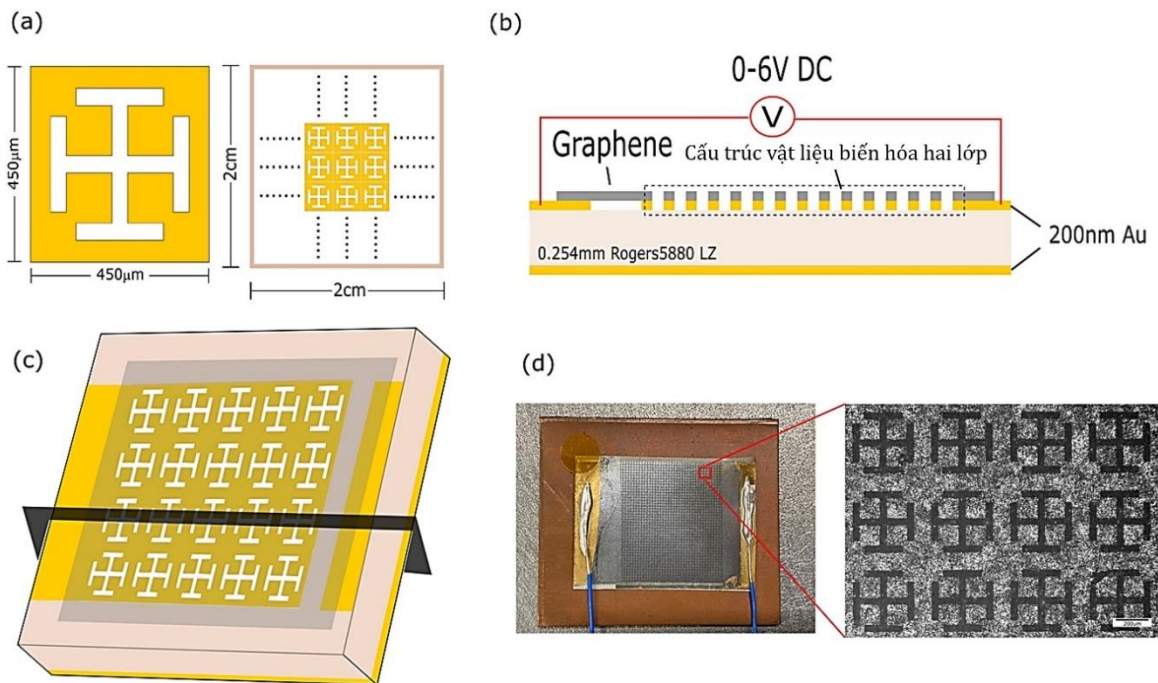
Phổ hấp thụ đo đạc và nội suy của mẫu được thể hiện trong Hình 1.17(a) và 1.17(b), tương ứng, trong đó biên độ cực đại của đỉnh hấp thụ vượt quá 0,8. Dưới các điện áp ngoài đặt vào khác nhau, cường độ của đỉnh hấp thụ có thể điều chỉnh khoảng 10%. Dải tần hấp thụ cũng có xu hướng rộng ra khi điện áp ngoài tăng dần. Hình 1.17(c) và 1.17(d) cho thấy sự biến đổi của tần số hấp thụ và độ hấp thụ trong mô phỏng và thực nghiệm khi điện áp đặt vào thay đổi từ 0 đến 15 V. Cả kết quả mô phỏng và thực nghiệm đều cho thấy tần số của đỉnh hấp thụ là dịch chuyển về tần số cao khi tăng điện áp phân cực ngược trên diode biến dung. Điều này có thể được giải thích do khi tăng điện áp phân cực ngược, điện dung của diode biến dung C_t giảm, dẫn đến giảm tổng điện dung C . Do đó, tần số đỉnh hấp thụ sẽ bị dịch chuyển về phía tần số cao.



Hình 1.17. Phổ hấp thụ (a) đo đạc và (b) nội suy dựa trên các kết quả thực nghiệm ở các giá trị điện áp ngoài khác nhau. So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm của (c) tần số và (d) cường độ đỉnh hấp thụ thay đổi theo điện áp đặt vào [70].

Một mẫu thiết kế sơ đồ của MA khác có thể điều khiển bằng điện áp ngoài, hoạt động ở vùng THz được trình bày chi tiết trong Hình 1.18(a–c) và hình ảnh thiết bị được chế tạo được hiển thị trong Hình 1.18 (d) [71]. Thiết bị này là một cấu trúc dạng kim loại/điện môi/kim loại với đế điện môi Rogers 5880 Duroid dày 0,254 mm, có khả năng đàn hồi linh hoạt. Lớp trên cùng bao gồm một màng mỏng graphene được trải lên một màng mỏng vàng (200 nm), lắng đọng trên đế, tạo thành một lớp kép graphene/vàng. Hai lớp này được quang khắc đồng thời sao cho cấu trúc vàng và cấu trúc graphene chồng lên nhau (được đánh dấu khung nét đứt trong Hình 1.18(b)). Lớp dưới cùng là một màng mỏng bằng vàng (200 nm, ở mặt sau đế). Thiết kế cấu trúc MM là một màng kim loại với các khe có hình dạng chữ thập Jerusalem sắp xếp tuần hoàn. Kích thước ô cơ sở của cấu trúc MM là $450 \mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$. Cấu trúc khe chữ thập Jerusalem được chọn để đạt được hệ số phẩm chất Q cao (độ chọn lọc tần số cao). Cấu trúc này kéo dài quãng đường của dòng điện tại tần số cộng hưởng, dẫn

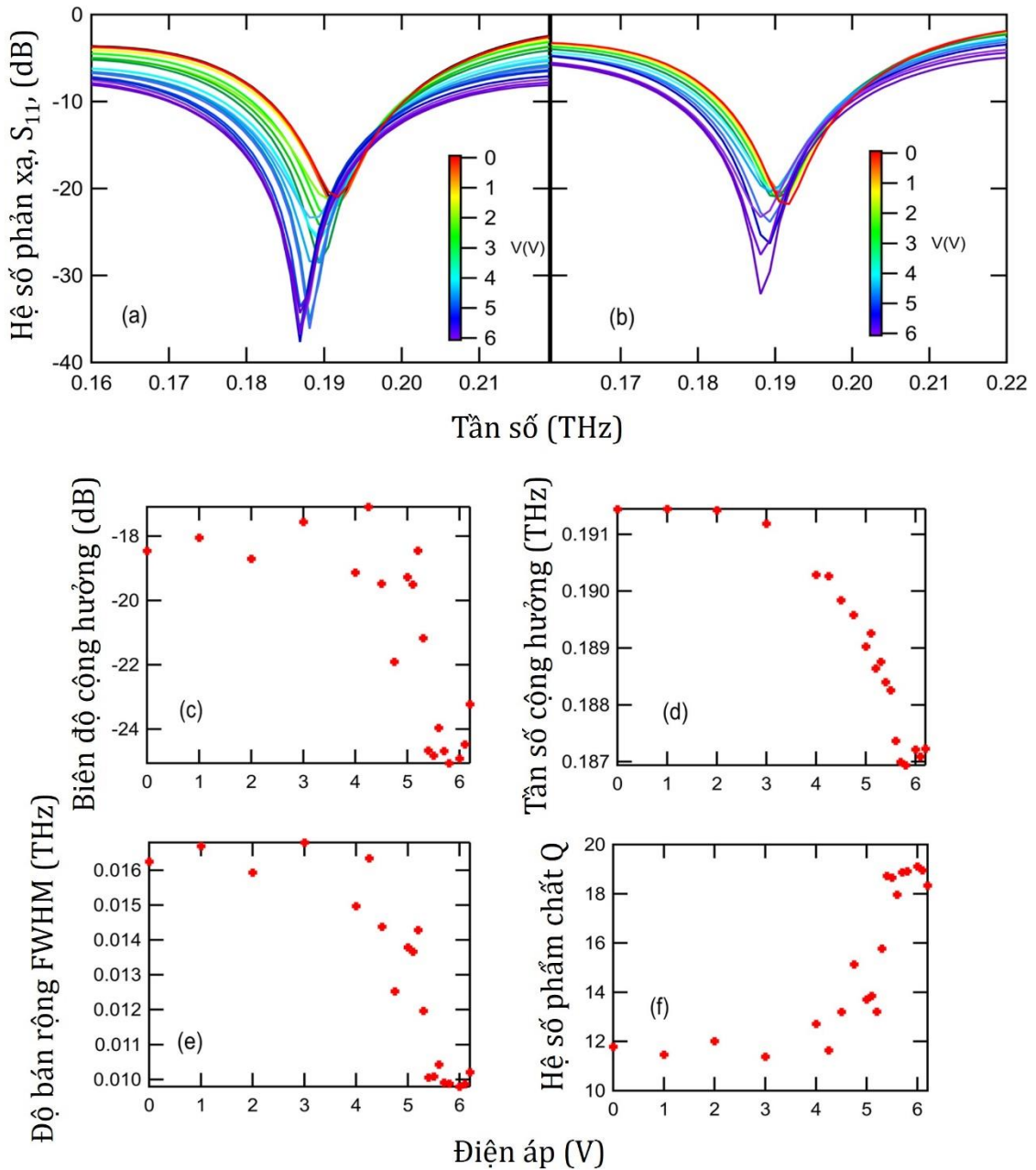
đến kích thước ô cơ sở nhỏ hơn và MA trở nên nhỏ gọn hơn. Các khe chéo cũng góp phần tăng cường độ ổn định của vật liệu đối với góc tới của sóng THz. Hình ảnh trong Hình 1.18(d) hiển thị mẫu MA chế tạo có chất lượng cao với hình dáng cấu trúc rõ nét.



Hình 1.18. (a) Mô hình cấu trúc ô cơ sở và kích thước của MA. (b) Mặt cắt ngang của MA. (c) Sơ đồ minh họa MA điều khiển bằng điện áp ngoài ở vùng THz. (d) Mẫu vật liệu được chế tạo với hình ảnh quang học được phóng to hiển thị cấu trúc của MA[71].

Hình 1.19(a) biểu diễn hệ số phản xạ ở xung quanh tần số cộng hưởng với điện áp đặt trong khoảng từ 0 đến 6 V. Có thể thấy, biên độ của cộng hưởng được điều chỉnh rõ rệt khi thay đổi điện áp. Sự điều chỉnh điện áp phân cực từ 0 đến 6 V đã làm cho biên độ tại tần số cộng hưởng thay đổi khoảng 16 dB. Hệ số phẩm chất Q thu được khá cao đạt giá trị 19 ở 6 V. Ngoài ra, đặc điểm điều biến của mẫu vật liệu [Hình 1.19(c-f)] có hai vùng riêng biệt. Trong vùng điện áp thấp từ 0 đến 3 V, có rất ít thay đổi về đặc trưng của cộng hưởng. Tuy nhiên, trong vùng điện áp từ 3 đến 6 V, tính chất cộng hưởng thay đổi rõ rệt và thay đổi một cách tuyến tính hơn. Biên độ cộng hưởng được tăng từ khoảng -18 đến -25 dB và tần số thay đổi từ 0,192 đến 0,187 THz. Độ phẩm chất Q cũng có xu hướng tương tự, tăng từ 12 lên 19, và cũng được thể hiện qua việc độ bán rộng phổ (Full width at half maximum - FWHM) bị suy giảm đi 41%. Khả năng điều chỉnh biên độ cộng hưởng của MA trong khoảng lớn với dải

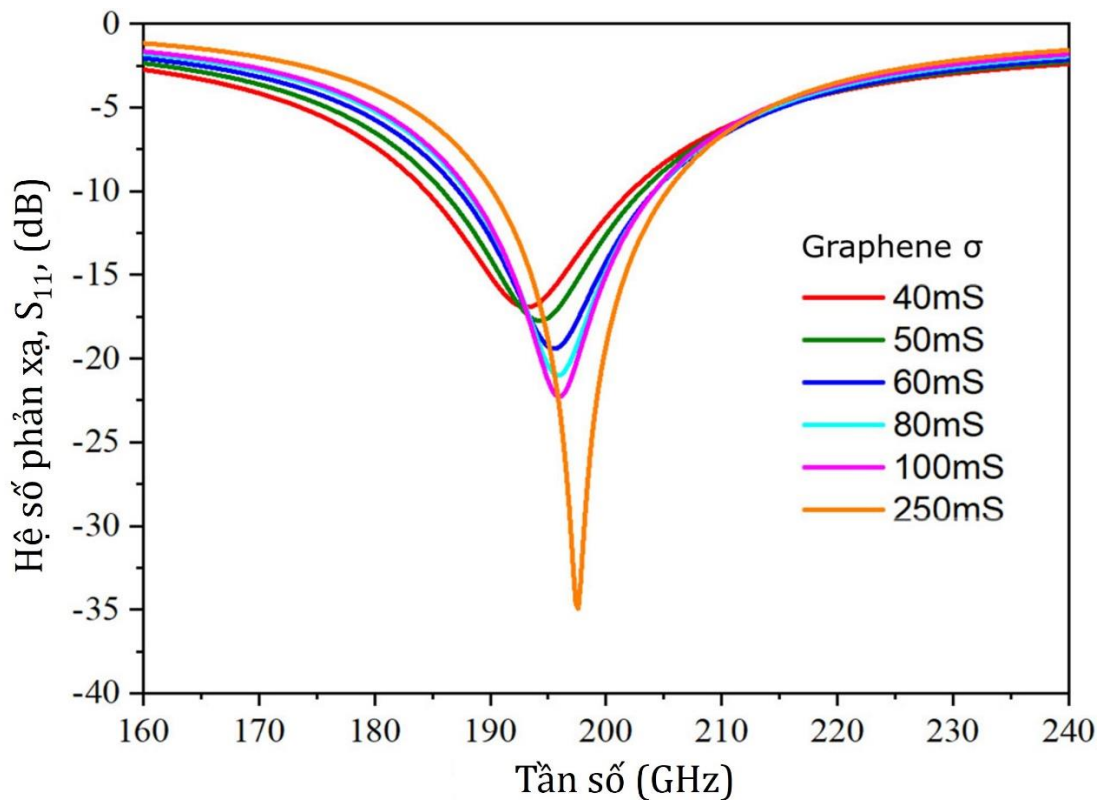
điện áp thấp (3 - 6 V) và có thể đảo ngược [Hình 1.19(b)] khiến cho vật liệu có khả năng ứng dụng cao hơn trong thực tế.



Hình 1.19. Kết quả thực nghiệm điều khiển tính chất của MA ở tần số xung quanh 0,2 THz. (a, b) Sự biến đổi của phổ phản xạ dưới điện áp phân cực khác nhau, phân cực của điện áp trong (b) bị đảo ngược so với trường hợp (a). Ảnh hưởng của giá trị điện áp lên (c) biên độ cộng hưởng ($\pm 0,3$ dB), (d) tần số cộng hưởng ($\pm 2 \times 10^{-4}$ THz), (e) Độ bán rộng FWHM của phổ ($\pm 3 \times 10^{-4}$ THz) và (f) hệ số phẩm chất Q ($\pm 0,5$) [71].

Ở tần số THz, độ dẫn của graphene tuân theo hàm Drude, bị chi phối chủ yếu bởi quá trình dịch chuyển nội vùng. Một điện áp đặt vào có thể được sử dụng để thay

đổi mức Fermi và, do đó, làm thay đổi độ dẫn điện trong dải của graphene. Điều này không thể xảy ra bên trong lớp vàng, cho thấy rằng graphene chịu trách nhiệm chính cho tất cả các cơ chế điều chỉnh. Việc thay đổi độ dẫn của graphene trong lớp kép dẫn đến hai hiệu ứng điều chỉnh. Hiệu ứng đầu tiên phát sinh từ điện trở tương đương của mô hình mạch cộng hưởng RLC. Sự thay đổi độ dẫn điện trong lớp kép graphene/vàng phân cực điện áp (điện cực trên) làm thay đổi sự phối hợp trở kháng của cấu trúc cộng hưởng, dẫn đến làm thay đổi biên độ cộng hưởng. Hiệu ứng thứ hai liên quan đến sự biến đổi độ dẫn điện nội vùng của graphene làm thay đổi sự hấp thụ bức xạ THz của bản thân graphene. Điều này kéo theo sự thay đổi của độ hấp thụ trên toàn bộ phạm vi vùng THz đo đạc, bao gồm cả vùng cộng hưởng và không cộng hưởng. Do đó, sự điều chỉnh tính chất hấp thụ của MA quan sát được là sự kết hợp của cả hai hiệu ứng này.



Hình 1.20. Kết quả mô phỏng phổ phản xạ của MA khi thay đổi độ dẫn của graphene từ 40 đến 250 mS [71].

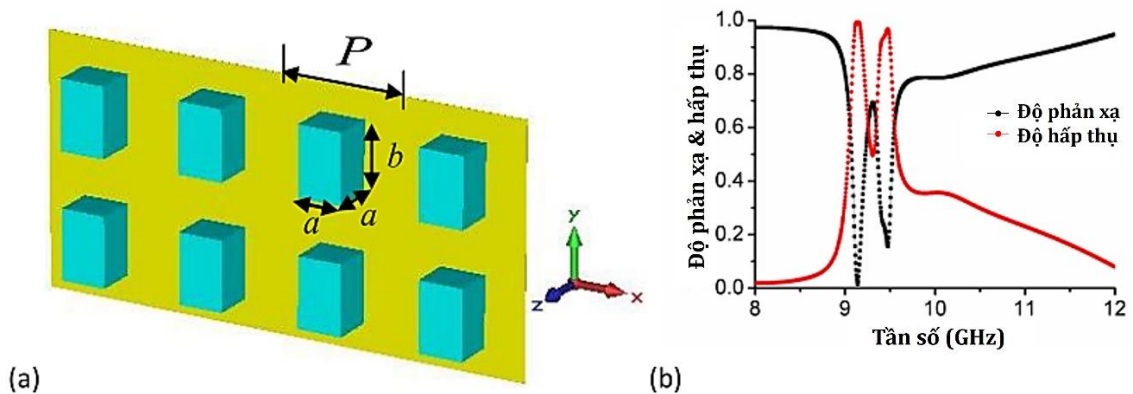
Nhận xét trên có thể được giải thích cụ thể thông qua kết quả mô phỏng phổ hấp thụ của MA khi thay đổi độ dẫn điện của lớp graphene như trên Hình 1.20. Biên độ cực đại mô phỏng thay đổi từ -17 đến -22 dB tương ứng với độ dẫn graphene thay

đôi từ 40 đến 100 mS. Các giá trị này gần với các giá trị được quan sát bằng thực nghiệm là -18 dB ở 0 V và -25 dB ở 6 V. Có thể ước tính rằng tổng phạm vi điều chỉnh độ dẫn graphene trong thực nghiệm vào cỡ 60 - 75 mS. Dải điều chỉnh này là khá lớn và được thực hiện trong khoảng điện áp đặt vào là tương đối nhỏ.

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

Hệ số điện môi thường ảnh hưởng đến tần số hấp thụ của vật liệu biến hóa. Một cách tương tự, nếu vật liệu từ được sử dụng thay vì điện môi, tính chất hấp thụ của MA cũng sẽ phụ thuộc vào độ từ thẩm. Các vật liệu từ tính thường có độ nhạy lớn đối với từ trường. Do đó, MA tích hợp vật liệu từ cũng là một cách tiếp cận hữu hiệu để có thể điều khiển tính chất hấp thụ thông qua từ trường ngoài đặt vào.

Wang và các cộng sự đã đề xuất một MA có thể điều khiển được tính chất bằng từ trường ngoài [72]. Mô hình cấu trúc của MA được thể hiện trong Hình 1.21(a), trong đó có tám khối ferrite đặt trên một mặt phẳng nền bằng kim loại đồng. Mỗi ferrite được làm từ garnet sắt yttri (YIG) với hệ số tổn hao là $\tan \delta = 0,0002$. Từ hóa bão hòa, độ điện thẩm tương đối và độ rộng cộng hưởng lần lượt là $4\pi M_s = 1850$ Gs, $\epsilon_r = 14,4$ và $\Delta H = 20$ Oe. Phổ hấp thụ của MA trên Hình 1.21(b) cho thấy hai đỉnh hấp thụ, nằm ở 9,1 GHz và 9,48 GHz, có hiệu suất hấp thụ lần lượt lên tới 99% và 97%.



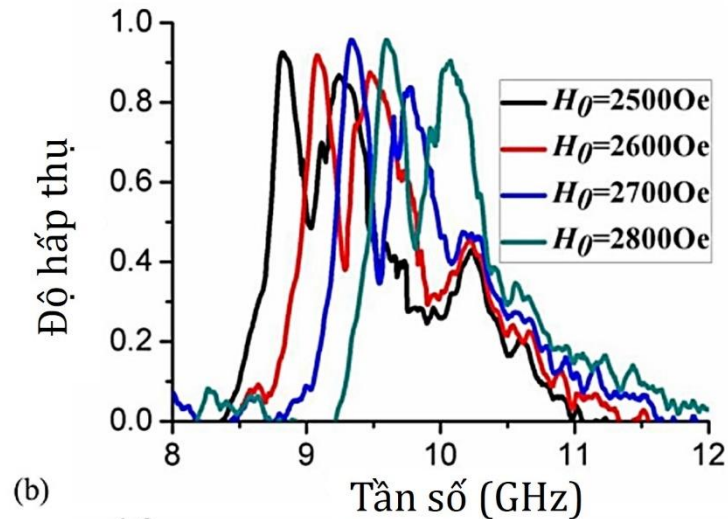
Hình 1.21. (a) Mô hình cấu trúc của MA sử dụng vật liệu từ được đề xuất. (b) Phổ phản xạ và phổ hấp thụ của MA với $H_0 = 2600$ Oe [72].

Mẫu MA sử dụng vật liệu từ đã được chế tạo và đo đạc như thể hiện trong Hình 1.22. Mẫu được đưa vào một ống dẫn sóng hình chữ nhật băng tần X WR90 ($22,86 \times 10,16$ mm²) và từ trường đặt vào được tạo bởi một nam châm điện như trong Hình 1.22(a). Như trong Hình 1.22(b) và 1.22(c), kết quả thực nghiệm gần như tương

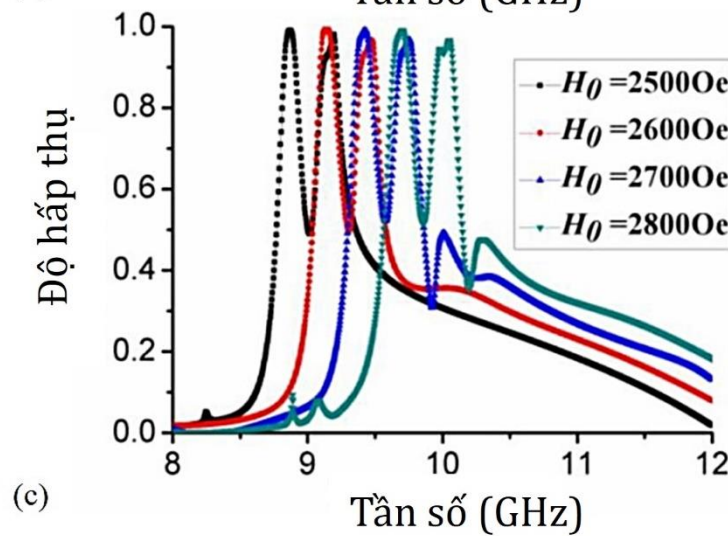
tự với kết quả mô phỏng. Trong đó, phổ hấp thụ bị dịch chuyển về phía tần số cao khi từ cường độ từ trường ngoài tăng dần. Điều này được giải thích là do tần số cộng hưởng sắt từ riêng của khối ferrite bị dịch chuyển về tần số cao hơn khi từ trường ngoài đặt vào được tăng cường.



(a)



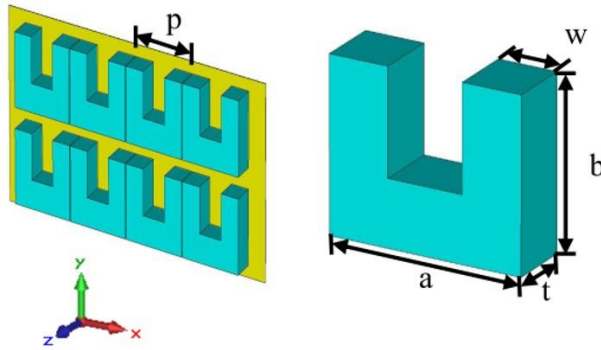
(b)



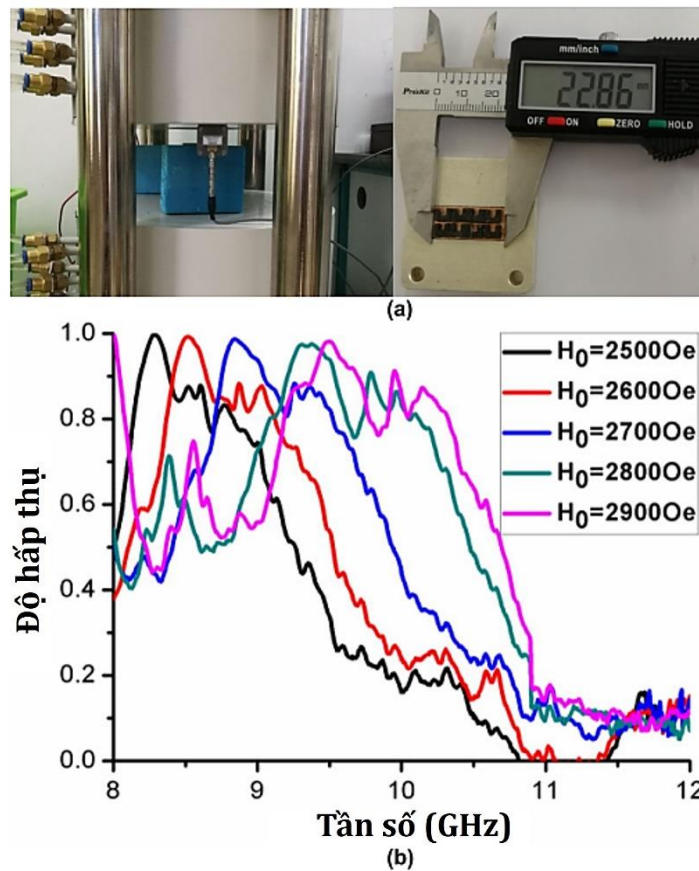
(c)

Hình 1.22. (a) Mẫu chế tạo MA và nam châm điện. Phổ hấp thụ (b) đo đạc và (c) mô phỏng dưới các từ trường khác nhau [72].

Dựa trên nghiên cứu này, Wang và các cộng sự cũng đã phát triển thành công một MA dải rộng có thể điều khiển được bằng từ trường [73]. Ở đó, thay vì các cấu trúc hình khối, vật liệu từ được chế tạo thành các cấu trúc có dạng hình chữ U như trên Hình 1.23. Kết quả thực nghiệm [Hình 1.24] cho thấy, độ hấp thụ cao trên dải tần số rộng của MA được duy trì tương đối ổn định và phổ hấp thụ được điều khiển dịch về phía tần số cao khi cường độ từ trường ngoài đặt vào được tăng cường.



Hình 1.23. Mô hình cấu trúc MA dải rộng sử dụng ferrite [73].

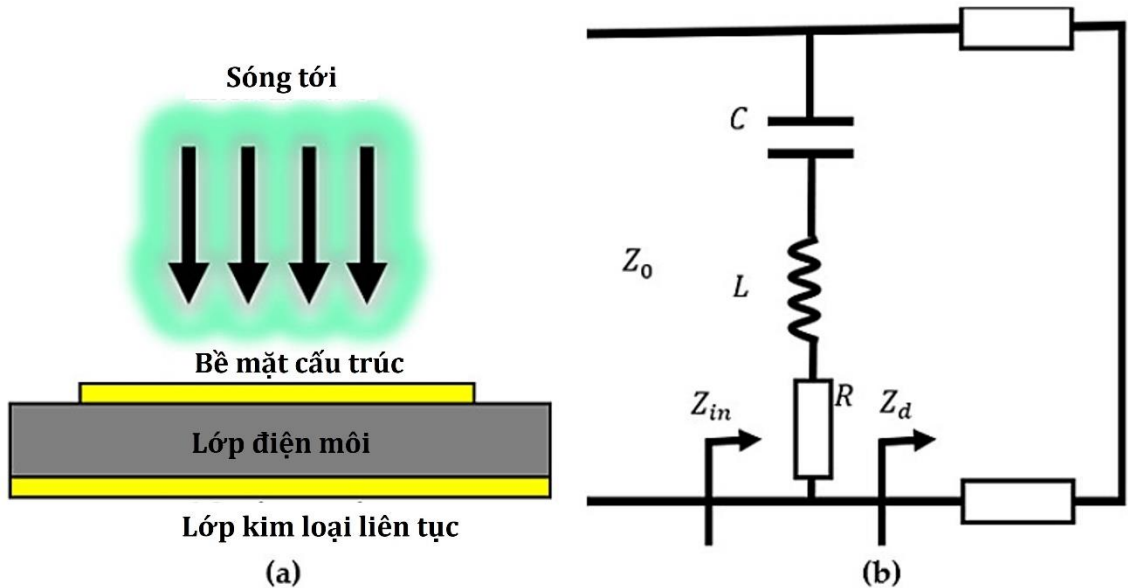


Hình 1.24. (a) MA dải rộng được chế tạo và hệ thống thử nghiệm nam châm điện.

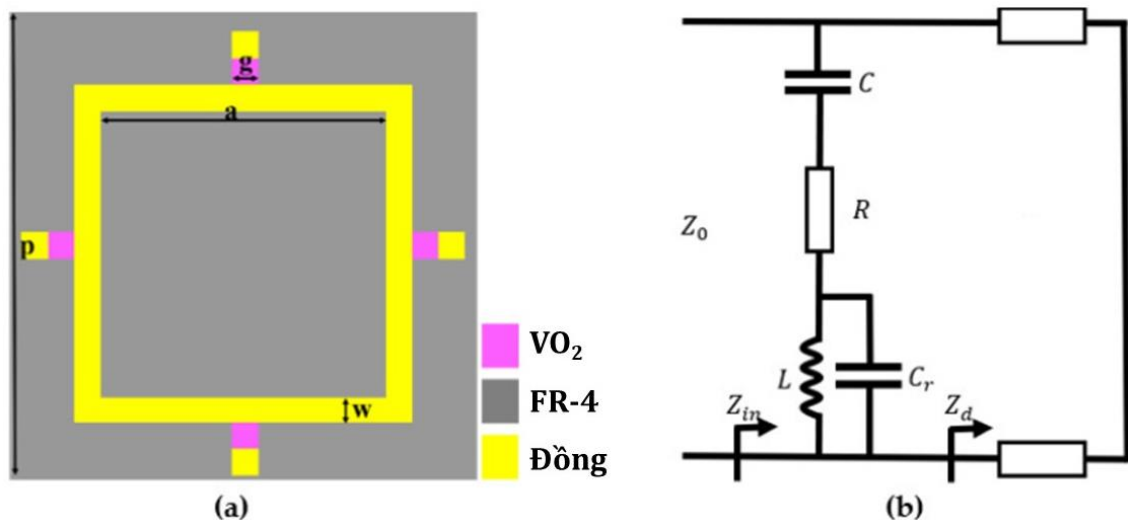
(b) Phổ hấp thụ đo đạc trong các từ trường đặt vào khác nhau [73].

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

Trong phần này, kết quả nghiên cứu tiêu biểu về một vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ điều khiển bằng nhiệt độ [thermal-switchable metamaterial absorber (TSMA)] sẽ được trình bày. Năm 2022, một TSMA đã được Wang và các cộng sự đề xuất dựa trên vật liệu chuyển pha kim loại – điện môi vanadium dioxide (VO_2) [74].

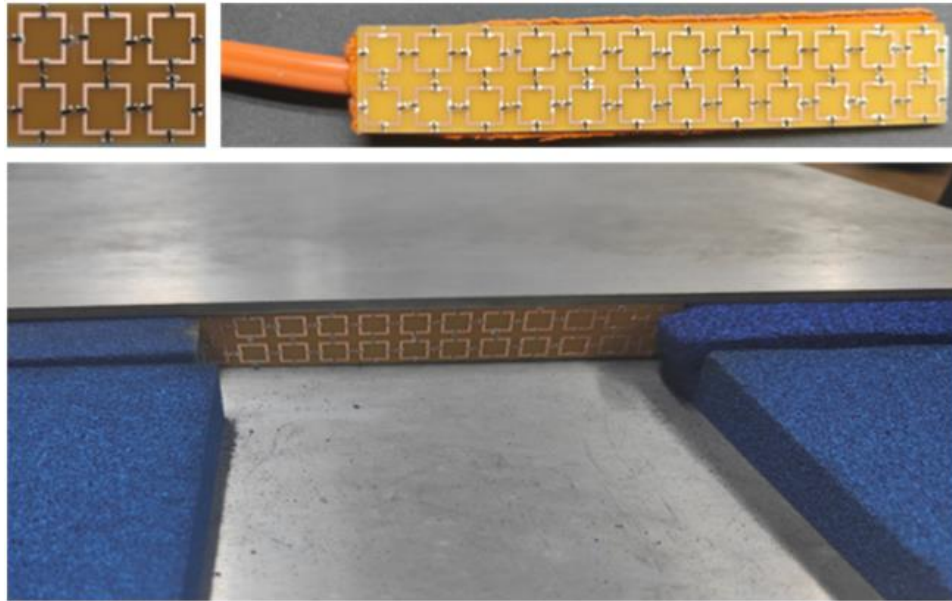


Hình 1.25. (a) Thiết kế MA có cấu trúc kim loại/điện môi/kim loại và (b) mô hình mạch điện tương đương: Z_0 là trở kháng của không khí, Z_{in} là trở kháng của mạch điện, R , L , C tương ứng là điện trở, cảm kháng và điện dung của lớp mặt trên, Z_a là trở kháng của điện môi với tâm đồng đẳng sau [74].

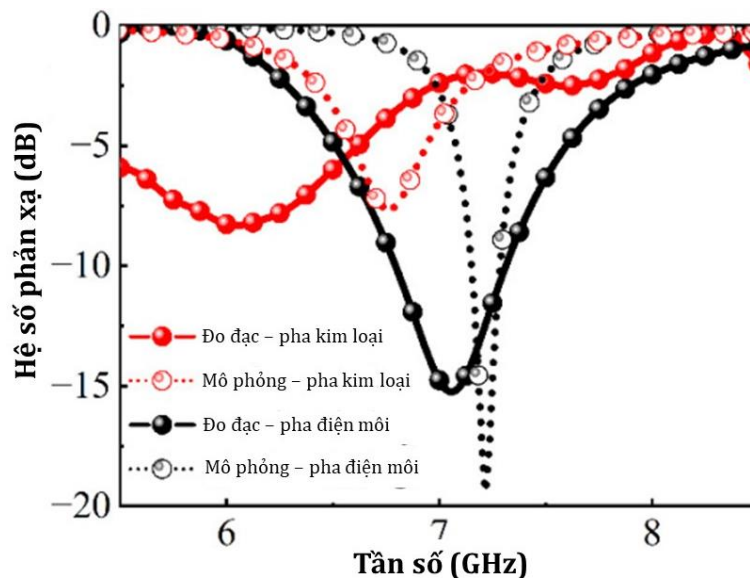


Hình 1.26. (a) Thiết kế MA có cấu trúc kim loại/điện môi/kim loại được tích hợp VO_2 và (b) mô hình mạch điện tương đương [74].

Màng mỏng VO₂ được lắng đọng trên đế sapphire bằng phún xạ magnetron sau đó là xử lý ủ chân không. Tiếp theo, màng VO₂ đã chuẩn bị được cắt thành các chip nhỏ đóng vai trò là các phần tử giúp điều khiển tính chất của MA bằng nhiệt độ. Thiết kế nguyên mẫu của TSMA hứa hẹn có nhiều tiềm năng ứng dụng trong ăng-ten, cảm biến, bộ dò có thể điều khiển linh hoạt. Mô hình cấu trúc của MA dạng ba lớp kim loại - điện môi - kim loại tích hợp VO₂ được trình bày như trên Hình 1.25 và 1.26.



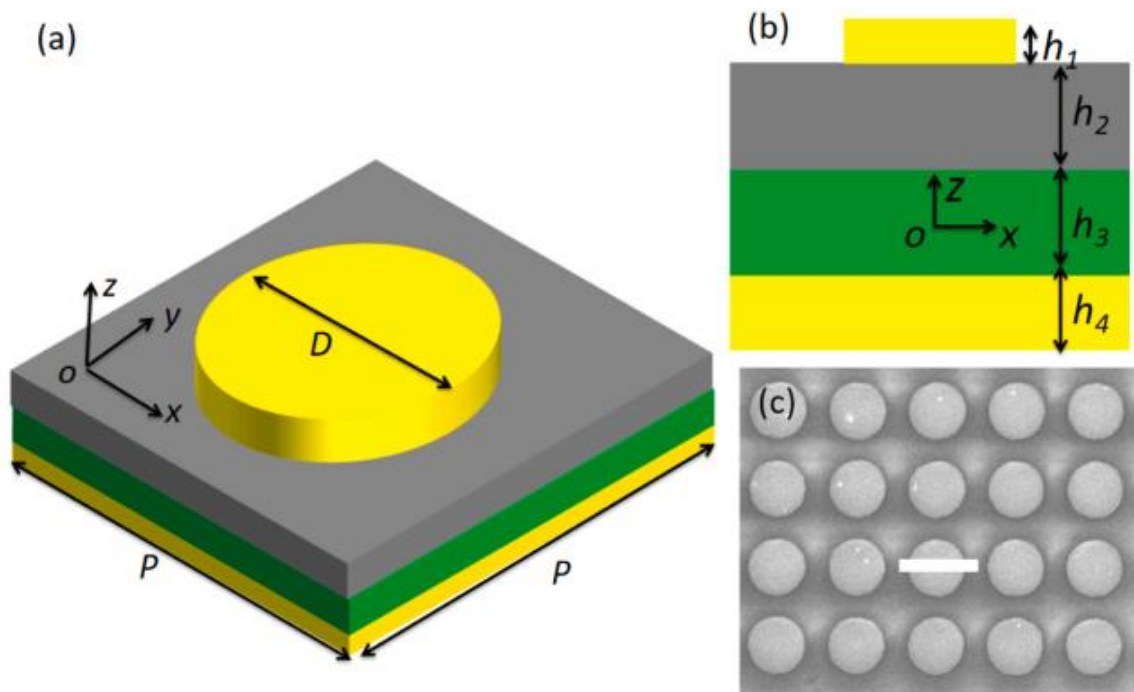
Hình 1.27. Mẫu vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ điều khiển bằng nhiệt độ (TSMA) (ảnh trên-trái), TSMA với đế gia nhiệt (ảnh trên-phải), và ảnh cấu hình đo đạc của TSMA [74].



Hình 1.28. Phổ phản xạ mô phỏng và đo đạc của TSMA [74].

Mô hình thí nghiệm điều khiển tính chất hấp thụ bằng nhiệt độ được thể hiện trong Hình 1.27. Phổ hấp thụ được đo bằng máy phân tích mạng vectơ (PNA Network Analyzer N5224B, KEYSIGHT) sử dụng ống dẫn sóng dạng tám song song, và dải tần khảo sát là 6-8 GHz. Các mẫu được đo đạc ở nhiệt độ phòng và 100°C. Kết quả thí nghiệm trong Hình 1.28 cho thấy cực tiểu phản xạ của mẫu MA là -16 dB ở 7,1 GHz ở nhiệt độ phòng, sau khi VO₂ chuyển pha, cực tiểu phản xạ tăng lên -8 dB và dịch chuyển về 6,3 GHz. Sự gia tăng độ tự cảm ở pha kim loại là nguyên nhân cho sự dịch chuyển của tần số cộng hưởng về phía tần số thấp trong kết quả đo đạc.

Một MA điều khiển bằng nhiệt độ hoạt động ở vùng THz đã được nghiên cứu [75] với cấu trúc ô cơ sở được miêu tả trong Hình 1.29(a) và 1.29(b), bao gồm bốn lớp vật liệu vàng/SU-8/VO₂/vàng. Các tham số cấu trúc có thể được tìm thấy trong Bảng 1 và ảnh của mẫu MA chế tạo được thể hiện trên Hình 1.29(c).

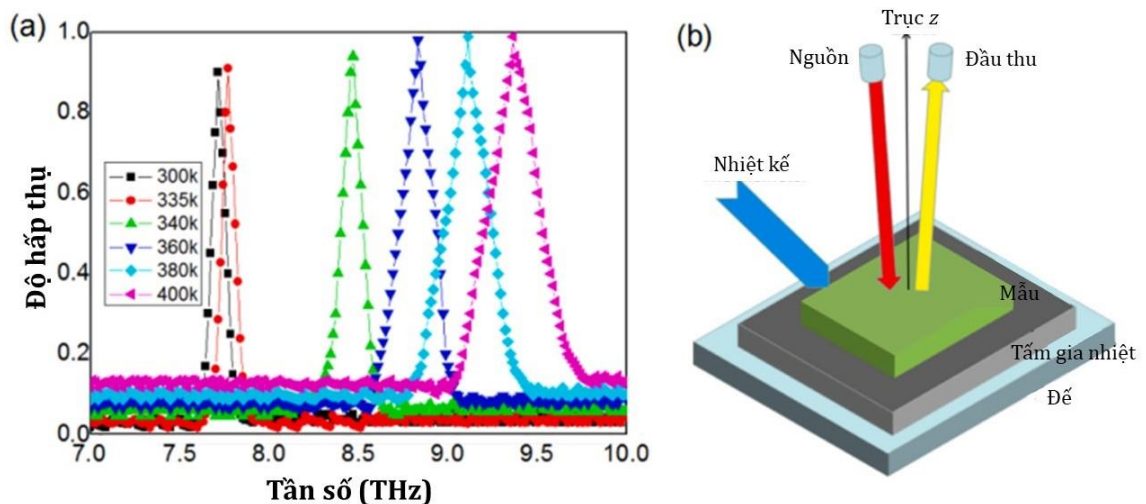


Hình 1.29. (a) Hình ảnh ba chiều của các ô đơn vị. Ở đây, các lớp kim loại là phần màu vàng, lớp SU-8 là phần màu xám và lớp VO₂ là phần màu xanh lục. (b) Mặt cắt ngang xoz của ô đơn vị được đề. (c) Ảnh SEM của mẫu [75].

Bảng 1.1. Bảng giá trị các tham số cấu trúc của MA được tích hợp VO₂ [69].

Tham số cấu trúc	P	D	h_1	h_2	h_3	h_4
Giá trị (μm)	5	2	0,55	5,5	5	1,25

Ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường đối với mẫu MA được thể hiện trong các thí nghiệm như trong Hình 1.30 (Các thông số cấu trúc được giữ nguyên và mẫu được đặt trong không khí). Sơ đồ nguyên lý của quá trình cảm biến nhiệt được thể hiện trong Hình 1.30(b). Ở giai đoạn đầu, nhiệt độ được tăng chậm từ 300 K đến 335 K (thấp hơn nhiệt độ chuyển pha của VO_2). Độ hấp thụ của mẫu tăng nhẹ, từ 90,1% lên 90,9%, chỉ tăng 0,8%, như trong Hình 1.30(a). Sự thay đổi về tần số cộng hưởng lúc này chỉ là 0,07 THz. Trong giai đoạn thứ hai, nhiệt độ của mẫu liên tục tăng từ 335 K lên 340 K, do đó đạt đến nhiệt độ chuyển pha của VO_2 . Hiệu suất hấp thụ của MA được tăng cường đáng kể, biên độ hấp thụ tăng từ 90,9% lên 94,2% và tần số cộng hưởng tăng lên thành 8,47 THz. Khi nhiệt độ môi trường tiếp tục tăng từ 340 K đến 400 K, độ hấp thụ của MA là 98,2%, 99,3% và 99,7% tương ứng tại tần số cộng hưởng là 8,83 THz, 9,11 THz và 9,37 THz. Lưu ý rằng, khi nhiệt độ môi trường vượt quá nhiệt độ chuyển pha của VO_2 , cả độ rộng phổ hấp thụ và hiệu suất hấp thụ tổng thể đều được tăng cường. Độ dịch chuyển tần số đạt được là 1,64 THz ứng với khoảng chênh lệch nhiệt độ được điều khiển là 100 K.

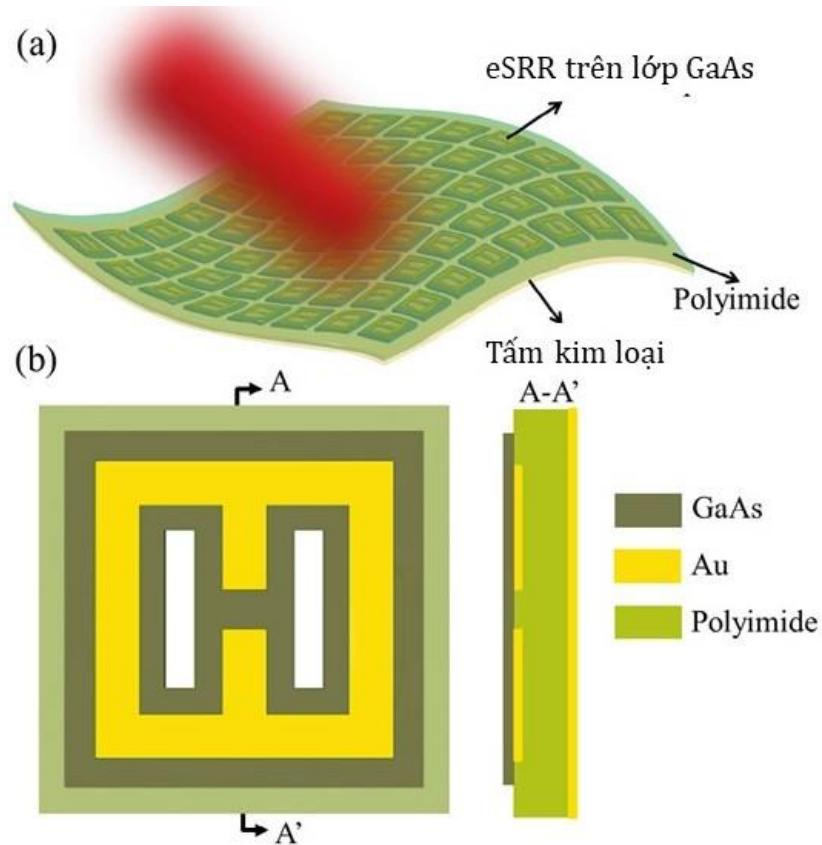


Hình 1.30. (a) Phổ hấp thụ đo được trong quá trình gia nhiệt. (b) Sơ đồ nguyên lý của thực nghiệm [75].

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

Phần này giới thiệu một MA điều khiển bằng quang học, sử dụng kích thích quang của hạt tải trong GaAs để điều khiển linh động đáp ứng của cấu trúc cộng hưởng điện dạng vòng có rãnh (eSRR) trên các lớp đệm GaAs [76]. Hình 1.31(a) mô tả sơ đồ của MA, được kích thích bằng chùm tia 800 nm. Ô cơ sở của MA (Hình 1.31(b)) bao gồm một lớp cấu trúc eSRR bằng vàng, lớp đệm GaAs, lớp điện môi

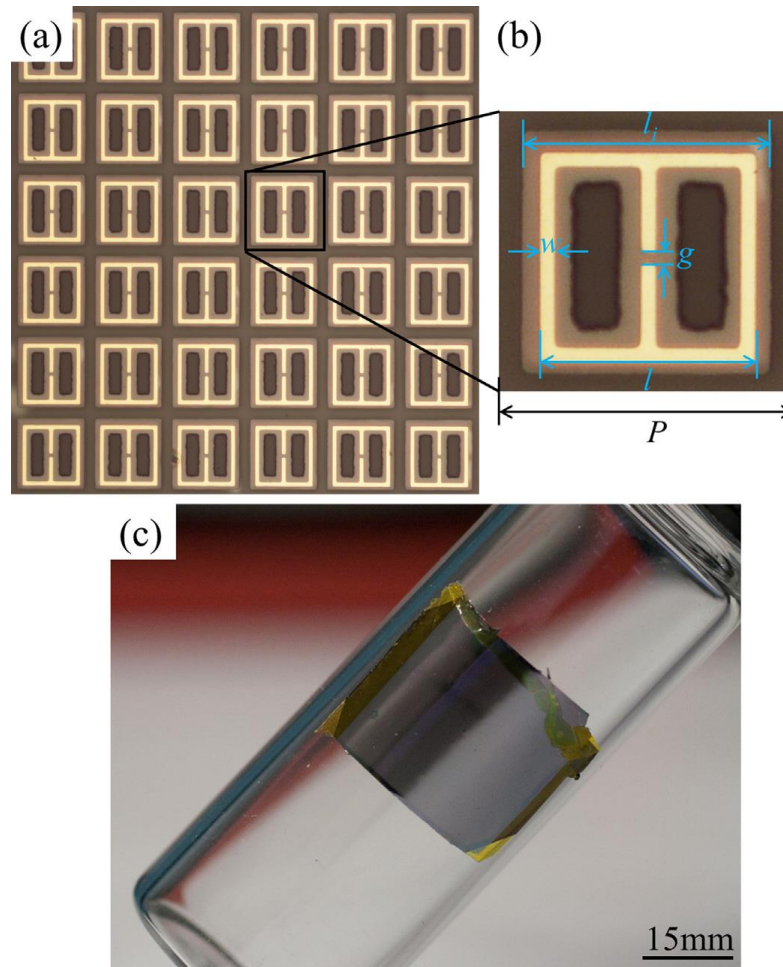
polyimide, và lớp kim loại vàng liên tục ở dưới cùng. Hình 1.32(a) và 1.32(b) mô tả mảng eSRR tuần hoàn của MA và kích thước của ô cơ sở tương ứng. Chu kỳ (P) của ô cơ sở là $57 \mu\text{m}$, chiều rộng của lớp đệm GaAs và SRR là $54 \mu\text{m}$ và $50 \mu\text{m}$. Độ rộng vành và khe trong của cấu trúc SRR là $4 \mu\text{m}$. Mẫu chế tạo có độ uốn dẻo tốt, được thể hiện qua hình ảnh bọc mẫu trên lọ nhựa (Hình 1.32(c)).



Hình 1.31. (a) Hình minh họa của MA có thể điều khiển bằng quang học được chiếu sáng bởi chùm tia 800 nm và (b) ô đơn vị của MA (mặt trên và mặt cắt) [76].

Kết quả đo đặc phổ hấp thụ ở các công suất chiếu sáng khác nhau được thể hiện trong Hình 1.33. Khi không có chùm tới 800 nm , hai cộng hưởng xuất hiện ở tần số THz, với độ hấp thụ tương ứng là 80% ở $0,78 \text{ THz}$ và trên 99% ở $1,75 \text{ THz}$. Khi có chùm tia tới, cường độ cộng hưởng giảm và độ hấp thụ giảm khi công suất bơm tăng từ 0 mW lên $3,2 \text{ mW}$. Với công suất bơm cao hơn $6,4 \text{ mW}$, cộng hưởng ở tần số thấp giảm và cộng hưởng ở tần số cao dịch chuyển về phía thấp. Độ phẩm chất của các cộng hưởng giảm khi công suất bơm tăng lên và MA đạt được đặc trưng hấp thụ dải rộng ở mức công suất bơm trung bình. Khi công suất bơm tăng đến $25,6 \text{ mW}$, một đỉnh hấp thụ cộng hưởng xuất hiện ở tần số $0,95 \text{ THz}$ với độ phẩm chất tương

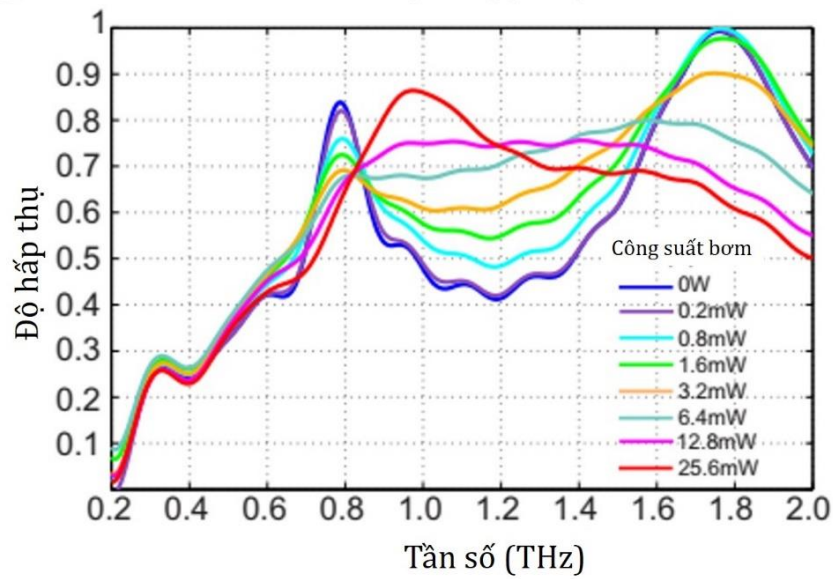
đổi cao. Hệ số phản xạ được điều chỉnh 25% ở tần số cộng hưởng thấp hơn và 40% ở tần số cao hơn với công suất bơm 25,6 mW.



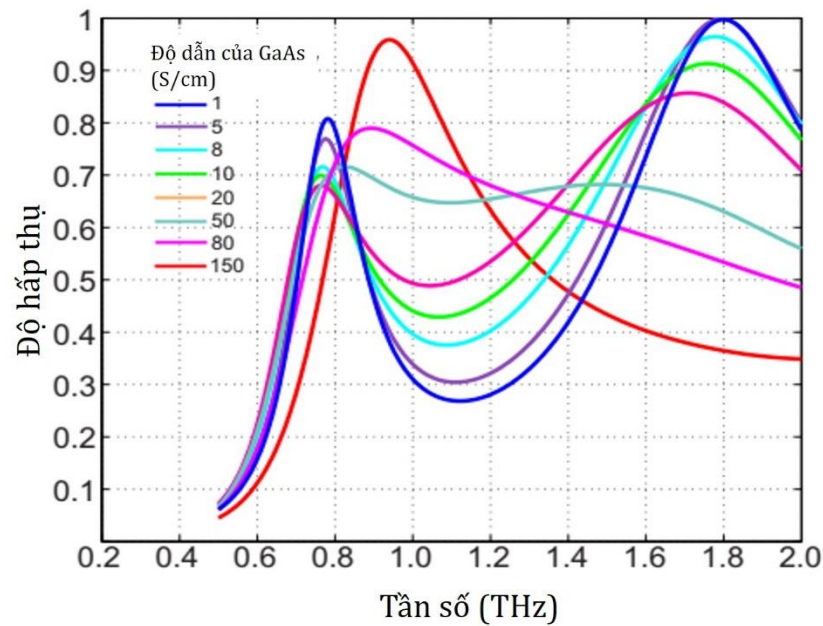
Hình 1.32. Hình ảnh MA được chế tạo. (a) Hình ảnh hiển vi của MA; (b) ảnh phóng đại một ô cơ sở eSRR, $l_i = 54 \mu\text{m}$, $l = 50 \mu\text{m}$, $w = 4 \mu\text{m}$, $g = 4 \mu\text{m}$, $P = 57 \mu\text{m}$ và (c) MA được bọc trong lọ nhựa [76].

Các kết quả mô phỏng về sự phụ thuộc của độ hấp thụ theo độ dẫn điện của lớp GaAs được thể hiện trong Hình 1.34. Với độ dẫn điện của GaAs tăng từ 1 S/cm lên 150 S/cm, sự thay đổi về độ hấp thụ mô phỏng cho thấy một xu hướng tương tự với kết quả thử nghiệm [Hình 1.33]. Khi độ dẫn của GaAs thấp, có hai chế độ cộng hưởng, trong khi chỉ tồn tại một đỉnh hấp thụ duy nhất khi độ dẫn của GaAs cao.

Kết quả mô phỏng độ hấp thụ phù hợp tốt với kết quả thực nghiệm. Điều này chỉ ra rằng sự điều chỉnh tính chất hấp thụ của MA bắt nguồn từ sự thay đổi độ dẫn do kích thích quang. Bằng cách kiểm soát độ dẫn điện của GaAs, có thể chuyển đổi tính chất hấp thụ giữa ba chế độ làm việc, (1) bộ hấp thụ đa đỉnh, (2) bộ hấp thụ dải rộng và (3) bộ hấp thụ đơn đỉnh.



Hình 1.33. Phổ hấp thụ đo đạc ở các công suất chiếu sáng khác nhau [76].



Hình 1.34. Mô phỏng phổ hấp thụ với độ dẫn khác nhau của GaAs [76].

Có thể thấy rằng, trong số các phương pháp đã nêu trên, phương pháp điều khiển bằng cơ học và điện áp có khả năng áp dụng đơn giản và hiệu quả trong việc điều khiển tính chất của MA. Việc thay đổi cấu trúc của MA bằng cơ học cho phép điều chỉnh khá chính xác đáp ứng điện từ của vật liệu, và cho phép điều chỉnh động trong thời gian thực. Phương pháp cơ học mang lại sự đơn giản trong thiết kế và chế tạo cấu trúc vật liệu biến hóa, tạo điều kiện thuận lợi cho việc sản xuất quy mô lớn để ứng dụng trong các thiết bị. Đối với điều khiển bằng điện áp, phương pháp này cung cấp khả năng điều khiển tốc độ, có độ chính xác cao và có thể lập trình. Điều

này rất phù hợp với các ứng dụng yêu cầu điều chỉnh tức thời hoặc cần các chức năng phức tạp. Hơn nữa, điều khiển điện cho phép MA dễ được tích hợp với các hệ thống điện tử, tạo điều kiện giao tiếp liền mạch với các bộ phận khác và nâng cao tính linh hoạt của thiết bị dựa trên MA. Vì thế, các MA có thể điều khiển bằng tác động ngoại vi cơ học và điện áp là các đối tượng được đặc biệt quan tâm nghiên cứu và có nhiều tiềm năng ứng dụng trong thực tế.

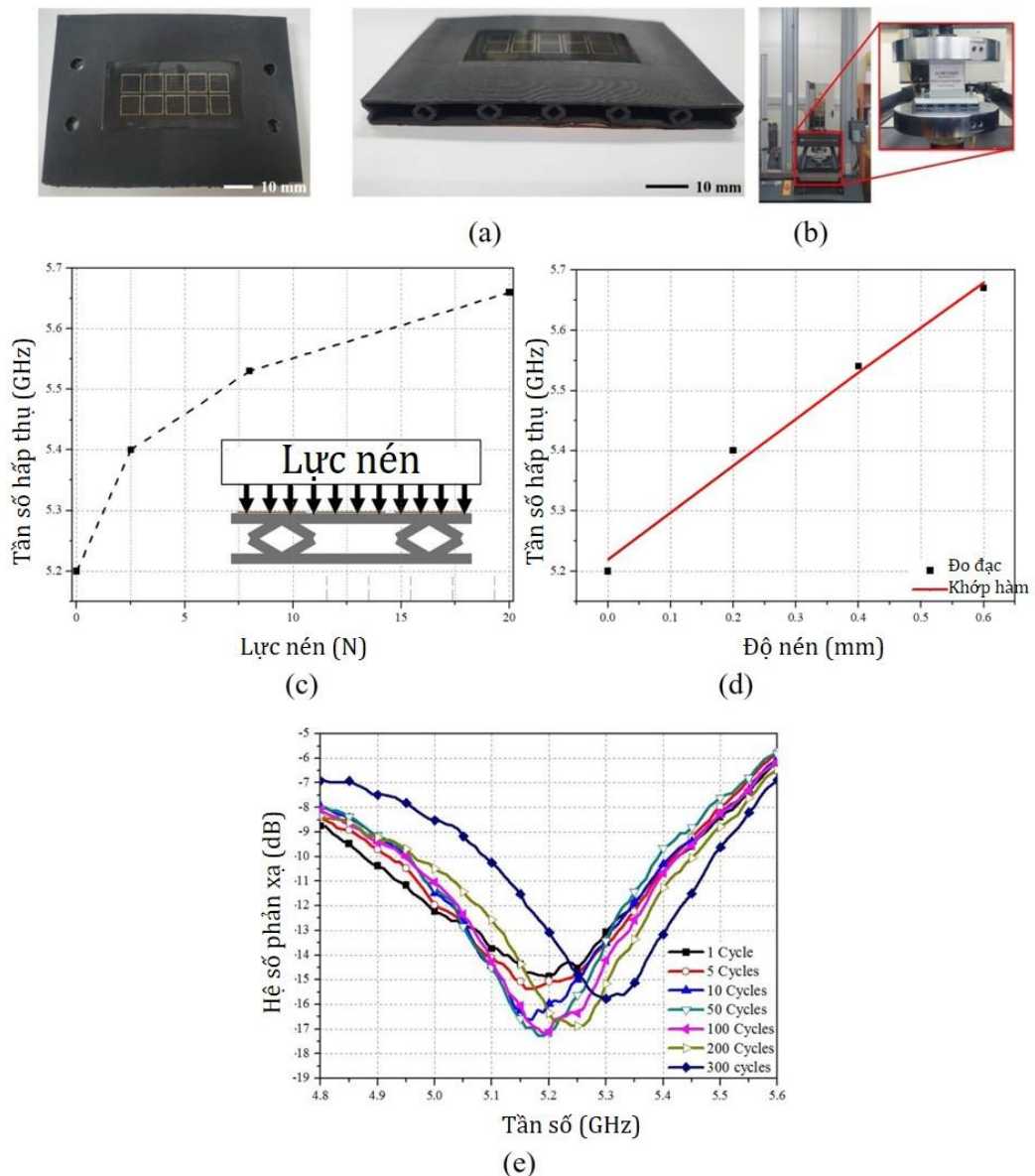
1.3. Tiềm năng ứng dụng của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ điều khiển bằng tác động ngoại vi cơ học và điện áp

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

Cảm biến lực là thiết bị được sử dụng để đo và giám sát mức áp lực trong nhiều ứng dụng khác nhau đặc biệt là trong lĩnh vực công nghiệp. Cảm biến được thiết kế để phát hiện và chuyển đổi áp lực vật lý tác dụng lên chúng thành tín hiệu điện, và sau đó, tín hiệu này có thể được xử lý và phân tích thêm. Cảm biến lực có nhiều ứng dụng trong các lĩnh vực như ô tô, hàng không vũ trụ, tự động hóa công nghiệp, thiết bị y tế và điện tử tiêu dùng. Nhìn chung, cảm biến áp suất có thể dựa trên các nguyên lý khác nhau như cơ chế cảm biến áp điện, điện dung, hoặc quang học. Những cảm biến này đã đóng một vai trò quan trọng trong việc cho phép đo áp lực chính xác trong các môi trường và điều kiện khác nhau. Gần đây, những tiến bộ trong kỹ thuật và khoa học vật liệu đã dẫn đến sự xuất hiện của một loại cảm biến lực dựa trên MM.

Năm 2020, Heijun Jeong và các cộng sự đã tạo ra một cảm biến lực điện từ mới sử dụng MA chế tạo bằng phương pháp in 3D [77]. Các nhà nghiên cứu đã sử dụng kết hợp các phương pháp in 3D và in phun để tạo ra các lớp chất nền và lớp dẫn điện tương ứng. Bằng phương pháp in 3D, vật liệu nhựa dẻo đã được sử dụng để tạo ra cấu trúc khung có thể nén tuyến tính. Mực in bạc được in phun lên để điện môi SU-8 và tạo thành các cấu trúc cộng hưởng dạng vòng. Sau đó, tấm điện môi bao gồm các cấu trúc cộng hưởng này được gắn lên mặt trên của khung nhựa dẻo. Mặt dưới của khung nhựa dẻo là một lớp kim loại liên tục có tác dụng chặn sóng điện từ truyền qua.

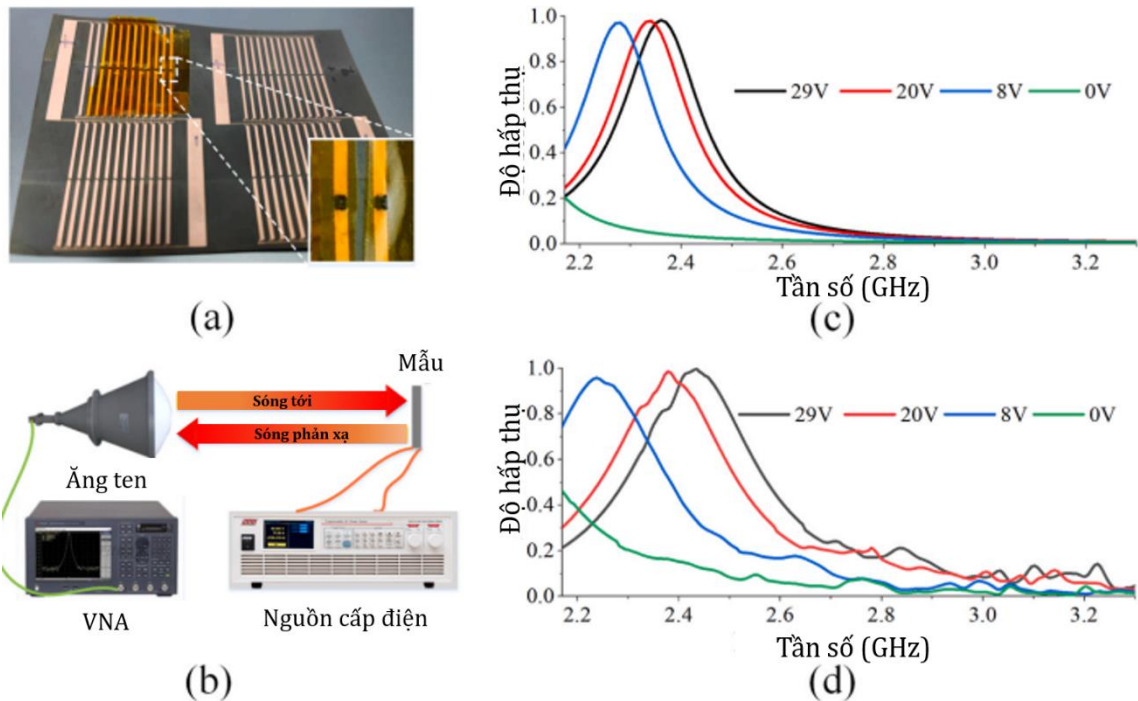
Về nguyên lý, toàn bộ sensor có cấu trúc và hoạt động giống như một MA. Ở đó, sự thay đổi độ dày sẽ ảnh hưởng đến trở kháng của MA, do đó ảnh hưởng đến tần số cộng hưởng của cấu trúc khi bị biến dạng. Khả năng hoạt động của cảm biến được đề xuất đã được kiểm chứng thông qua mô phỏng số và thử nghiệm trên mẫu được chế tạo (Hình 1.35). 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 nhờ đặc tính đàn hồi của vật liệu in 3D.



Hình 1.35. (a) Mẫu cảm biến lực dựa trên MA được chế tạo. (b) Mô hình đo đạc. Kết quả đo đạc sự biến đổi của tần số hấp thụ theo (c) lực nén và (d) độ nén. (e) Phổ phản xạ đo đạc theo các chu kỳ lặp lại của cảm biến áp lực [77].

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

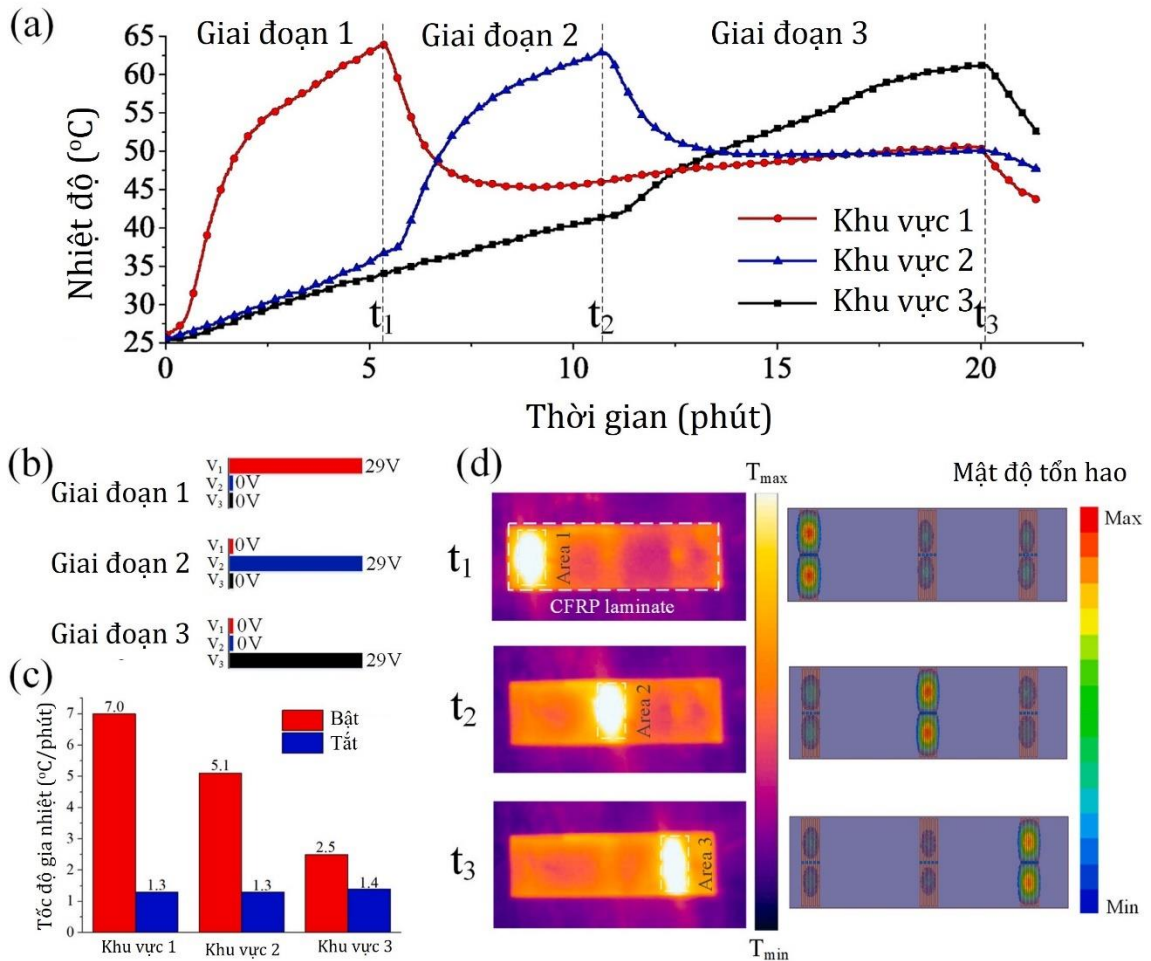
Điều chỉnh nhiệt trong vật liệu carbon đã thu hút sự quan tâm rất nhiều trong nhiều lĩnh vực khác nhau. So với các kỹ thuật đốt nóng dẫn hiện có, đốt nóng bằng vi sóng có nhiều lợi thế như không tiếp xúc, đáp ứng nhiệt độ nhanh chóng và chính xác, tiêu thụ năng lượng thấp, ... Tuy nhiên, việc thực hiện điều chỉnh nhiệt theo yêu cầu trong thời gian thực bằng vi sóng vẫn gặp khó khăn, do thiếu phương pháp kiểm soát hiệu quả các đặc trưng điện từ. Vào năm 2023, Di Li và các cộng sự đề xuất một giải pháp để thực hiện điều chỉnh nhiệt bằng vi sóng theo yêu cầu trong thời gian thực dựa trên MA có thành phần cấu tạo từ carbon (Hình 1.36) [78].



Hình 1.36. (a) Mẫu chế tạo MA điều khiển bằng điện áp và (b) cấu hình đo đạc. Phổ hấp thụ sóng điện từ (c) mô phỏng và (d) thực nghiệm với các điện áp phân cực khác nhau [78].

Mẫu MA được chế tạo bao gồm các cấu trúc cộng hưởng dạng dây bị cắt (cut wire – CW) sắp xếp tuần hoàn trên lớp điện môi polyimide và một lớp vật liệu tổ hợp sợi carbon/epoxy liên tục ở dưới cùng. Các diode biến thiên SMV1430-040LF được tích hợp vào giữa các CW, với giá trị điện dung có thể điều chỉnh từ 1,24 pF đến 0,31 pF khi điện áp phân cực thay đổi từ 0 V đến 30 V. Kết quả đo đạc bằng VNA phù hợp tốt với kết quả mô phỏng, cho thấy đỉnh phổ hấp thụ dịch về phía tần số cao khi

điện áp tăng dần. Do đó, độ hấp thụ của MA được thiết kế ở tần số làm việc 2,45 GHz có thể thay đổi từ 12,1% đến 99,6% trong khi điện áp phân cực thay đổi từ 0 V đến 29 V. Kết quả này cho thấy đặc trưng hấp thụ của MA được điều khiển hiệu quả thông qua điện áp ngoài.

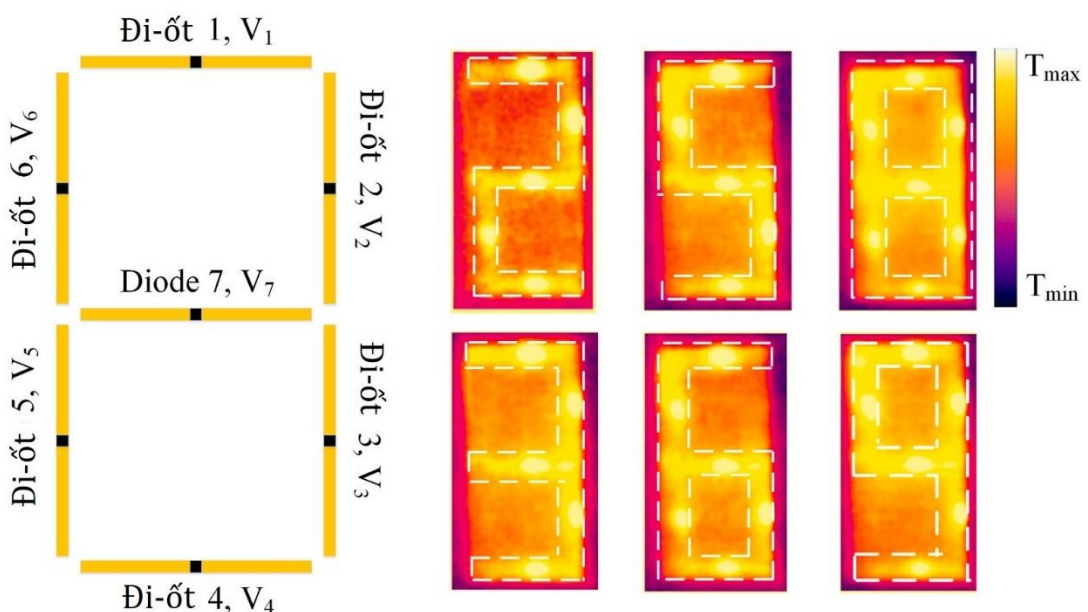


Hình 1.37. (a) Phân bố nhiệt độ của các khu vực mục tiêu; (b) Chiến lược kiểm soát điện áp ở các giai đoạn khác nhau; (c) Tốc độ gia nhiệt trung bình của các khu vực mục tiêu ở trạng thái bật và tắt; (d) Hình ảnh nhiệt của vật liệu carbon ở cuối mỗi giai đoạn và kết quả mô phỏng mật độ tổn hao thể tích tương ứng [78].

Bằng cách khai thác MA có khả năng điều khiển bằng điện áp ngoài, Di Li và các cộng sự đã đề xuất các ứng dụng liên quan đến điều khiển nhiệt độ và ảnh nhiệt. Trong thử nghiệm này, một lò vi sóng hình bát giác tự phát triển được trang bị mười hai nguồn vi sóng 2,45 GHz đã được sử dụng làm thiết bị gia nhiệt. Các thí nghiệm gia nhiệt bằng vi sóng đã được tiến hành để chứng minh khả năng thao tác nhiệt của phương pháp đề xuất. Trong cài đặt thử nghiệm, có 3 khu vực gia nhiệt mục tiêu trên

mẫu vật liệu. Trong mỗi khu vực, 5 cấu trúc cộng hưởng có chung điện áp phân cực đã được tích hợp. Như đã khảo sát trước đó, độ hấp thụ của MA có thể được điều chỉnh liên tục trong khoảng 12,1%-99,6%. Do đó, hai trạng thái đặc trưng là trạng thái “bật” khi $V_b = 29 \text{ V}$ và trạng thái “tắt” khi $V_b = 0 \text{ V}$ đã được thử nghiệm. Bằng cách điều chỉnh độc lập điện áp phân cực ở từng khu vực, sự phân bố nhiệt độ đã được thay đổi tương ứng. Ở mặt sau của mẫu ở mỗi khu vực, một cảm biến sợi quang được sử dụng để theo dõi nhiệt độ thời gian thực của vật liệu carbon.

Hình 1.37 trình bày kết quả quá trình gia nhiệt được chia thành 3 giai đoạn. Trong giai đoạn đầu tiên, điện áp nghịch được đặt vào là 29 V ở khu vực số 1 và 0 V ở các khu vực khác. Bằng cách này, các cấu trúc cộng hưởng trong khu vực số 1 đã được kích hoạt và tốc độ gia nhiệt tương đối cao đã được quan sát trong khu vực số 1. Kết quả là, vào cuối giai đoạn đầu tiên, nhiệt độ trong khu vực số 1 tăng lên 63 °C trong khi nhiệt độ tối đa trong các khu vực khác khoảng 36 °C. Khi quá trình đốt nóng tiếp tục vào giai đoạn thứ hai, chỉ có các cấu trúc cộng hưởng trong khu vực số 2 được kích hoạt, nhiệt độ trong khu vực số 1 giảm nhanh và tốc độ gia nhiệt trong khu vực số 2 nhanh hơn so với các khu vực khác. Cuối cùng, cùng một quy luật phân bố nhiệt độ đã được quan sát thấy trong giai đoạn thứ ba. Hình ảnh nhiệt ghi nhận tại cuối mỗi giai đoạn cũng cho thấy khả năng điều khiển nhiệt độ một cách độc lập theo từng khu vực bằng điện áp ngoài.



Hình 1.38. Hiển thị ảnh nhiệt của các chữ số [78].

Bên cạnh đó, nhóm nghiên cứu cũng đã biểu diễn khả năng hiển thị ảnh nhiệt theo mong muốn bằng điều khiển các pixel dựa trên MA. Như được minh họa trong Hình 1.38, các cấu trúc cộng hưởng đã được đặt theo hình dạng của số "8". Bên cạnh đó, trong quá trình thực nghiệm, để ngăn chặn sự truyền nhiệt làm mờ hình ảnh, thời gian làm nóng được đặt là 30 giây. Bằng cách điều khiển độc lập điện áp ngoài tác động lên các diode, ảnh nhiệt của các chữ số bao gồm "2", "3", "5", "6", "8" và "9" đã xuất hiện. Kết quả này cho thấy khả năng hiển thị nhiệt tốt của các chữ số Ả Rập khi sử dụng MA điều khiển bằng điện áp ngoài.

1.4. Kết luận chương 1

Trong chương này, nghiên cứu sinh đã giới thiệu tổng quan về vật liệu biến hóa điều khiển bằng tác động ngoại vi. Trước tiên, luận án đã trình bày về MA và nguyên lý hoạt động. Bên cạnh đó, các nguyên lý điều khiển tính chất điện từ bằng tác động ngoại vi như tác động cơ học, điện áp ngoài, từ trường ngoài, nhiệt độ và quang học cũng đã được phân tích và đánh giá. Trong đó, các phương pháp điều khiển bằng cơ học và điện áp cho thấy nhiều tiềm năng ứng dụng trong việc điều khiển tính chất của MA nhờ khả năng đơn giản và thuận tiện trong chế tạo hoặc khả năng đáp ứng tức thời và dễ dàng tích hợp trong thiết bị điện tử. Qua đó, một số ứng dụng tiềm năng của MA điều khiển bằng tác động ngoại vi cơ học và điện áp như cảm biến lực và ảnh nhiệt cũng đã được giới thiệu trong chương này.

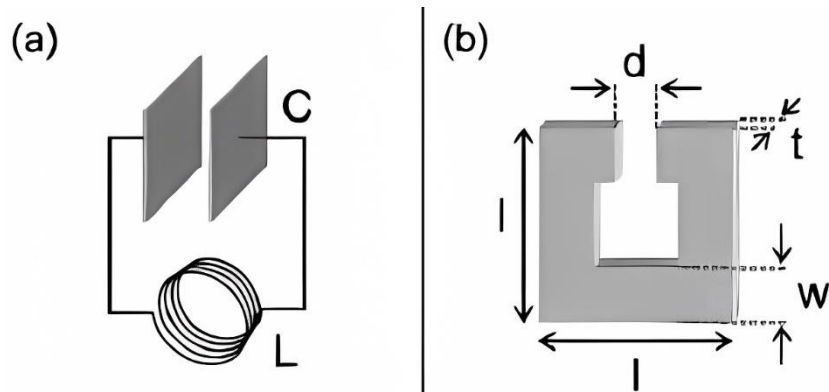
Dựa trên những kiến thức và hiểu biết cơ bản thu được trong Chương 1 về vật liệu biến hóa và cách thức điều khiển đặc trưng hấp thụ của vật liệu biến hóa bằng tác động ngoại vi, nghiên cứu sinh đã xác định được nội dung nghiên cứu chính của luận án là nghiên cứu, thiết kế hoặc chế tạo các cấu trúc vật liệu biến hóa có thể điều khiển được các đặc trưng hấp thụ như độ hấp thụ và tần số hấp thụ bằng các tác động cơ học như xoay, kéo-gấp và uốn cong, cũng như điều khiển bằng điện áp. Bên cạnh đó, nghiên cứu của luận án cũng hướng đến tạo ra vật liệu biến hóa đa chức năng có thể chuyển đổi linh hoạt giữa chức năng hấp thụ và chức năng chuyển đổi góc phân cực của sóng điện từ.

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

Như ta đã biết rõ từ tính điện cơ bản, mômen lưỡng cực từ có thể được xác định bằng dòng điện tròn của một cuộn dây cực nhỏ dẫn đến một mômen từ riêng lẻ được cho bởi tích của dòng điện và diện tích cuộn dây. Vectơ momen lưỡng cực này hướng vuông góc với mặt phẳng của cuộn dây. Nếu một cuộn dây như vậy được kết hợp với một bản tụ điện, người ta mong đợi một dòng điện tăng lên ở tần số cộng hưởng xác định, do đó, mô men lưỡng cực từ tăng lên. Vì vậy, một thiết kế phổ biến cho các “nguyên tử” từ tính là bất chước mạch LC thông thường, bao gồm một bản tụ điện có điện dung C và một cuộn dây từ tính có độ tự cảm L , trên thang đo nhỏ hơn nhiều so với bước sóng ánh sáng tương ứng [79].



Hình 2.1. (a) Mô hình mạch tương đương và (b) hình dạng của cấu trúc cộng hưởng SRR [79].

Vị trí của tần số cộng hưởng LC dự đoán có thể được ước tính bằng phương pháp cơ bản sau: giả sử có thể mô tả điện dung bằng công thức thông thường cho một tụ điện lớn với các bản cực gần nhau ($C \propto$ diện tích/khoảng cách bản cực) và độ tự cảm bằng công thức cuộn dây dài với N cuộn dây cho $N = 1$ ($L \propto$ diện tích/chiều dài cuộn dây). Sử dụng kí hiệu của Hình 2.1, tức là chiều rộng của kim loại w , kích thước khe hở của tụ điện d , độ dày kim loại t và chiều rộng của cuộn dây l , chúng ta có

$$C = \epsilon_0 \epsilon_C \frac{wt}{d} \quad (2.1)$$

với hằng số điện môi tương đối của vật liệu ở giữa các bản ϵ_C , và

$$L = \mu_0 \frac{l^2}{t} \quad (2.2)$$

Điều này dẫn đến tần số riêng

$$\omega_{LC} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{L} \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_C}} \sqrt{\frac{d}{w}} \propto \frac{1}{size} \quad (2.3)$$

và bước sóng cộng hưởng LC

$$\lambda_{LC} = \frac{2\pi c_0}{\omega_{LC}} = 2\pi l \sqrt{\epsilon_C} \sqrt{\frac{w}{d}} \propto size \quad (2.4)$$

Mặc dù đơn giản, công thức này chứa rất nhiều cơ sở vật lý chính xác, như đã được xác nhận bằng các tính toán số: đầu tiên, nó cho chúng ta biết rằng bước sóng cộng hưởng LC tỷ lệ thuận với kích thước tuyến tính của cuộn dây l , miễn là tỷ lệ w/d là cố định. Tỷ lệ này có giá trị miễn là vật liệu thực sự thể hiện tính chất giống như kim loại, nghĩa là tần số cộng hưởng LC nhỏ hơn nhiều so với tần số plasma kim loại ω_{pl} . Thứ hai, đối với các tham số liên quan ($\epsilon_C \geq 1$ và $w \approx d$), hệ số tiền tố thường ở bậc mười, tức là,

$$\lambda_{LC} \approx 10 \times l \quad (2.5)$$

Do đó, có thể sắp xếp các SRR này dưới dạng một mảng trong mặt phẳng xy sao cho hằng số mạng a_{xy} nhỏ hơn nhiều so với bước sóng cộng hưởng, tức là $a_{xy} \ll \lambda_{LC}$. Ví dụ: đối với bước sóng vô tuyến $\lambda_{LC} = 1,5 \mu\text{m}$, kích thước tuyến tính của cuộn dây cần phải ở mức $l = 150 \text{ nm}$, có nghĩa là kích thước tối thiểu khoảng 50 nm hoặc nhỏ hơn. Trong các điều kiện này, các giá trị đại diện cho điện dung và độ tự cảm lần lượt là $C \approx 1 \text{ aF}$ và $L \approx 1 \text{ pH}$. Thứ ba, môi trường điện môi ảnh hưởng đến sự cộng hưởng thông qua C , ví dụ, được biến đổi bởi sự có mặt của đế điện môi. Thứ tư, nếu thu hẹp khoảng cách, tức là trong giới hạn $d \rightarrow 0$ hoặc $C \rightarrow \infty$, thì bước sóng cộng hưởng sẽ tiến đến vô cùng, hay tương đương, tần số cộng hưởng ω_{LC} bằng không.

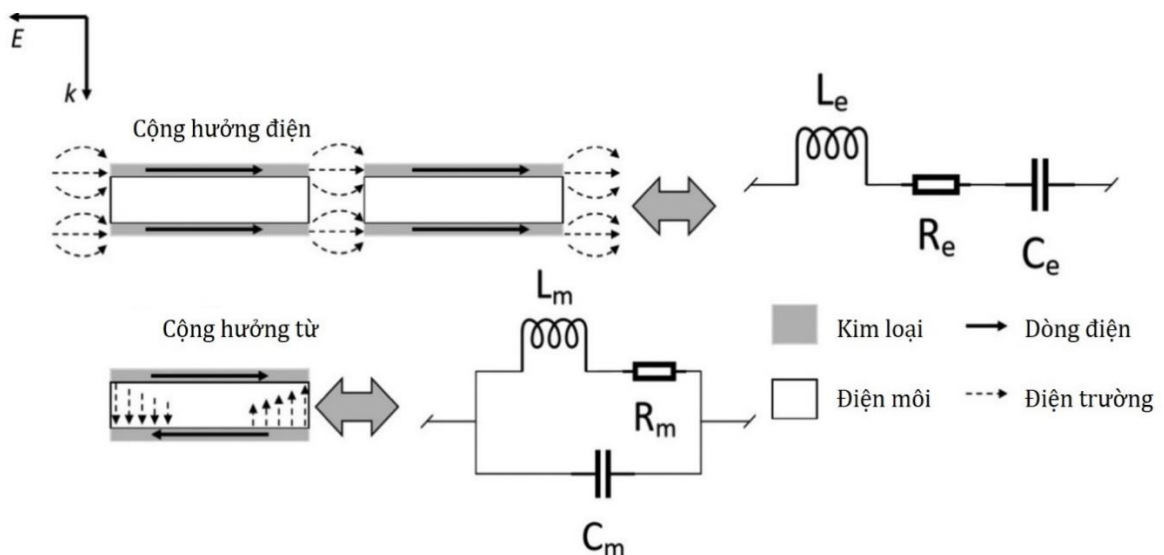
Bên cạnh cấu trúc SRR, cấu trúc dạng CWP với các ô đơn vị giống hệt nhau được làm bằng hai lớp kim loại song song có hình dạng hình học tùy ý. Tần số cộng hưởng của MM phụ thuộc và có thể được tính toán dựa trên hình dáng cụ thể của các lớp kim loại này [67].

Về nguyên lý cộng hưởng, khi sóng tới tương tác với với MM, từ trường bên ngoài cảm ứng ra các dòng điện phản song song chạy trên hai bản dẫn đối diện, từ đó sinh ra từ trường thứ cấp. Khi đó, hai lớp kim loại tương đương với một cuộn cảm L_m , trong khi khoảng cách giữa chúng đóng vai trò như một tụ điện C_m . Do đó, toàn bộ cấu trúc có thể được coi là một mạch LC cộng hưởng [80,81]. Ở tần số cộng hưởng

f_m (cộng hưởng từ), do triệt tiêu điện kháng cảm ứng và điện dung, dòng điện cảm ứng là cực đại, làm cực đại tổn hao Ohmic sinh ra theo định luật Joule - Lenz.

Trong khi đó, điện trường ngoài gây ra các dòng điện song song trên các dây dẫn. Điều này cũng làm cho chúng tương đương với một cuộn cảm khác L_e . Cuộn cảm này khác với L_m do phân bố dòng điện ở hai trường hợp là khác nhau. Lúc này, khoảng cách giữa hai ô đơn vị liền kề mới đóng vai trò như tụ điện C_e . Về cơ bản, cơ chế cảm ứng của cộng hưởng điện f_e tương tự như cộng hưởng từ. Điểm khác biệt cơ bản là điện trường ngoài là tác nhân chính gây ra cộng hưởng thay vì từ trường ngoài.

Thực tế là từ trường và điện trường luôn cùng tồn tại có nghĩa là hai mô hình mạch cũng tồn tại đồng thời. Tuy nhiên, do độ tự cảm và điện dung tương đương khác nhau, cộng hưởng từ và cộng hưởng điện thường xảy ra ở các tần số khác nhau trong đa số trường hợp. Tại f_m , dòng điện cảm ứng bởi từ trường là đáng kể, trong khi dòng điện cảm ứng bởi điện trường yếu hơn nhiều và ngược lại. Do các cộng hưởng điện và từ có thể được tính toán thông qua thông số cấu trúc của vật liệu. Trong một số trường hợp đặc biệt, bằng cách thiết kế cấu trúc hình học của hai tấm kim loại song song một cách phù hợp, hai tần số cộng hưởng này có thể được điều khiển để chồng chập lên nhau nhằm tăng cường sự tổn hao tại tần số cộng hưởng.

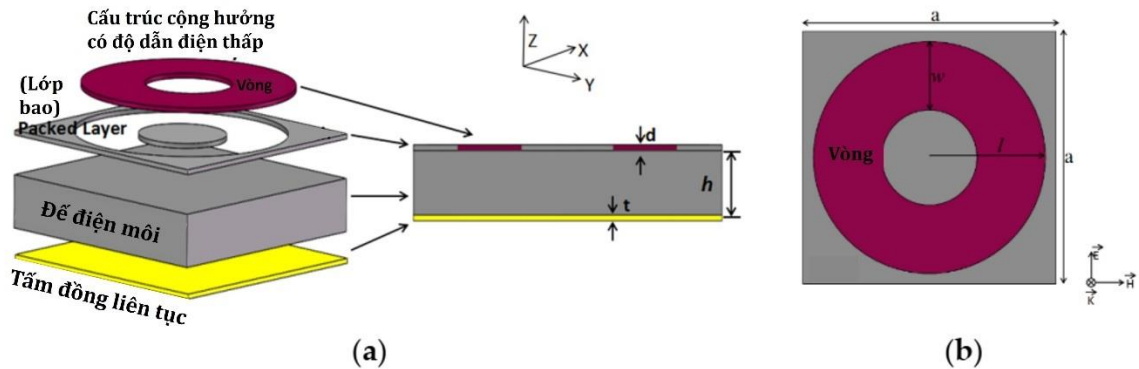


Hình 2.2. Sự phân bố dòng điện và điện trường được đơn giản hóa, và mô hình mạch tương đương của CWP ở chế độ cộng hưởng điện và từ [67].

2.1.2. Trở kháng của vật liệu

Đối với các MM mà tính chất phản xạ của vật liệu được đặc biệt quan tâm, ví dụ như MA, phương pháp tính toán trở kháng của vật liệu là một phương pháp thường

được sử dụng để góp phần làm rõ đặc trưng phản xạ của vật liệu. Ô cơ sở của một MA hoạt động ở vùng tần số GHz được thể hiện trong Hình 2.3 [82]. Cấu trúc MA được đề xuất có bốn thành phần: một lớp cấu trúc cộng hưởng dạng vòng (FSS) có độ dẫn điện thấp, một lớp điện môi cùng độ dày bao bọc vòng cộng hưởng, một lớp điện môi tương tự ở dạng liên tục và một tấm đồng liên tục ở dưới cùng. Các thông số hình học tối ưu của MA như sau: $a = 8,5 \text{ mm}$, $l = 3,9 \text{ mm}$, $w = 2,3 \text{ mm}$, $t = 0,017 \text{ mm}$, $d = 0,1 \text{ mm}$ và $h = 1,1 \text{ mm}$. Cấu trúc cộng hưởng dạng vòng được làm bằng vật liệu có độ điện thẩm là 3,4 và độ dẫn điện σ là 100 S/m . Vật liệu điện môi có độ điện thẩm là 3,5 được dùng làm chất lớp điện môi liên tục và lớp điện môi bao bọc vòng cộng hưởng. Độ dẫn điện của tấm đồng là $\sigma = 5,8 \times 10^7 \text{ S/m}$.



Hình 2.3. Mô hình cấu trúc của MA đề xuất hoạt động ở vùng tần số GHz [82].

Phổ hấp thụ mô phỏng của MA đề xuất được trình bày trên Hình 2.4. Ta có thể quan sát thấy hai tần số cộng hưởng tại 28,93 và 38,00 GHz với độ hấp thụ tương ứng là 94,1% và 98,0%. Đồng thời, độ hấp thụ của MA duy trì trên 90% trong dải tần số từ 24,1 đến 42,6 GHz, tương ứng với độ rộng dải hấp thụ là 18,5 GHz. Độ rộng tương đối của dải tần hấp thụ có thể được tính theo công thức [82]:

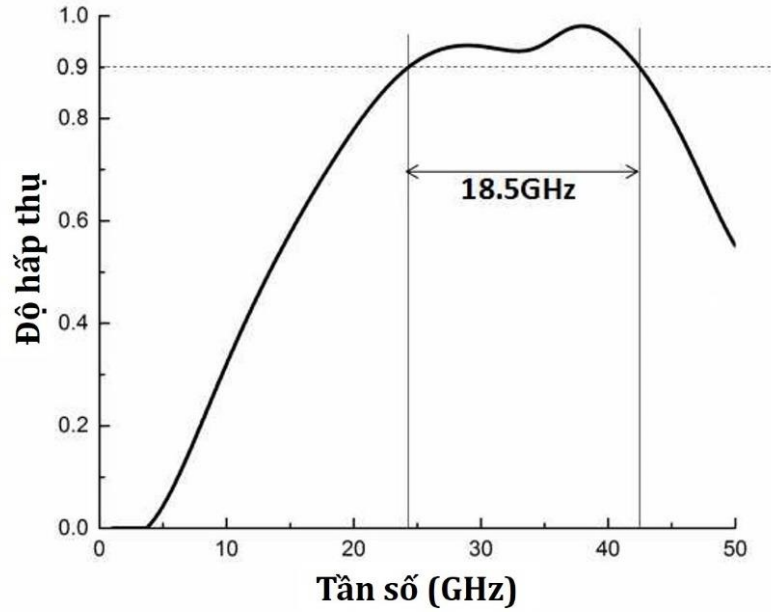
$$W_{RAB} = 2(f_U - f_L) / (f_U + f_L) \quad (2.6)$$

với f_U và f_L tương ứng tần số cận trên và tần số cận dưới của vùng tần số có độ hấp thụ lớn hơn 90%. Kết quả tính toán cho thấy, độ rộng tương đối của dải tần hấp thụ thu được là 55,47%.

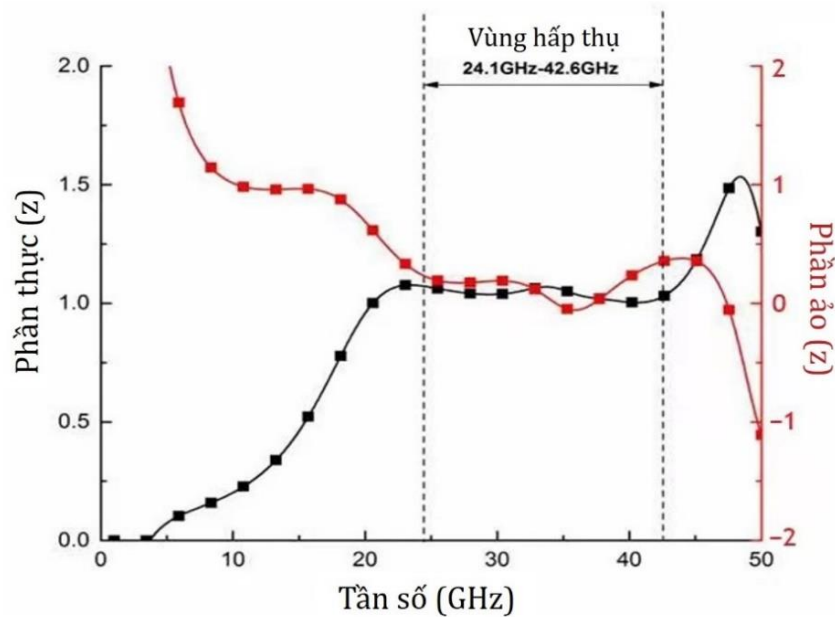
Để làm rõ khả năng hấp thụ của MA, trở kháng của vật liệu được tính theo công thức [82]:

$$Z(f) = \sqrt{\frac{[1 + S_{11}(f)]^2 - [S_{21}(f)]^2}{[1 - S_{11}(f)]^2 - [S_{21}(f)]^2}} \quad (2.7)$$

với $S_{11}(f)$ và $S_{21}(f)$ tương ứng là hệ số phản xạ và hệ số truyền qua của vật liệu.



Hình 2.4. Phổ hấp thụ của MA đề xuất [82].

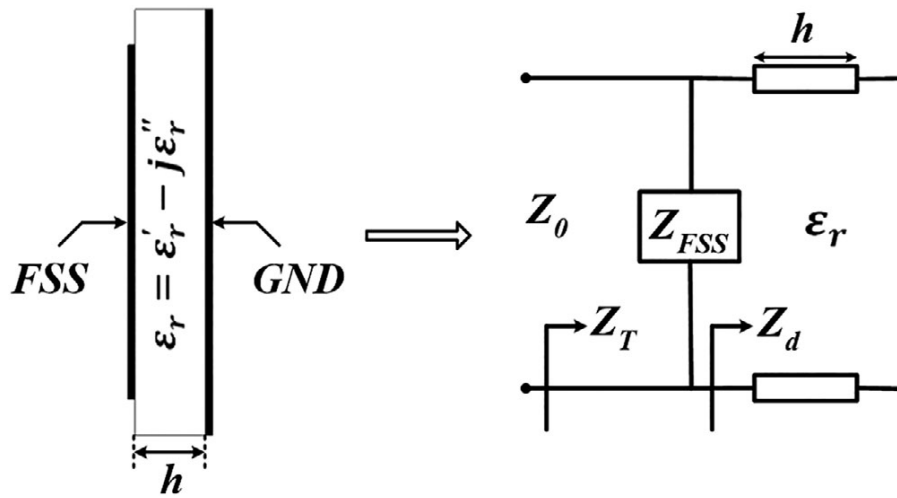


Hình 2.5. Trở kháng hiệu dụng của MA [82].

Hình 2.5 cho thấy phổ trở kháng chuẩn hóa của MA được tính toán. Kết quả cho thấy rằng, các trở kháng tương đối ở hai tần số cộng hưởng cực đại lần lượt là $1,038 + 0,183i$ và $1,018 + 0,055i$. Bên cạnh đó, trong dải tần số từ 24,1 đến 42,6 GHz, phần thực của trở kháng gần như bằng 1 và phần ảo của trở kháng xấp xỉ bằng không. Các giá trị trở kháng này của MA gần như tương tự với trở kháng của không khí. Do điều kiện phối hợp trở kháng giữa MA và vật liệu được thỏa mãn, sóng điện từ tới

vật liệu hầu như không bị phản xạ ngược lại môi trường không khí. Đồng thời, tấm đồng liên tục ở mặt sau của MA của ngăn cản sóng điện từ truyền qua ở vùng tần số vi sóng. Vì thế, sóng điện từ tới chủ yếu bị hấp thụ bên trong vật liệu và MA cho độ hấp thụ cao trên 90% trong dải tần số từ 24,1 đến 42,6 GHz, tương ứng với dải tần số thỏa mãn điều kiện phối hợp trở kháng.

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). Hình 2.6 minh họa mô hình tính toán trở kháng cho cấu trúc MA ba lớp kim loại - điện môi - kim loại dựa trên lý thuyết TL [83].



Hình 2.6. (Trái) Mô hình cấu trúc MA ba lớp kim loại - điện môi - kim loại.

(Phải) Mô hình mạch tương đương dựa trên lý thuyết TL [83].

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:

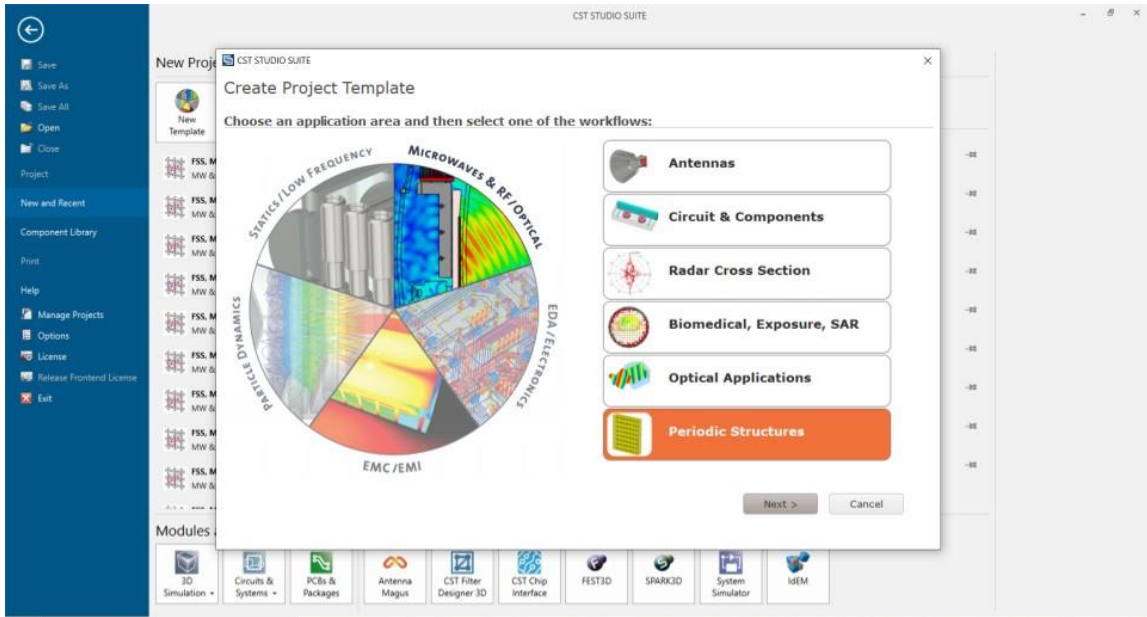
$$Z_d = i \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_d}} \tan(k_0 \sqrt{\epsilon_d} h), \quad (2.8)$$

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 :

$$Z_T = Z_{FSS} // Z_d = \frac{Z_{FSS} Z_d}{Z_{FSS} + Z_d}. \quad (2.9)$$

2.2. Phương pháp mô phỏng vật liệu biến hóa

2.2.1. Phần mềm mô phỏng CST Microwave



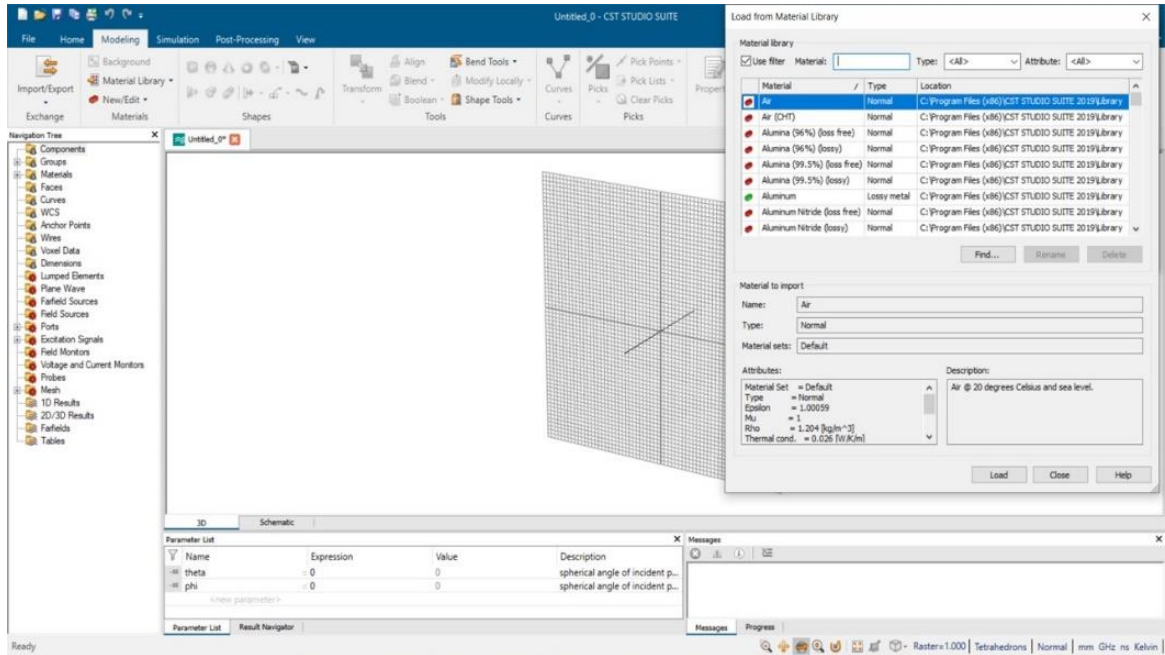
Hình 2.7. Giao diện phần mềm mô phỏng CST Microwave [84].

Đối với lĩnh vực nghiên cứu về vật liệu biến hóa, Computer Simulation Technology, Microwave studio (CST MWS) (Hình 2.7) [84] là một trong những phần mềm thương mại chuyên dùng thường được sử dụng bên cạnh các loại phần mềm khác như Ansys hoặc Comsol Multiphysics. CST MWS là một trong những phần mềm thương mại mô phỏng điện từ 3D, chuyên dùng trong việc thiết kế và nghiên cứu tính chất điện từ của các loại vật liệu, linh kiện và thiết bị. Phần mềm này dựa trên kỹ thuật tích phân hữu hạn (Finite integration technique - FIT), được trình bày vào năm 1977 bởi Thomas Weiland [85,86]. FIT là một lược đồ rời rạc nhất quán cho các phương trình Maxwell ở dạng tích phân của chúng. Không gian trong mô phỏng được chia thành các ô lưới, trong đó các phương trình Maxwell được giải lần lượt cho mỗi ô. Phần mềm cung cấp các tùy chọn chia ô lưới khác nhau, trong đó chủ yếu là các ô lưới dạng là tứ diện hoặc lục diện. Phần mềm CST rất linh hoạt trong việc chia ô lưới và có thể tìm ra những vùng ô lưới cần tinh chỉnh chi tiết hơn trong quá trình mô phỏng. Điều này giúp tiết kiệm thời gian nhưng vẫn duy trì được độ chính xác của quá trình mô phỏng.

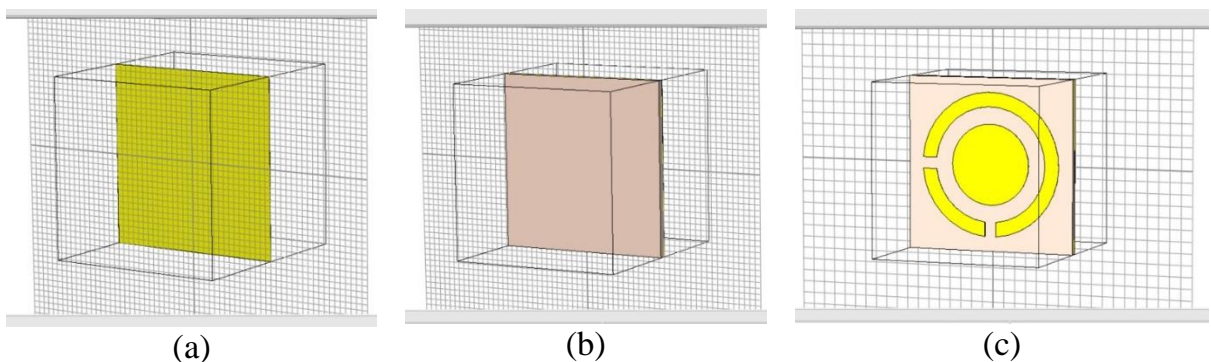
2.2.2. Thiết kế cấu trúc vật liệu

Bước đầu tiên trong quá trình mô phỏng là thiết kế mô hình cấu trúc của vật liệu cần được nghiên cứu. Phần mềm CST có một bộ thư viện đa dạng các loại vật liệu khác nhau đã được kiểm nghiệm bằng nghiên cứu thực nghiệm với các tính chất điện từ đặc trưng như độ dẫn điện, hệ số điện môi, hệ số từ thẩm (Hình 2.8). Đối với

các vật liệu hoạt động ở vùng tần số cao như THz hoặc quang học, các vật liệu được định nghĩa một cách chính xác dựa trên các mô hình hoặc hàm số của điện thẩm hoặc từ thẩm theo tần số như hàm Drude, Lorentz hoặc Debye, ... Bên cạnh đó, các loại vật liệu và linh kiện điện tử đặc thù khác như điện trở, tụ điện, cuộn cảm, diode cũng có thể được định nghĩa và đưa vào trong mô phỏng.



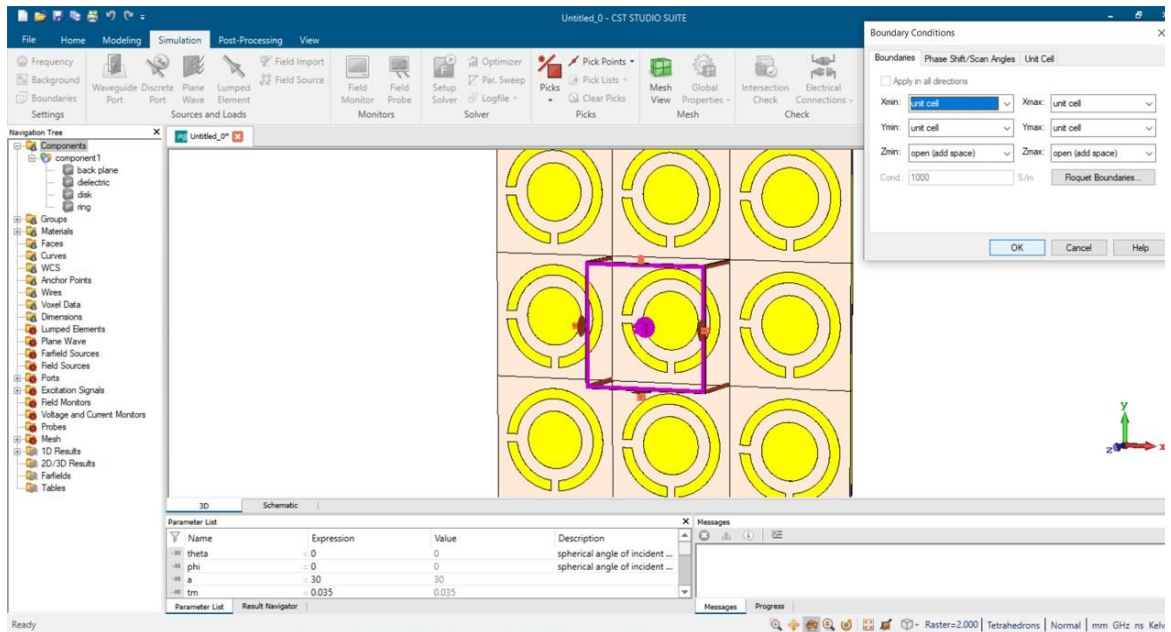
Hình 2.8. Minh họa việc lựa chọn loại vật liệu dùng trong thiết kế cấu trúc vật liệu cần nghiên cứu.



Hình 2.9. Minh họa thiết kế cấu trúc hình học của vật liệu cần nghiên cứu.

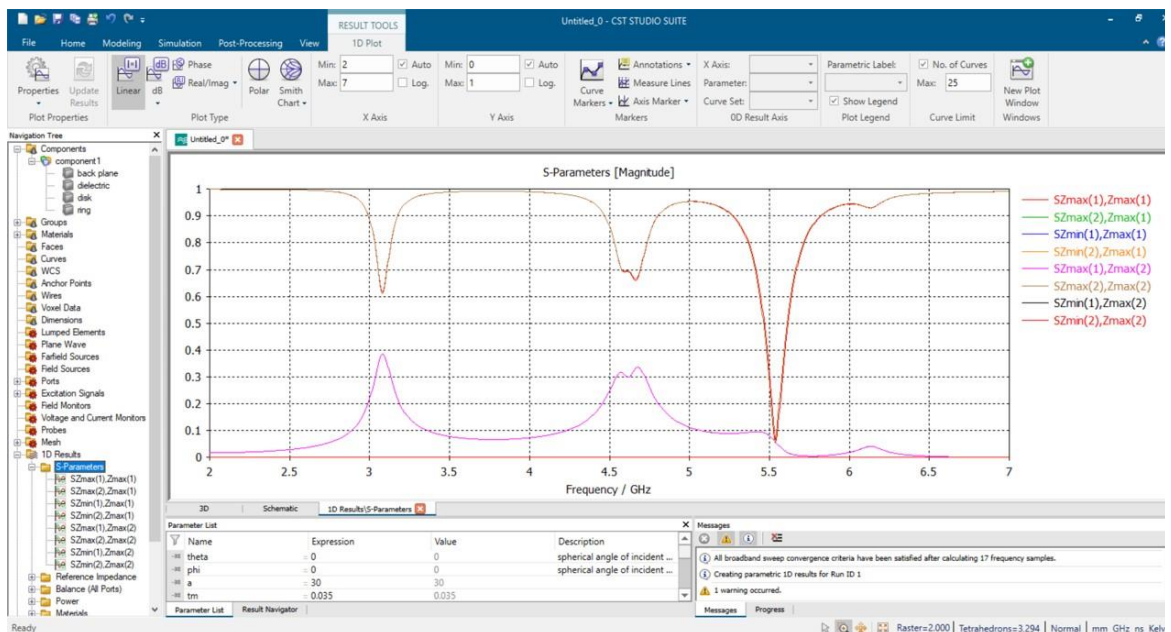
Bước tiếp theo, cấu trúc hình học của vật liệu được thiết kế và mô phỏng. Đối với MM, cấu trúc của vật liệu thường có dạng tuần hoàn. Do đó, trong phần lớn trường hợp, chỉ cần thiết kế ô cơ sở như trên Hình 2.9. Sau đó, điều kiện biên tuần hoàn sẽ được thiết lập để ô cơ sở thiết kế được lặp lại một cách tuần hoàn như trên Hình 2.10.

Như vậy, vật liệu được mô phỏng sẽ tương tự như vật liệu trên thực tế và kết quả mô phỏng sẽ có độ chính xác cao hơn.



Hình 2.10. Minh họa chọn điều kiện biên trong mô phỏng vật liệu.

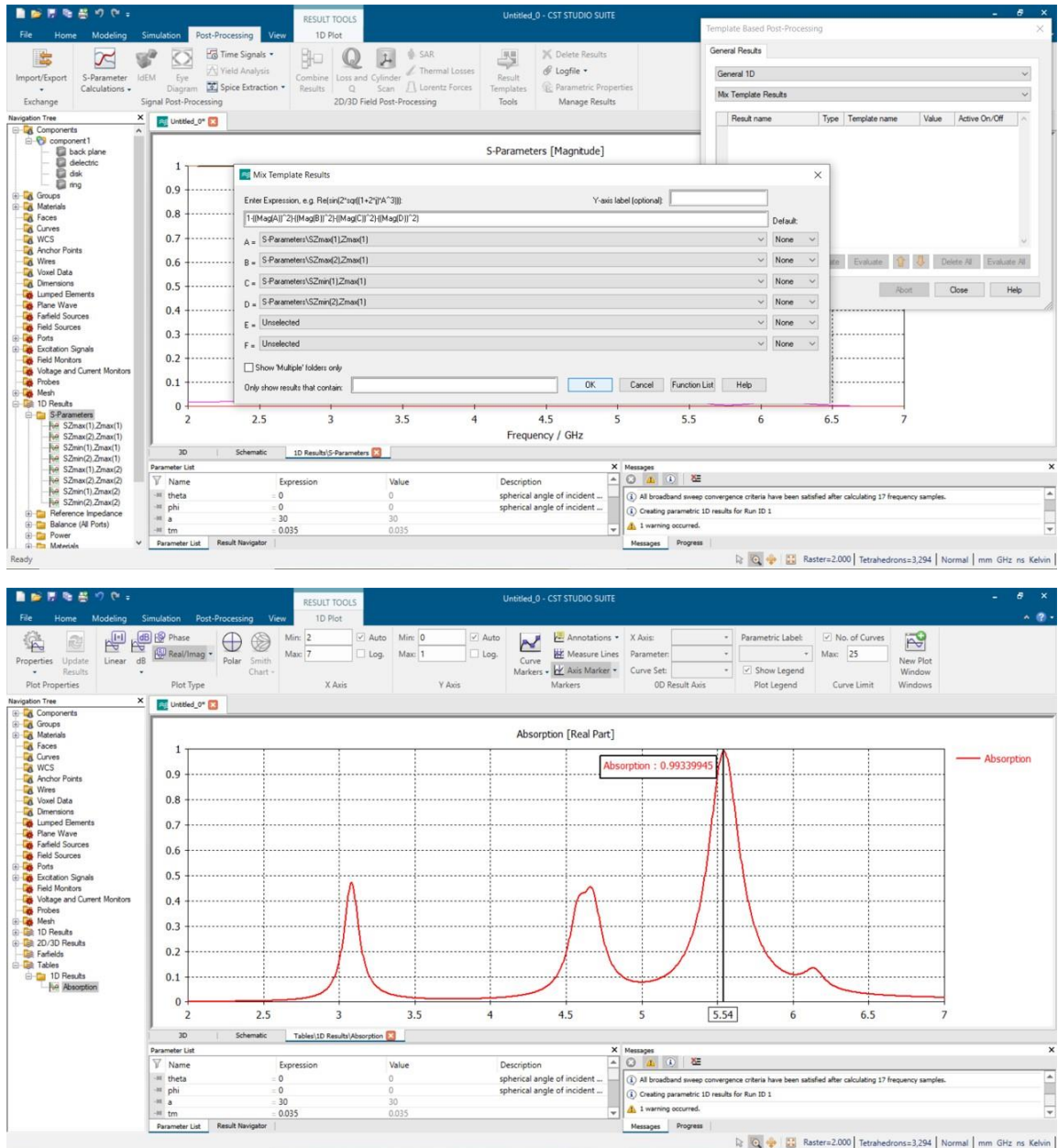
2.2.3. Mô phỏng và phân tích các đặc trưng điện từ của vật liệu



Hình 2.11. Minh họa kết quả mô phỏng các tham số tán xạ điện từ của vật liệu được thiết kế.

Các nguồn tín hiệu đóng vai trò thu và phát sóng điện từ sẽ được đặt ở phía trước và sau vật liệu. Sau quá trình mô phỏng, phần mềm CST sẽ tính toán ra được các tham số tán xạ điện từ khác nhau giữa các nguồn như trên Hình 2.11. Các tham số này sẽ đặc trưng cho các tham số phản xạ và truyền qua của vật liệu, bao gồm cả

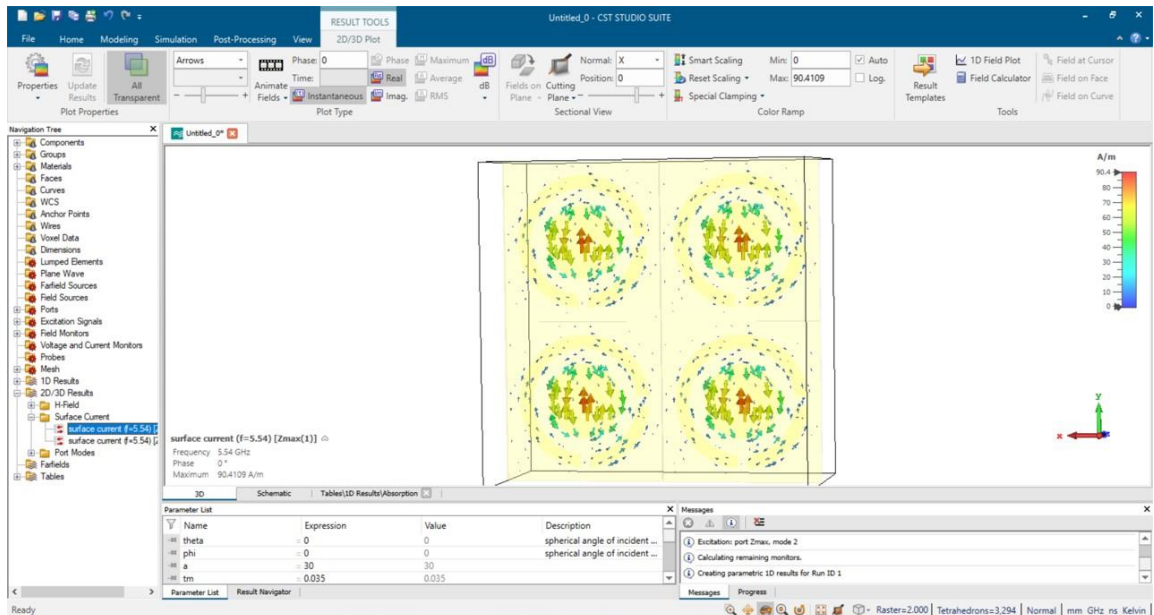
thành phần đồng trục và vuông góc của mỗi tham số. Dựa trên các tham số tán xạ này, các đặc trưng điện từ khác của vật liệu có thể được tính toán như độ hấp thụ (Hình 2.12) hoặc hệ số chuyển đổi góc phân cực của sóng điện từ.



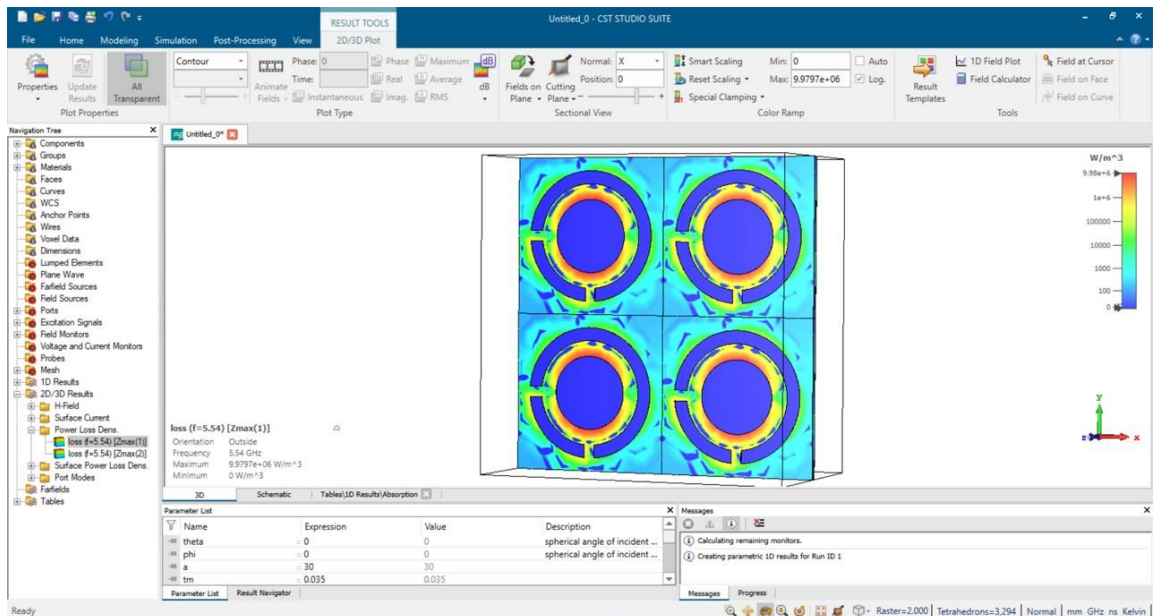
Hình 2.12. Giao diện tính toán độ hấp thụ của phần mềm CST và kết quả mô phỏng phổ hấp thụ của vật liệu.

Bên cạnh đó, một ưu điểm của phần mềm mô phỏng CST là phần mềm cho phép mô phỏng các hiện tượng và hiệu ứng vật lý cụ thể của vật liệu khi tương tác với sóng điện từ như phân bố mật độ dòng điện, phân bố điện trường, từ trường cũng như tổn hao năng lượng bên trong vật liệu (Hình 2.13 và 2.14). Đây đều là các hiệu ứng khó có thể quan sát trong thực tế do hạn chế về công nghệ cũng như giá thành

cao của các thiết bị thực nghiệm chuyên dụng để đo các hiệu ứng này. Bằng cách khai thác phần mềm mô phỏng, các hiệu ứng vật lý có thể được quan sát dễ dàng và cho phép các nhà nghiên cứu hiểu biết tường tận về cơ chế hoạt động của vật liệu khi tương tác với sóng điện từ.

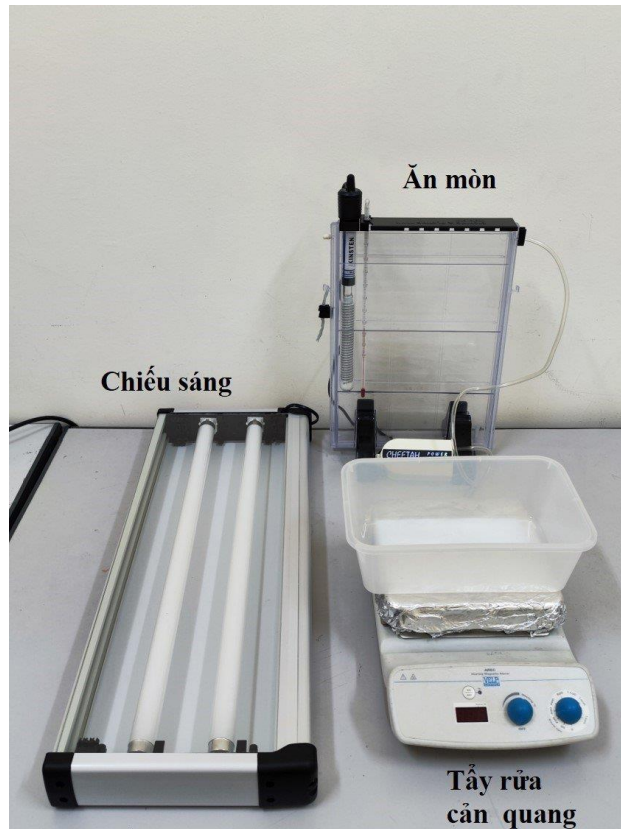


Hình 2.13. Mô phỏng phân bố dòng điện trên bề mặt vật liệu tại tần số cộng hưởng.



Hình 2.14. Mô phỏng phân bố tổn hao năng lượng bên trong vật liệu tại tần số cộng hưởng.

2.3. Phương pháp chế tạo vật liệu biến hóa



Hình 2.15. Hệ thiết bị chế tạo MM đặt tại Viện Khoa học vật liệu.

Trong thực nghiệm, để chế tạo mẫu MA hoạt động ở vùng GHz, hệ chế tạo mẫu bằng phương pháp quang khắc thường được sử dụng. Đây là hệ thiết bị hiệu quả trong việc chế tạo mẫu MM khác nhau hoạt động ở dải tần số GHz như MM có độ từ thẩm âm, MM có chiết suất âm, MA và MM có hiệu ứng truyền qua cảm ứng điện từ, ... Phương pháp này rất linh hoạt, cho phép các MM có cấu trúc đa dạng khác nhau có thể được chế tạo với độ lặp lại cao và độ phân giải của các chi tiết cỡ 0,1 mm.

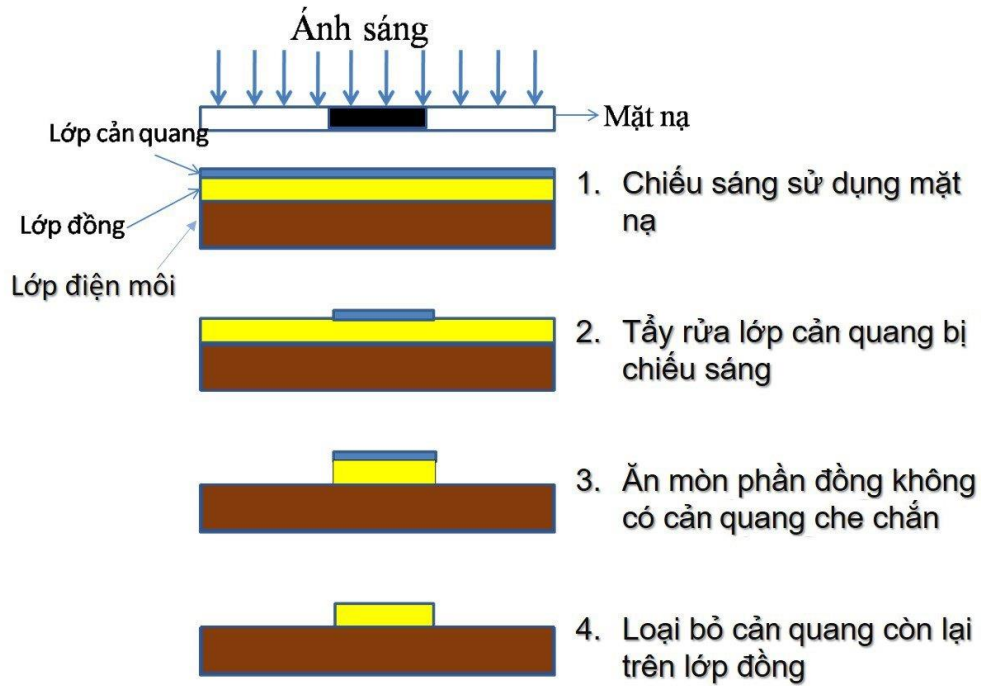
Hình 2.15 miêu tả ảnh hệ chế tạo mẫu này được lắp đặt tại Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Hệ thiết bị quang khắc này gồm 03 bộ phận chính:

Bộ phận chiếu sáng

Bộ phận ăn mòn kim loại

Bộ phận tẩy rửa cân quang để hiển thị cấu trúc

Ngoài ra, còn có trang thiết bị khác có thể được tích hợp vào để hỗ trợ quá trình chế tạo như hệ gia nhiệt, máy bơm sục khí và mặt nạ ...



Hình 2.16. Các bước cơ bản để chế tạo MM hoạt động ở vùng tần số GHz sử dụng phương pháp quang khắc.

Hình 2.16 miêu tả ví dụ về các bước cơ bản trong thí nghiệm chế tạo một MM hoạt động ở vùng tần số GHz bằng phương pháp quang khắc.

- Bước 1: Chiếu sáng sử dụng mặt nạ.

+ Tạo mặt nạ bằng cách in hình cấu trúc trên giấy có độ truyền qua cao. Cấu trúc của mặt nạ giống như cấu trúc trên bề mặt của vật liệu cần chế tạo.

+ Đặt mặt nạ lên bề mặt tấm vật liệu ban đầu và ép sát bằng phương pháp hút không khí. Ánh sáng chỉ có thể truyền đến lớp cản quang ở những phần không có hình cấu trúc trên mặt nạ.

+ Chiếu sáng bằng nguồn sáng đồng đều. Chất cản quang được sử dụng là cản quang dương. Khi đó, các phần trên lớp cản quang mà ánh sáng chiếu tới sẽ bị biến tính. Các vùng cản quang bị biến tính này sẽ có thể được rửa trôi trong dung dịch tẩy rửa cản quang. Vùng cản quang không bị chiếu sáng sẽ không bị tác động bởi dung dịch tẩy rửa cản quang.

- Bước 2: Tẩy rửa phần cản quang bị chiếu sáng.

+ Tháo bỏ mặt nạ sau quá trình chiếu sáng. Lưu ý không để lớp cản quang tiếp xúc với các nguồn sáng khác.

+ Nhúng tấm vật liệu đã được chiếu sáng vào dung dịch tẩy rửa lớp cản quang.

Khi đó, các vùng cản quang biến tính bị rửa trôi, chỉ còn lại phần cản quang chưa biến tính mà được che chắn trước đó bởi mặt nạ.

- Bước 3: Ăn mòn lớp kim loại

+ Lấy tấm vật liệu ra khỏi dung dịch tẩy rửa cản quang, rửa vật liệu bằng nước sạch. Sau đó, nhúng vật liệu vào dung dịch ăn mòn kim loại.

+ Các vùng kim loại vẫn đang được che chắn bởi phần cản quang không biến tính sẽ không bị ăn mòn. Trong khi đó, các phần kim loại đã lộ ra sau khi tẩy rửa cản quang sẽ bị ăn mòn trong dung dịch.

- Bước 4: Chiếu sáng không sử dụng mặt nạ và tẩy rửa cản quang

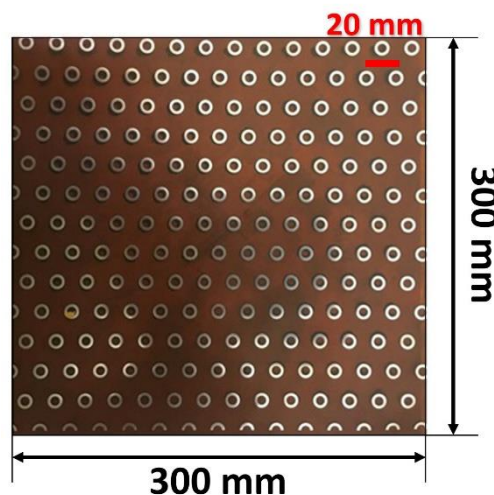
+ Sau khi trải qua quá trình ăn mòn, cấu trúc lớp kim loại của MM được tạo thành và nằm bên dưới lớp cản quang bảo vệ.

+ Rửa sạch tấm vật liệu bằng nước sạch và chiếu sáng một lần nữa tương tự như ở Bước 1 mà không cần mặt nạ.

+ Sau khi chiếu sáng, nhúng vật liệu vào dung dịch tẩy rửa cản quang tương tự như ở Bước 2.

Trong lần tẩy rửa này, toàn bộ chất cản quang còn lại bị rửa trôi.

Hình 2.17 trình bày ảnh chụp của một tấm MM đã được chế tạo thành công theo phương pháp trên.

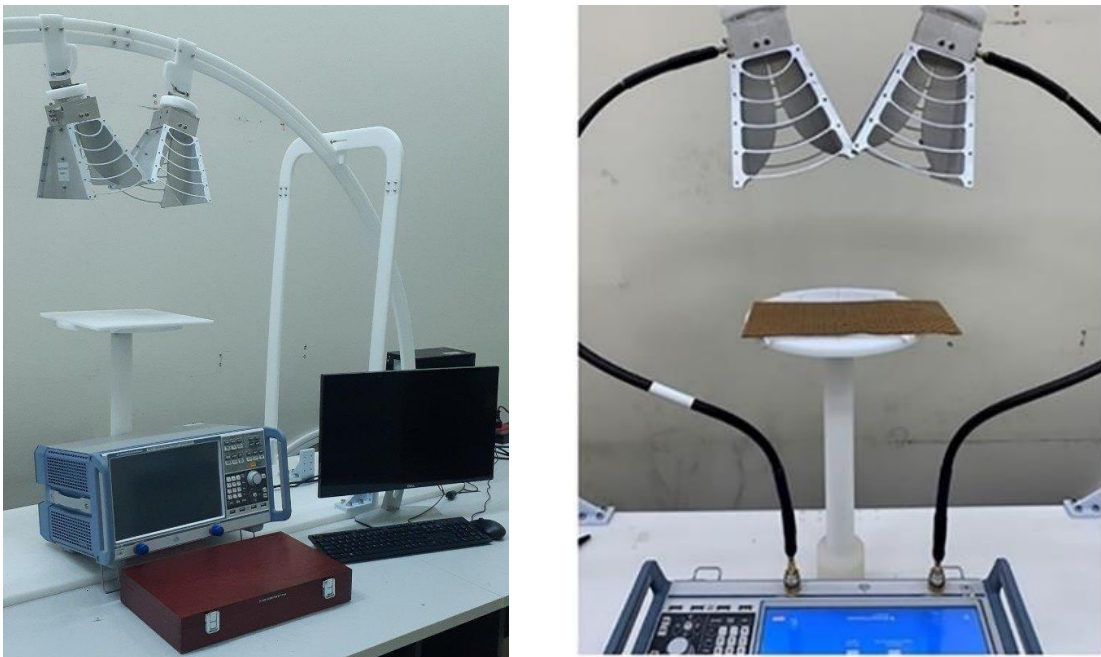


Hình 2.17. Ảnh MM được chế tạo bằng phương pháp quang khắc.

Lưu ý rằng, đối với cấu trúc dạng 3 lớp kim loại - điện môi - kim loại và cả 2 lớp kim loại đều có cấu trúc. Các bước cơ bản trên cần được thực hiện đồng thời cho cả mặt trên và mặt dưới của tấm vật liệu.

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. Đây là hệ thiết bị hiện đại với độ tin cậy và độ chính xác cao của các phép đo. Hình 2.18 là ảnh hệ thiết bị với tên gọi và mã số là Rohde&Schwarz ZNB20 Vector Network Analyzer [87] đã được đầu tư và hiện đang sử dụng hiệu quả tại Viện Khoa học vật liệu. Hệ thiết bị gồm hai ăng ten, một ăng ten có vai trò phát, ăng ten còn lại có vai trò thu tín hiệu của sóng lan truyền. Các kết quả sẽ được hiển thị trên màn hình chính và các quá trình hiệu chuẩn cũng như thay đổi trong phép đo có thể được điều khiển qua máy tính ghép nối.



Hình 2.18. Ảnh hệ thiết bị phân tích mạng Rohde&Schwarz ZNB20 Vector Network Analyzer chuyên dùng để đo đặc tính chất điện từ của vật liệu dưới sự tương tác của sóng điện từ lan truyền trong không khí.

Về cơ bản độ hấp thụ sóng điện từ của vật liệu có thể được tính từ tín hiệu truyền qua và phản xạ [21]:

$$A_M(\omega) = 1 - R_M(\omega) - T_M(\omega) \quad (2.10)$$

trong đó, độ phản xạ là:

$$R_M(\omega) = |S_{11}|^2 \quad (2.11)$$

và độ truyền qua là:

$$T_M(\omega) = |S_{21}|^2 \quad (2.12)$$

Lưu ý rằng, mặt sau của vật liệu được tạo bởi một tấm kim loại liên tục. Vì thế, thành phần truyền qua bị loại bỏ. Khi đó, độ hấp thụ có thể được tính qua thành phần phản xạ theo công thức:

$$A_M(\omega) = 1 - R_M(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 \quad (2.13)$$

Do đó, chi tiết quá trình đo đạc được gói gọn trong các bước như dưới đây:

- Bước 1:

+ Đặt hai ăng ten cùng phía so với mẫu vật liệu biến hóa để đo đặc tính hiệu phản xạ từ mẫu. Hai ăng ten được kết nối với máy phân tích mạng vectơ thông qua các dây cáp truyền tín hiệu. Tín hiệu dao động từ máy sẽ được truyền qua dây cáp đến ăng ten phát. Tín hiệu này sẽ được ăng ten chuyển hóa và phát ra dưới dạng sóng. Sóng điện từ sẽ được phát ra và hướng về phía bề mặt trên của mẫu vật liệu biến hóa tương ứng có các cấu trúc cộng hưởng.

+ Góc tới của sóng điện từ được định nghĩa là góc giữa hướng truyền sóng và pháp tuyến của bề mặt mẫu. Để đảm bảo tín hiệu đo phản xạ là chính xác, hai ăng ten được đặt sao cho góc tới của sóng điện từ là nhỏ nhất có thể.

- Bước 2:

Trước khi đo đạc, phép chuẩn hóa tín hiệu sẽ được thực hiện theo hai bước:

+ Chuẩn hóa tín hiệu ở trạng thái cách ly

Đây là bước chuẩn hóa được thực hiện với hai dây cáp không kết nối vào hai ăng ten mà các dây cáp sẽ được kết nối với hai vật liệu chuẩn hóa cho trạng thái cách ly. Máy phân tích mạng sẽ ghi nhận tín hiệu này ở trạng thái cách ly.

+ Chuẩn hóa tín hiệu ở trạng thái phản xạ hoàn toàn

Một tấm kim loại với kích thước tương tự mẫu sẽ được đặt thay thế cho mẫu. Hai ăng ten lúc này sẽ được kết nối với máy phân tích mạng vectơ thông qua hai dây cáp. Tín hiệu phát ra từ ăng ten phát sẽ bị phản xạ trên bề mặt kim loại mà không bị truyền qua hay hấp thụ. Tín hiệu phản xạ sẽ được thu lại ở ăng ten thu. Lúc này, máy phân tích mạng sẽ ghi nhận tín hiệu này ở trạng thái phản xạ hoàn toàn.

- Bước 3:

+ Sau hai bước chuẩn hóa như trên, mẫu vật liệu biến hóa sẽ được đặt trên giá đỡ thay cho tấm kim loại dùng để chuẩn hóa, máy phân tích mạng vectơ sẽ đo tín hiệu phát ra từ ăng ten phát, được phản xạ bởi vật liệu và nhận lại bởi ăng ten thu.

+ Tín hiệu ghi nhận được lúc này chính là tín hiệu phản xạ của mẫu vật liệu biến hóa cần đo. Tín hiệu này sẽ được sử dụng để tính độ hấp thụ theo như các công thức đã trình bày ở trên.

2.5. Kết luận chương 2

Các phương pháp được sử dụng để 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 miêu tả và đánh giá chi tiết, bao gồm từ phương pháp mô phỏng, tính toán đến phương pháp chế tạo và thực nghiệm.

Đầu tiên, phương pháp mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm mô phỏng điện từ chuyên dụng CST Microwave. Mô phỏng giúp thiết kế cấu trúc vật liệu biến hóa đề xuất và khảo sát mô phỏng các đặc trưng điện từ của vật liệu biến hóa như phổ hấp thụ, phân bố dòng điện và trường bên trong vật liệu. Bên cạnh đó, phương pháp tính toán cũng được áp dụng giúp dự đoán, kiểm chứng và giải thích liên quan đến tần số hấp thụ, trở kháng và độ hấp thụ của vật liệu.

Dựa trên các kết quả mô phỏng và tính toán đạt được, vật liệu biến hóa sẽ được chế tạo bằng phương pháp quang khắc, bao gồm các bước thí nghiệm cơ bản như chiếu sáng, tẩy rửa cản quang và ăn mòn kim loại. Đây là phương pháp hữu hiệu trong chế tạo các vật liệu biến hóa với cấu trúc tuần hoàn.

Sau cùng, hệ thiết bị phân tích mạng Vector Network Analyzer, kết nối với hai ăng ten, được sử dụng để đo đạc và đánh giá đặc trưng hấp thụ của vật liệu biến hóa, dựa trên phương pháp đo đạc trong không gian. Sóng điện từ được phát ra từ ăng ten phát, tương tác với vật liệu biến hóa, sau đó sóng điện từ phản xạ được ghi nhận tại ăng ten thu. Từ kết quả đo đạc, các tính chất như phản xạ và hấp thụ của vật liệu biến hóa đã chế tạo sẽ được xác định.

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

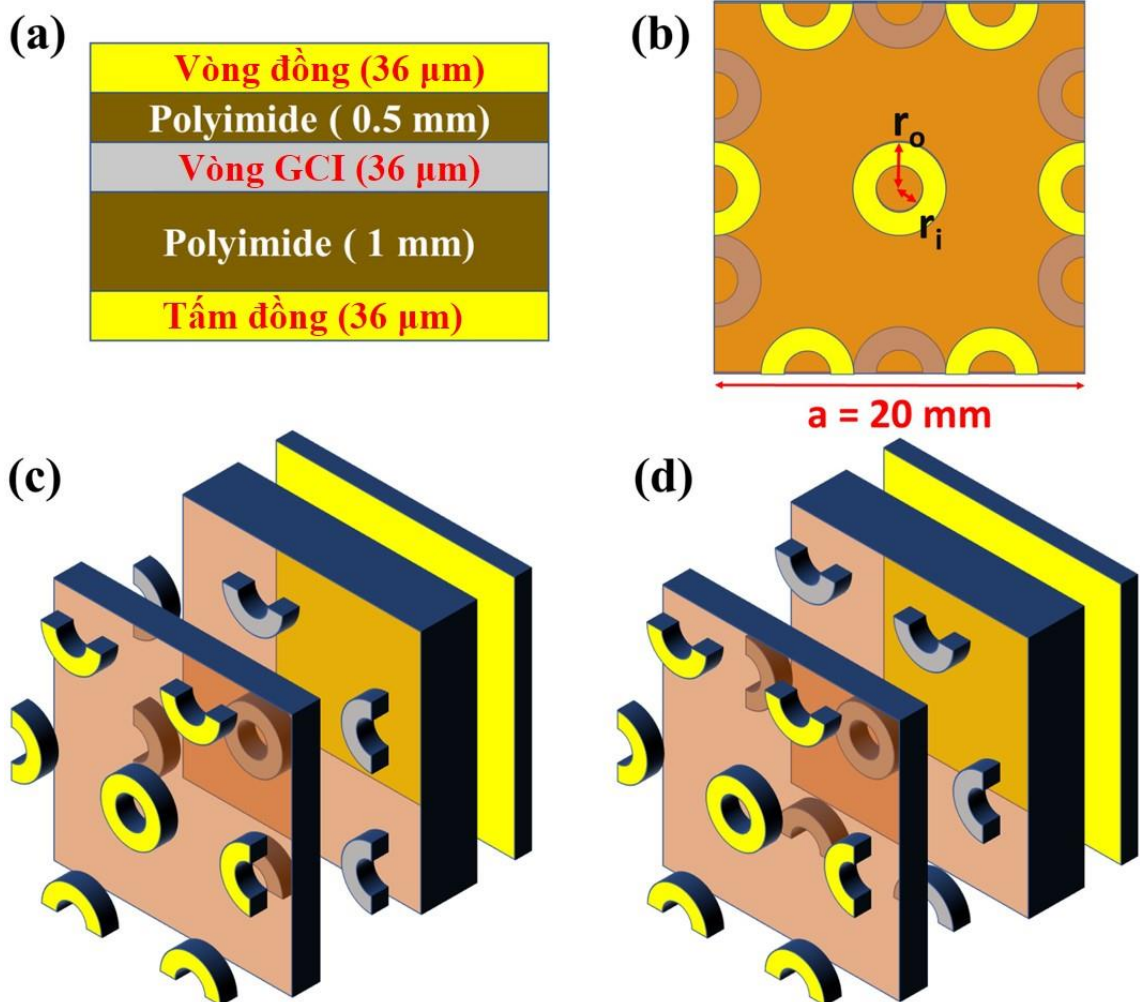
3.1. Điều khiển dải tần số hấp thụ sóng điện từ ở vùng GHz bằng cách xoay vị trí tương đối giữa các lớp trong vật liệu biến hóa

3.1.1. Cấu trúc vật liệu biến hóa đa lớp

Trong mục này, luận án đề xuất một cách tiếp cận để điều khiển tính chất hấp thụ của MA bằng tác động cơ học. MA có cấu tạo nhiều lớp được làm bằng một lớp gồm các cấu trúc vòng cộng hưởng bằng đồng và lớp cấu trúc vòng cộng hưởng bằng mực dẫn điện dựa trên graphene (graphene-based conductive ink - GCI) xếp chồng lên nhau trên một lớp đồng ở mặt sau; mỗi lớp kim loại được ngăn cách bởi một lớp điện môi polyimide. Các cấu trúc vòng cấu thành của MA được sắp xếp theo cách sắp xếp hình lục giác của các vật liệu 2D nổi tiếng (graphene, hBN, các đơn lớp dichalcogenide kim loại chuyển tiếp). Bằng cách xếp chồng hai lớp ở chế độ AA theo định nghĩa của graphene hai lớp mà tất cả các vòng trong cả hai lớp đều có vị trí ngang giống hệt nhau, tức là lớp trên chồng lên hoàn toàn lớp dưới cùng. Sau đó, bằng cách xoay lớp trên 90 độ, nhiều chế độ cộng hưởng mới có thể thu được.

Ô cơ sở của cấu trúc MA được minh họa trong Hình 3.1. Cấu trúc này bao gồm năm lớp như trong Hình 3.1(a). Các lớp kim loại bao gồm lớp cấu trúc vòng đồng, lớp cấu trúc vòng GCI và lớp đồng liên tục ở mặt sau. Hai lớp điện môi có độ dày lần lượt là 0,5 và 1 mm được kẹp giữa các lớp từ trên xuống dưới. Độ dày của các lớp kim loại là $t_m = 0,036$ mm cho cả lớp đồng và lớp GCI. Vật liệu đồng được sử dụng trong mô phỏng có độ dẫn điện là $5,96 \times 10^7$ S/m, trong khi GCI là một tấm dẫn điện có điện trở 6,5 ohm/sq. Lớp điện môi là polyimide, có hằng số điện môi là 3,5 và hệ số tổn hao là 0,0027. Các vòng được thiết kế giống hệt nhau cho cả đồng và GCI với bán kính ngoài $r_o = 2,5$ mm và bán kính trong $r_i = 1,5$ mm. Có một vòng đầy đủ và sáu nửa vòng trong một ô đơn vị 20 mm x 20 mm. Các vòng được định vị sao cho tâm của sáu vòng ở quỹ đạo ngoài nằm trên các cạnh của ô đơn vị và tạo thành hình lục giác xung quanh vòng ở trung tâm. Có thể thu được hai cấu hình bằng cách xoay các lớp trên cùng (bao gồm lớp vòng đồng và lớp polyimide trên cùng) theo góc quay là bội số của 90 độ. Ban đầu, khi các vòng đồng hoàn toàn chồng lên các vòng GCI, đó là chế độ đồng bộ hoặc cấu hình vòng đồng bộ (matched ring

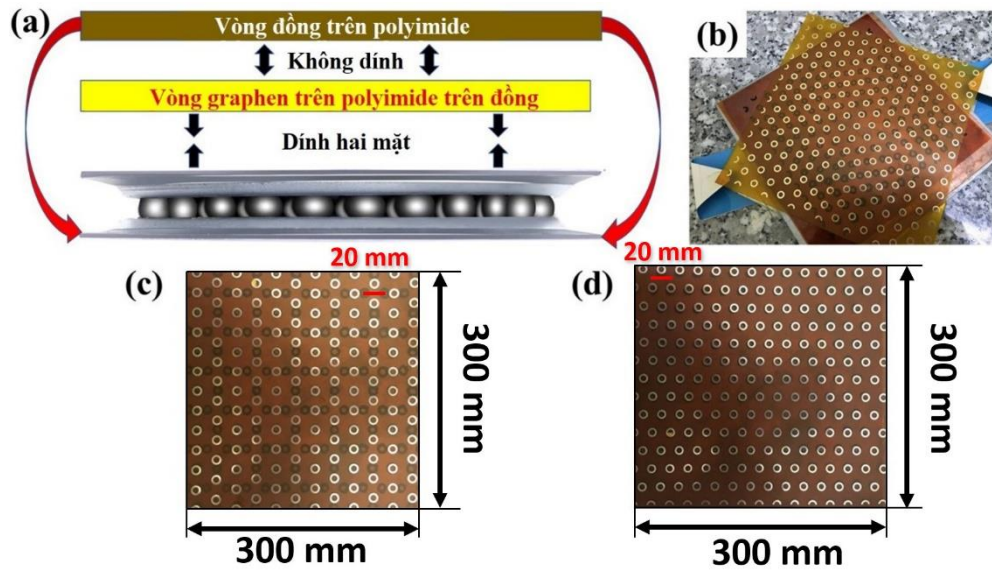
configuration - MRC). Mặt khác, khi các lớp trên cùng được xoay 90 độ, nó sẽ trở thành chế độ vuông góc hoặc cấu hình vòng vuông góc (crossed ring configuration - CRC) như trên Hình 3.1(b) và 3.1(c).



Hình 3.1. Thiết kế của MA nhiều 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.

Sơ đồ khối của mẫu MA có thể điều khiển bằng cơ học được trình bày trong Hình 3.2(a). Lớp đồng được tạo ra bằng kỹ thuật quang khắc, trong khi các vòng GCI được vẽ bằng kỹ thuật Điều khiển số bằng máy tính (Computer Numerical Control - CNC). Để làm cho cấu trúc quay, MA được đặt trên bàn xoay. Lớp dưới cùng của MA, bao gồm mặt sau bằng đồng, các lớp vòng polyimide và GCI được gắn vào tấm trên của ổ trục bàn xoay, trong khi nửa còn lại của MA được nối với tấm dưới cùng. Cuối cùng, chúng ta có thể xoay tùy ý các lớp vòng GCI để chuyển đổi giữa 2 cấu hình MRC và CRC. Hình ảnh của mẫu MA đã chế tạo khi đang xoay được hiển thị

trong Hình 3.2(b). Vị trí xếp chồng của các lớp sau khi xoay được xác nhận như trong Hình 3.2(c) và 3.2(d) tương ứng cho các cấu hình CRC và MRC.

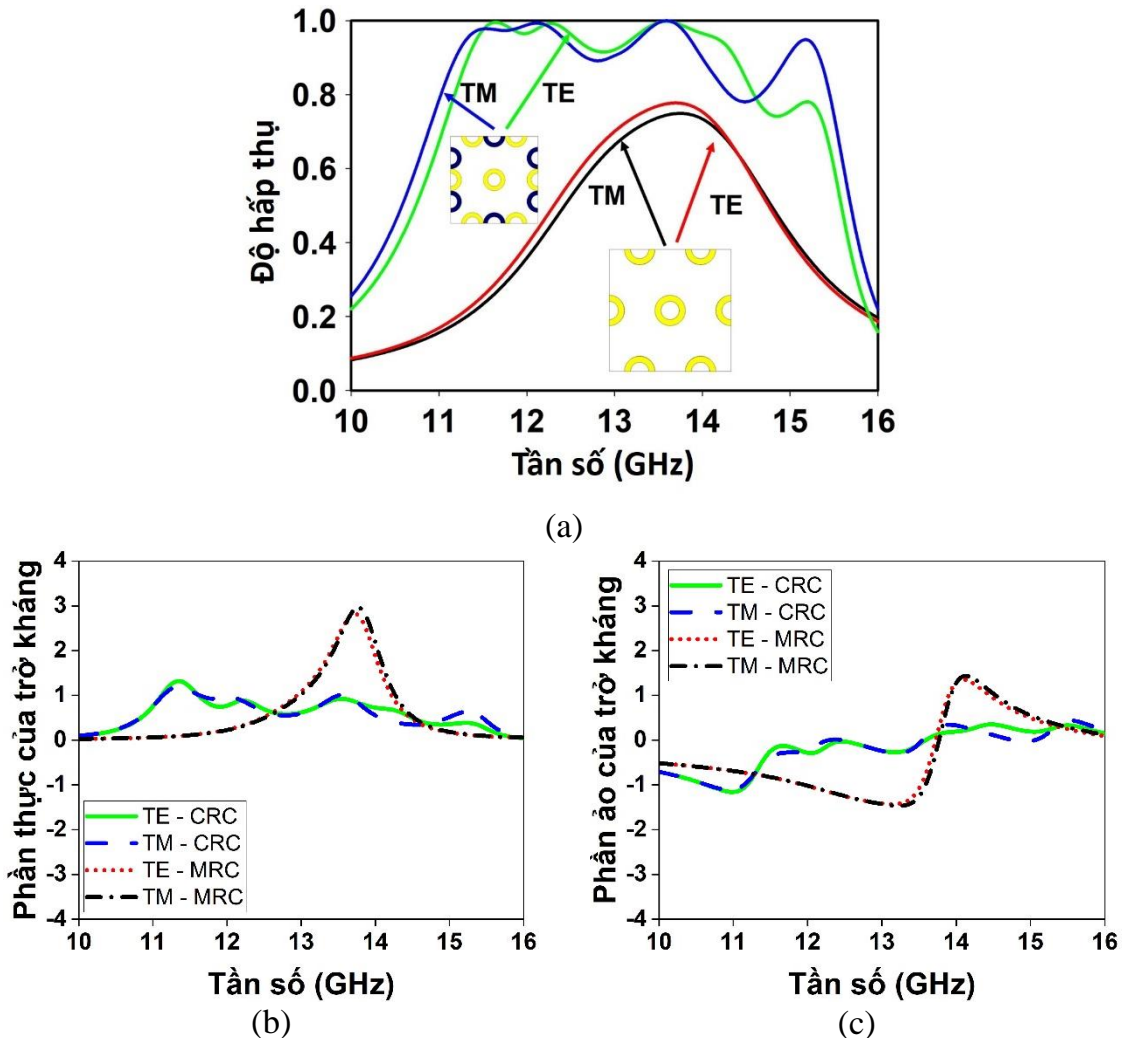


Hình 3.2. (a) Sơ đồ của MA nhiều lớp có thể cấu hình lại được đặt trên ổ đỡ bàn xoay và hình ảnh của nguyên mẫu (b) khi quay, (c) sau khi quay ở cấu hình CRC và (d) sau khi quay ở cấu hình MRC.

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

Hình 3.3(a) là phổ hấp thụ mô phỏng của các cấu trúc MA được đề xuất cho MRC và CRC. 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 trong khi ở mức độ 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. Kết quả tính toán phần thực và phần ảo trở kháng của MA được thể hiện trên Hình 3.3(b) và 3.3(c). Có thể thấy, ở cấu hình CRC, trở kháng của MA có phần thực tiệm cận với 1 và phần ảo tiệm cận với 0 trong dải tần

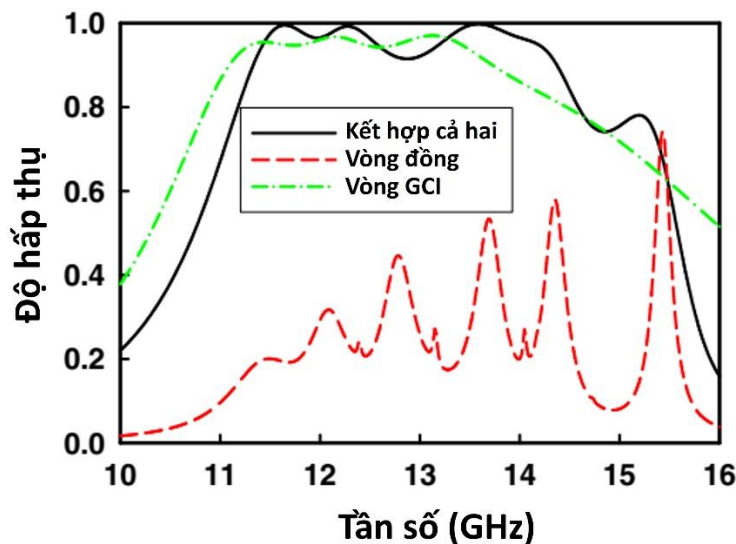
số rộng, hay nói cách khác là tiệm cận với trở kháng của không khí. Điều này chứng tỏ rằng có sự phối hợp trở kháng giữa MA ở cấu hình CRC và không khí, làm triệt tiêu thành phần phản xạ và tăng cường khả năng hấp thụ của MA. Đối với MA ở cấu hình MRC, tại tần số cộng hưởng ở 13,7 GHz, trở kháng của MA khác biệt lớn với trở kháng của không khí, khiến cho khả năng hấp thụ của MA ở cấu hình này thấp hơn so với khi MA ở cấu hình CRC.



Hình 3.3. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng của MA ứng với hai cấu hình MRC và CRC khi sóng điện từ tới phân cực ở chế độ TE và TM. Kết quả tính toán (b) phần thực và (c) phần ảo của trở kháng MA.

Lý do chọn vật liệu lai giữa đồng và GCI cho các vòng trên các lớp khác nhau được giải thích như sau. Trong Hình 3.4, luận án đã mô phỏng các trường hợp trong đó tất cả các vòng GCI được chuyển đổi thành đồng và ngược lại so với cấu hình ban đầu. Đường liền màu đen, đường nét đứt màu đỏ và đường nét đứt màu xanh lá cây là phổ mô phỏng của CRC đối với trường hợp các vòng được làm bằng cả đồng và

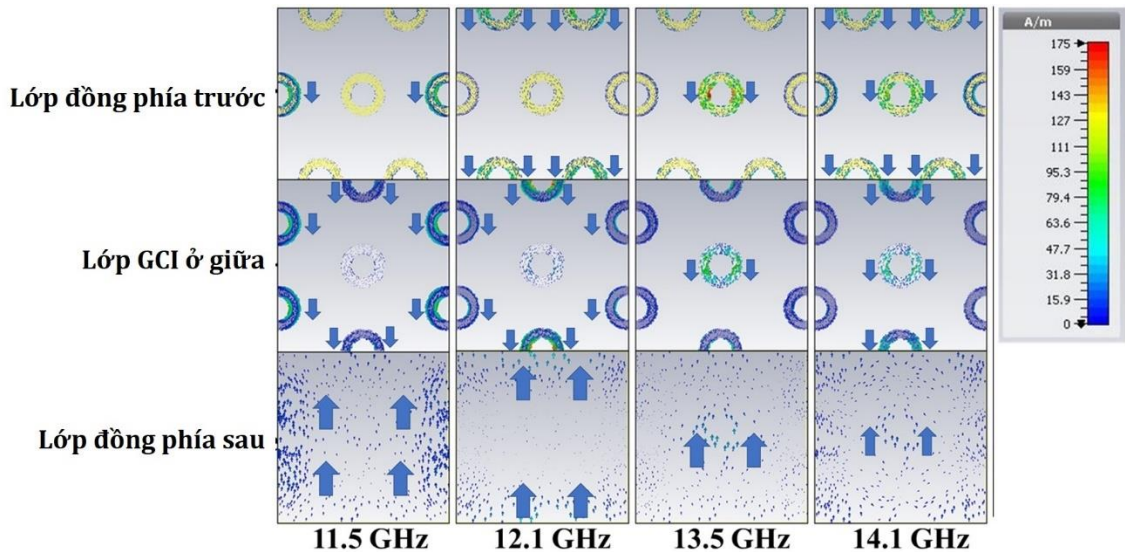
GCI (kết hợp), chỉ đồng và chỉ GCI, tương ứng. Các vòng đồng thông thường trên cấu hình polyimide thường tạo ra các cấu trúc hấp thụ hẹp và sắc nét, trong khi chỉ các vòng GCI cho thấy các đỉnh hấp thụ rộng, nhưng độ hấp thụ vẫn thấp hơn 100% và giảm nhanh sau 13,5 GHz. Bằng cách kết hợp cả hai vật liệu, nghiên cứu đã tăng cường thành công khả năng hấp thụ của MA lên 100% ở 11,5, 12,1 và 13,5 GHz, đồng thời cải thiện khả năng hấp thụ của MA ở tần số cao hơn sau 13,5 GHz.



Hình 3.4. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của loại vật liệu cấu thành cấu trúc vòng cộng hưởng lên tính chất hấp thụ của MA ở cấu hình CRC khi sóng điện từ tới phân cực ở chế độ TE.

Để hiểu rõ hơn về cơ chế đằng sau hiện tượng này, các dòng điện cảm ứng trên các lớp vòng cộng hưởng và lớp sau cùng ở tần số hấp thụ của CRC được trình bày trong Hình 3.5 để làm rõ nguồn gốc của hấp thụ dải rộng. Nhìn chung, mật độ dòng điện trên các vòng GCI cao hơn trên các vòng đồng. Các hướng chính của dòng điện được ghi bên cạnh các vòng và ở mặt sau. 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 [88]. Cần lưu ý rằng cường độ dòng điện trên các vòng GCI mạnh hơn nhiều so với dòng điện trên các vòng đồng. 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 hiện tại. 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

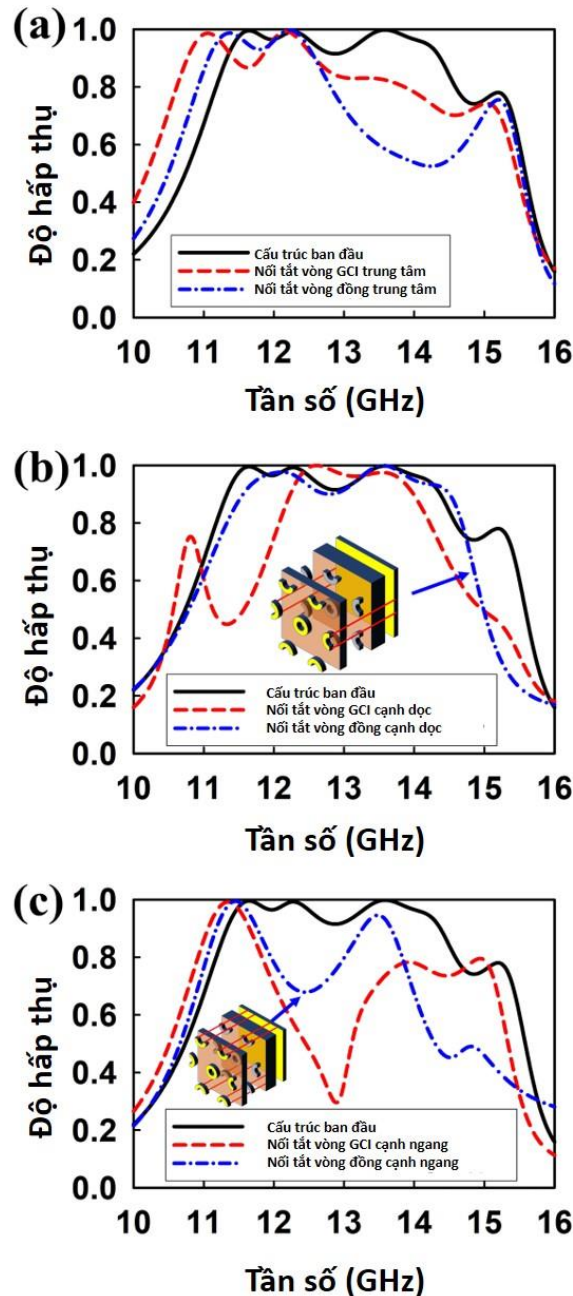
nhau để tạo ra cộng hưởng ở tần số 14,1 GHz. Do đó, cộng hưởng ở 14,1 GHz có thể được đóng góp bởi các cấu trúc cộng hưởng vòng khác nhau. Việc quan sát mật độ hiện tại có thể mang lại ý nghĩa định tính về sự đóng góp của từng vòng vào sự hấp thụ tổng thể. Một phương pháp khác nên được sử dụng để định lượng nó. Do đó, nghiên cứu sinh đã thực hiện mô phỏng nối tắt từng nhóm vòng trong bước tiếp theo để bỏ qua cộng hưởng từ trên nhóm đó. Từ đó, ta có thể đánh giá được chi tiết hơn về ảnh hưởng của từng nhóm vòng lên tính chất tổng thể của MA.



Hình 3.5. Kết quả mô phỏng dòng điện cảm ứng trên các lớp của MA ở cấu hình CRC khi sóng điện từ phân cực ở chế độ TE.

Các cấu trúc cộng hưởng trong MA có thể được chia thành ba phần chính, bao gồm các vòng ở trung tâm, vòng ở cạnh ngang và vòng ở cạnh dọc của ô cơ sở như đã được biểu diễn trong Hình 3.5 ở trên. Để làm rõ hơn nữa về nguồn gốc của các đỉnh hấp thụ và sự đóng góp của từng nhóm cộng hưởng vào sự hấp thụ tổng thể, nghiên cứu này đã nối tắt lần lượt từng cấu trúc cộng hưởng đồng và GCI theo từng nhóm phân loại trên, như thể hiện trong Hình 3.6(a) - 3.6(c), để loại bỏ từng cộng hưởng từ khác nhau [89,90]. Sơ đồ của các cấu trúc bị nối tắt được biểu diễn trong các hình con của Hình 3.6(b) và 3.6(c) cho các vòng đồng ở cạnh dọc và cạnh ngang tương ứng. Để tránh phức tạp trong hình vẽ, sơ đồ của các cấu trúc nối tắt khác không được đưa vào do quy trình nối tắt giống hệt nhau, ở đó các vòng mục tiêu được kết nối trực tiếp với mặt đồng phía sau bằng dây dẫn. Do vòng GCI ở trung tâm được chồng lên hoàn toàn bởi vòng đồng trong tất cả các cấu hình nên khi vòng đồng trung tâm bị nối tắt sẽ khiến cho vòng GCI trung tâm cũng bị nối tắt theo. Kết quả nghiên

cứu cho thấy, độ hấp thụ ở 13,5 GHz bị giảm từ 100% xuống 55% và 80% ứng với trường hợp khi cả hai vòng trung tâm và trong trường hợp chỉ vòng trung tâm GCI bị nối tắt, như trong Hình 3.6(a). Chúng ta có thể nhận ra rằng cả vòng GCI và vòng đồng đều góp phần vào sự hấp thụ ở tần số 13,5 GHz. Điều thú vị là khi nối tắt các cấu trúc cộng hưởng vòng, đỉnh hấp thụ ở 11,5 GHz chỉ bị dịch chuyển nhỏ mà không thay đổi về biên độ, trong khi sự hấp thụ ở 12,1 GHz hầu như không thay đổi.



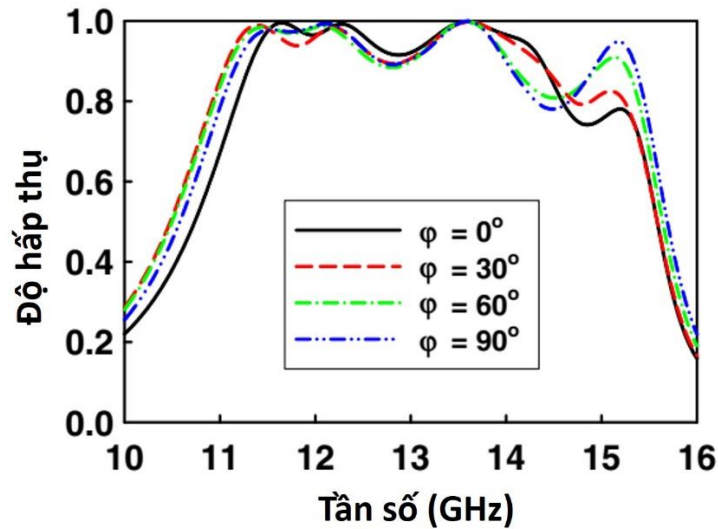
Hình 3.6. Kết quả mô phỏng sự biến đổi của phổ hấp thụ ở cấu hình CRC khi các cấu trúc cộng hưởng được nối tắt: (a) các vòng trung tâm được nối tắt, (b) các vòng ở cạnh dọc được nối tắt và (c) các vòng ở cạnh ngang được nối tắt.

Các vòng đồng ở cạnh thẳng đứng dường như có một đóng góp nhỏ hơn vào sự hấp thụ tổng thể trong CRC, như được thấy trong Hình 3.6(b). Bằng cách nối tắt cả bốn vòng đồng dọc theo cạnh thẳng đứng, độ hấp thụ thu được gần giống như độ hấp thụ ban đầu. Tuy nhiên, trong trường hợp rút ngắn các vòng GCI cạnh dọc, quá trình hấp thụ sẽ mất đi đỉnh hấp thụ ở 11,5 và 14,1 GHz, trong khi đỉnh ở 12,1 bị dịch chuyển một chút và đỉnh ở 13,5 GHz bị giảm nhẹ. Quan sát này là phù hợp với dòng điện bề mặt được vẽ trong Hình 3.5, trong đó các vòng GCI ở cạnh dọc đóng góp vào cả bốn đỉnh cộng hưởng, trong khi các vòng đồng ở cạnh dọc chỉ cho thấy tác động nhỏ lên các đỉnh 11,5 và 14,1 GHz.

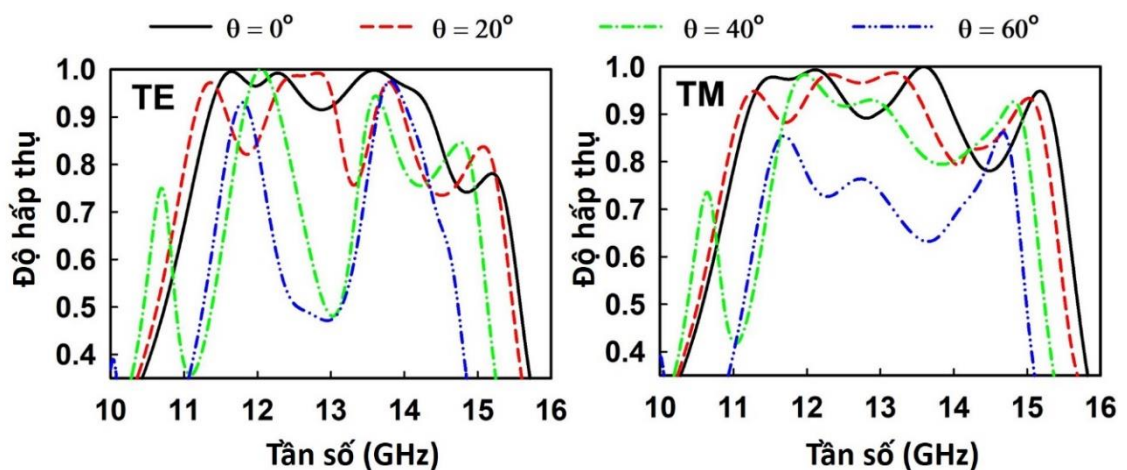
Mặt khác, khi các vòng ở cạnh ngang được nối tắt, thì khả năng hấp thụ giảm đáng kể trong cả hai trường hợp nối tắt các vòng GCI và các vòng đồng, như được trình bày trong Hình 3.6(c). Đối với các vòng GCI bị nối tắt, đỉnh hấp thụ ở 11,5 GHz là đỉnh duy nhất còn lại, trong khi các đỉnh khác ở 12,1, 13,5 và 14,1 GHz giảm mạnh độ hấp thụ xuống dưới 80%. Đặc biệt, đỉnh hấp thụ ở 12,5 GHz chuyển thành dải hấp thụ yếu với độ hấp thụ chỉ đạt 30% ở 12,9 GHz. Xu hướng tương tự được quan sát thấy khi nối tắt các vòng đồng ở cạnh ngang, ngoại trừ trường hợp đỉnh hấp thụ ở 13,5 GHz khi đỉnh này chỉ bị giảm nhẹ xuống 95%. Từ đó, ta có thể kết luận rằng đỉnh hấp thụ ở 11,5 GHz chủ yếu được đóng góp bởi các vòng GCI và các vòng đồng nằm trên cạnh dọc, trong khi đỉnh hấp thụ ở 12,1 GHz được tạo ra bởi các cấu trúc cộng hưởng vòng nằm theo cạnh ngang. Khả năng hấp thụ ở 13,5 GHz của MA được đóng góp bởi cả hai cấu trúc vòng cộng hưởng ở trung tâm. Cuối cùng, các vòng cộng hưởng trung tâm và các vòng cộng hưởng nằm ở cạnh ngang, bao gồm cả các vòng GCI và các vòng đồng, đều có đóng góp vào vùng hấp thụ ở 14,1 GHz.

Nhằm đánh giá khả năng ứng dụng thực tế của MA, ảnh hưởng của sự phân cực và góc tới của sóng điện từ đối với sự hấp thụ của MA trong CRC được đánh giá như trong Hình 3.7. Khi chiếu vuông góc với bề mặt của MA, phổ hấp thụ mô phỏng của MA ít bị thay đổi theo góc phân cực của sóng điện từ tới, đặc biệt là ở tần số 13,5 GHz, trong đó sự hấp thụ chủ yếu được tạo ra bởi cấu trúc cộng hưởng vòng trung tâm. Các đỉnh hấp thụ ở 11,5 và 12,1 GHz hơi dịch chuyển do thay đổi về số lượng cấu trúc cộng hưởng vòng và vị trí dọc theo các cạnh, nhưng biên độ vẫn được giữ nguyên. Ngược lại, kết quả nghiên cứu cho thấy sự tăng cường hấp thụ ở tần số 15,2

GHz và sự suy giảm độ hấp thụ ở 14,1 GHz khi góc phân cực của sóng tới chuyển từ chế độ TE sang chế độ TM. Đặc tính ít nhạy cảm vào góc phân cực của phổ hấp thụ có thể được giải thích là do của thiết kế cấu trúc của MA đề xuất có tính đối xứng khá cao.



Hình 3.7. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của phổ hấp thụ ở cấu hình CRC vào góc phân cực của sóng điện từ.

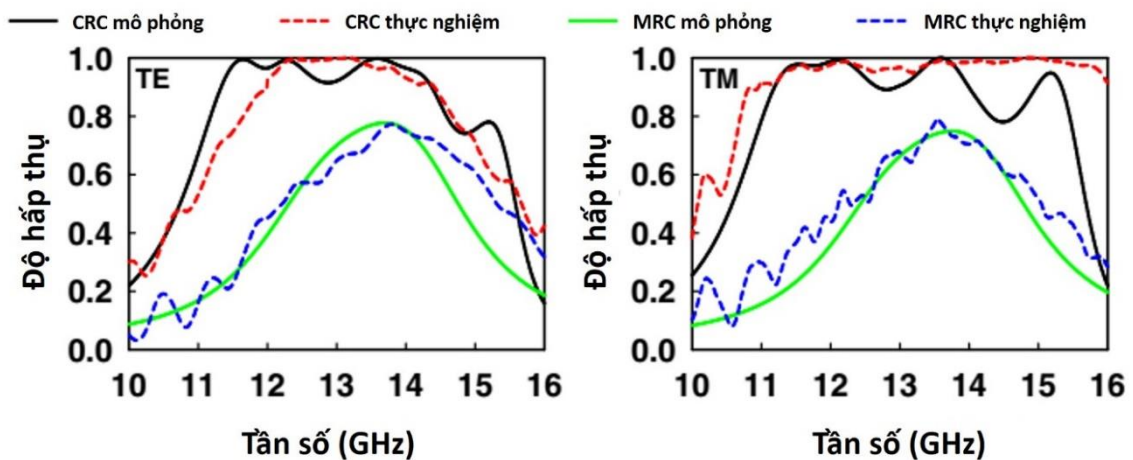


Hình 3.8. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của phổ hấp thụ ở cấu hình CRC vào góc tới của sóng điện từ ở chế độ TE và TM.

Phổ hấp thụ mô phỏng theo góc tới ở chế độ TE và TM được đánh giá trong Hình 3.8(a) và 3.8(b), tương ứng. Bằng cách tăng góc tới, dải tần của phổ hấp thụ giảm đi rất nhiều. Phổ hấp thụ dải rộng và đa đỉnh với độ hấp thụ tại đỉnh trên 90% được duy trì cho đến $\theta = 40^\circ$. Tại $\theta = 60^\circ$, ở chế độ TM, đỉnh hấp thụ cao nhất giảm

xuống còn 86%, trong khi ở chế độ TE, hai đỉnh hấp thụ ở 11,73 và 13,81 GHz lần lượt là 93% và 97%. Hiện tượng suy giảm về biên độ và dải tần hấp thụ khi tăng góc tới có thể được giải thích là do cường độ cộng hưởng từ yếu dần khi góc tới trở nên lớn hơn [91,92].

Kết quả mô phỏng và đo đạc phổ hấp thụ của MA đề xuất được hiển thị trong Hình 3.9 cho cả hai chế độ TE và TM ở hai cấu hình CRC và MRC. Các kết quả đo phù hợp tốt trong trường hợp MRC có thể là do sự đơn giản của cấu hình và tương tác giữa các lớp, trong đó tất cả các vòng đồng và GCI hoàn toàn chồng lên nhau. Tuy nhiên, trong trường hợp của CRC, một sai khác nhỏ giữa phổ hấp thụ mô phỏng và đo đạc có thể được nhận ra. Mặc dù vậy, nhìn một cách tổng thể kết quả thực nghiệm phù hợp 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 này có thể đến từ sự phức tạp của tương tác nhiều lớp trong CRC, trong đó có thể xảy ra sự không khớp trong quá trình định hướng mẫu. Hơn nữa, các vòng GCI có thể không hoàn toàn đồng nhất, điều này làm cho các tính chất của các vòng chế tạo có thể không giống hoàn toàn với các vòng trong mô phỏng. Tuy nhiên, mục tiêu chính của MA đề xuất là chuyển đổi giữa các chế độ hấp thụ bằng tác động cơ học đã được bảo tồn tốt.

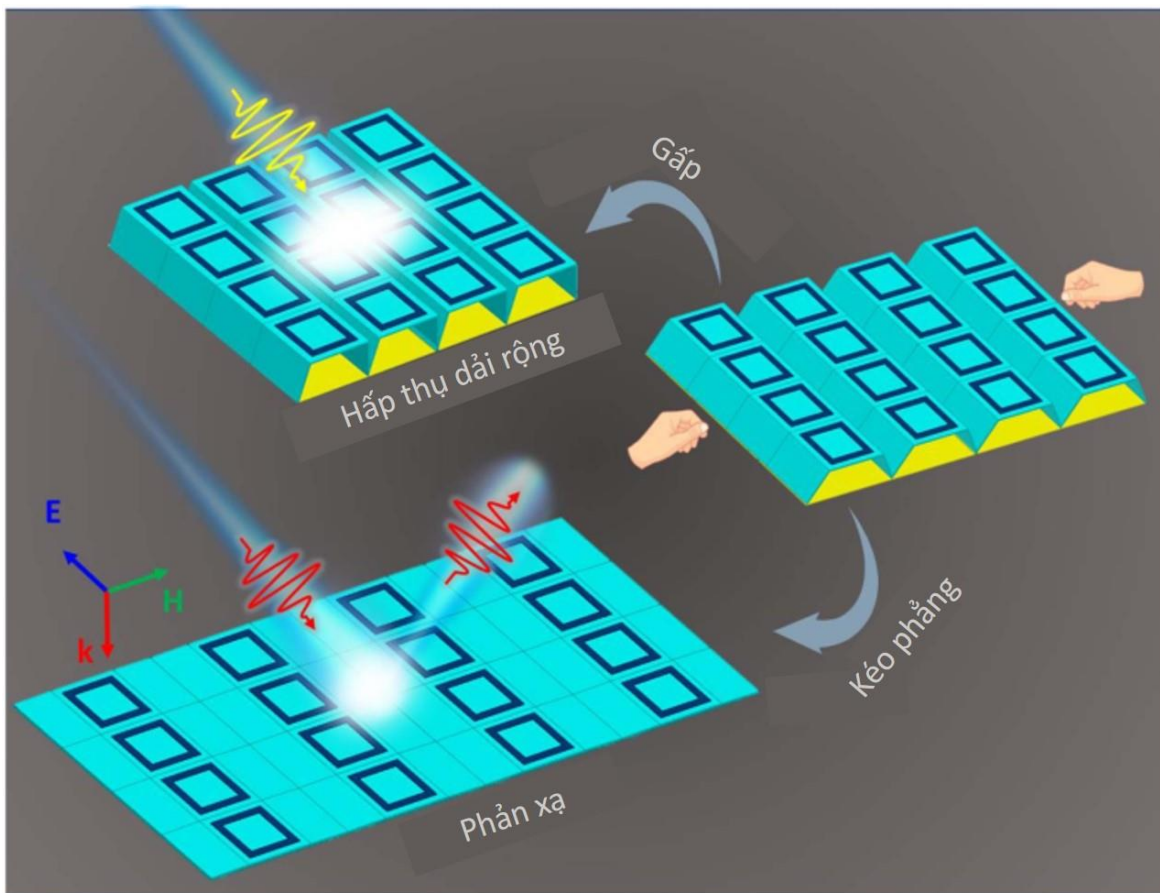


Hình 3.9. Phổ hấp thụ được mô phỏng và đo đạc ở cấu hình CRC và MRC ở chế độ (trái) TE và (phải) TM.

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

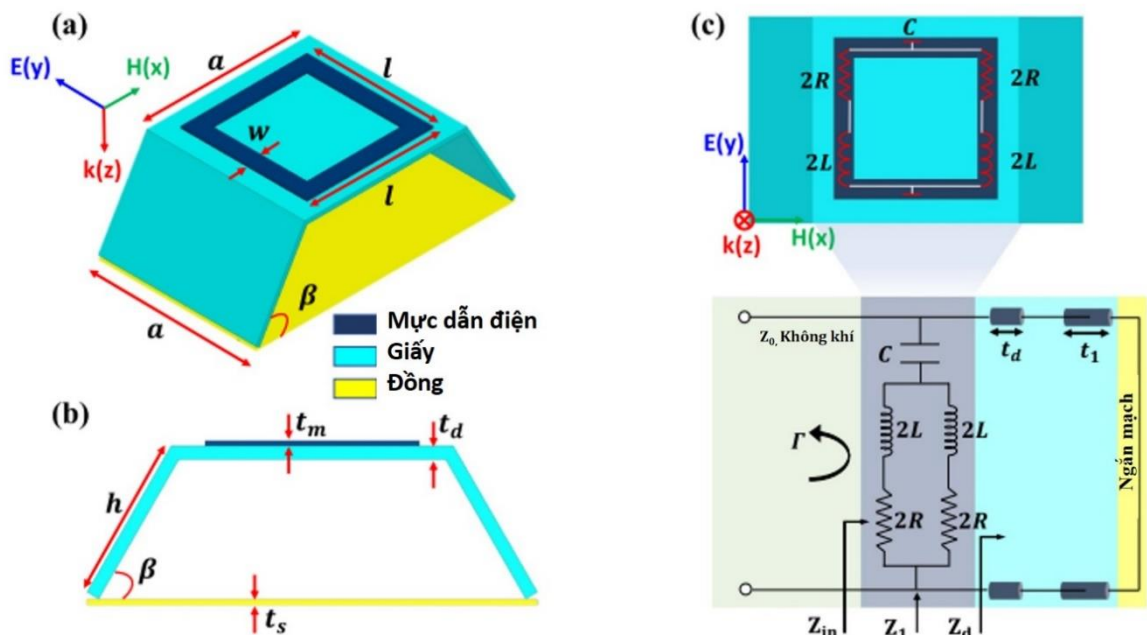
3.2.1. Mô hình thiết kế vật liệu biến hóa làm từ giấy

Trong nghiên cứu tiếp theo, luận án đề xuất một cách tiếp cận mới dựa trên thiết kế origami (được biết đến là nghệ thuật gấp giấy có nguồn gốc từ Nhật Bản) [93-95] thông qua tính toán lý thuyết và mô phỏng. Bằng cách sử dụng mực dẫn điện và cấu trúc gấp, nghiên cứu sinh đã thiết kế một 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). OBMM trong nghiên cứu này khác biệt so với các cấu trúc hấp thụ thông thường bởi nó được làm từ giấy với lớp mực in dẫn điện trên bề mặt và phủ một lớp đồng mỏng phía dưới. Thay vì sử dụng các điện môi cứng thông thường, việc sử dụng giấy làm điện môi cho phép tạo ra cấu trúc hấp thụ có tính linh hoạt và đa chức năng với hai chế độ hoạt động khác nhau.



Hình 3.10. Minh họa về hai chế độ: hấp thụ và phản xạ bằng cách sử dụng MM trên origami.

Cấu trúc ô cơ sở được minh họa trong Hình 3.11(a) và 3.11(b). Điều kiện biên tuần hoàn được đặt theo hướng x và y . Sóng kích thích được thiết lập sao cho véc-tơ sóng vuông góc với bề mặt mẫu (x - y). 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 như được thể hiện trong Hình 3.11(a) và 3.11(b). 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. 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 [96,97], 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.



Hình 3.11. (a-b) Sơ đồ của ô cơ sở được thiết kế với các tham số cấu trúc và (c) mạch tương đương TL tương ứng.

Nghiên cứu không chỉ mô phỏng mà còn sử dụng lý thuyết TL (đã được sử dụng phổ biến để phân tích MM [98-100]) để kiểm chứng. Như được thể hiện trong Hình 3.11(c), OBMM có thể được biểu diễn thành ba phần sử dụng mô hình TL tương

đương. Cụ thể, phần đầu tiên (màu xám) bao gồm điện trở R, tụ điện C và cuộn cảm L. Phần thứ hai (màu xanh lam) bao gồm lớp giấy với độ dày t_d và không khí với độ dày $t_1 = h \times \sin(\beta)$. Phần cuối cùng (màu vàng) là tấm đồng nối tắt mạch. Mạch RLC có tổng trở Z_{FSS} , trong khi môi trường điện môi có trở kháng Z_d , được biểu diễn tương ứng như sau [101]:

$$Z_{FSS} = R + i \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C} \right) \quad (3.1)$$

$$Z_d = iZ_0 \tan[k_0(h - t)] + iZ_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r + i\epsilon_i}} \quad (3.2)$$

với $t = t_d + t_1$

$$Z_{in} = \frac{Z_d Z_{FSS}}{Z_d + Z_{FSS}} \quad (3.3)$$

Do đó, độ hấp thụ (A_M) của cấu trúc có thể được tính toán như một hàm của Z_0 và phần thực của Z_{in} :

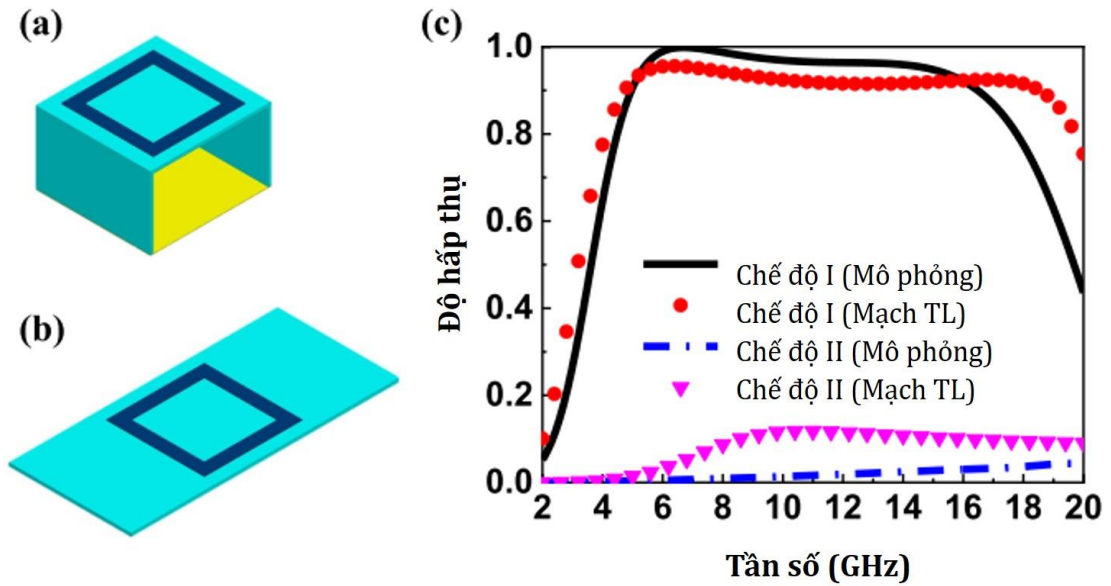
$$A_M = 1 - \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|^2 \quad (3.4)$$

Trong nghiên cứu này, đánh giá ban đầu về các thông số mạch L và C được tham khảo từ công trình của Ghosh và Srivastava [101]. Mạch tương đương TL đã được xây dựng và các hệ số phản xạ tương ứng được xác định bằng cách sử dụng phần mềm HP Advanced Design System (ADS). Bằng cách so sánh giữa dữ liệu mô phỏng và tham khảo, chức năng điều chỉnh của ADS được áp dụng để tối ưu hóa giá trị thành phần mạch và thu được: $L = 7,712$ nH, $C = 0,076$ pF và $R = 441,1$ Ohm.

Để thỏa mãn yêu cầu tỷ lệ giữa kích thước của MM và bước sóng hoạt động, 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

Tiếp theo, luận án khảo sát sự phụ thuộc của OBMM vào các tham số cấu trúc và tối ưu hóa tính chất phản xạ và hấp thụ của nó. Đối với tất cả các tính toán, sóng điện từ tới ở chế độ điện trường ngang (TE) và vuông góc với mặt phẳng (x - y) của OBMM, như đã được mô tả trong Hình 3.11(a).

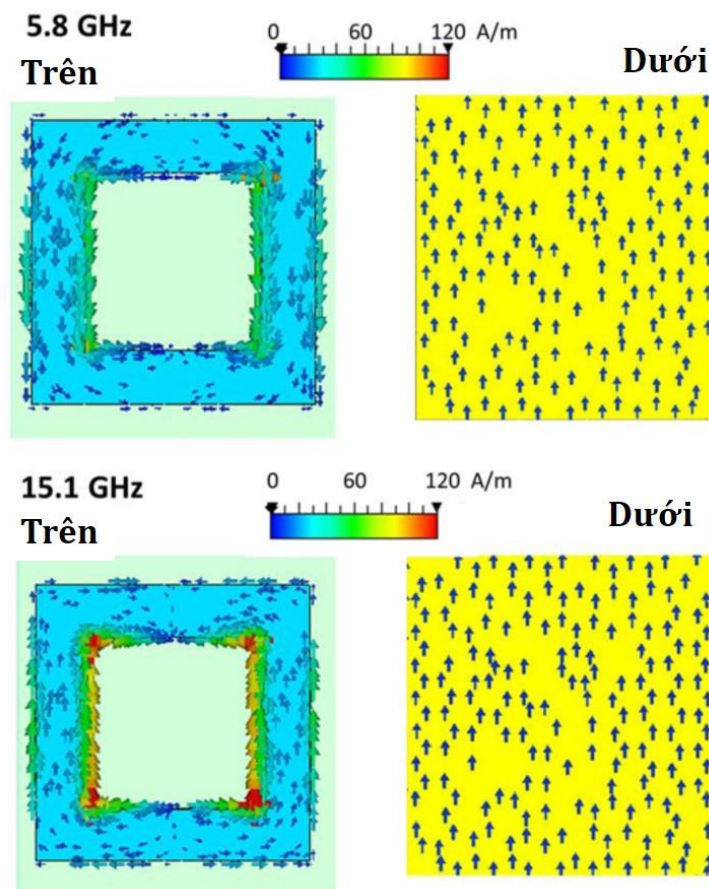


Hình 3.12. Cấu hình cấu trúc ở (a) chế độ I và (b) chế độ II. (c) Độ hấp thụ tương ứng trong so sánh giữa mô phỏng và tính toán mạch tương đương TL.

Như đã trình bày phía trên, có hai chế độ hoạt động cho OBMM. 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, như hiển thị trong các Hình 3.12(a) và 3.12(b) tương ứng. Kết quả tối ưu của cấu trúc OBMM được mô phỏng bằng CST và tính toán bằng mạch tương đương TL được thể hiện trong Hình 3.12(c). 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 giảm xuống 0. Nguyên nhân là do sóng tới bị chặn bởi lớp đồng và phản xạ lại hoàn toàn. Kết quả tính toán tương đồng với kết quả mô phỏng. Do cơ chế hoạt động tại chế độ phản xạ rất đơn giản, trong phần tiếp theo, luận án chủ yếu tập trung vào nghiên cứu và phân tích chế độ hấp thụ.

Để hiểu và làm rõ cơ chế hấp thụ của cấu trúc đề xuất, phân bố dòng bề mặt của cấu trúc in phía trên và tấm đồng liên tục phía dưới tại hai đỉnh hấp thụ, 5,8 và 15,1 GHz đã được mô phỏng. Kết quả được trình bày trong Hình 3.13. Có thể thấy, tại cả hai đỉnh hấp thụ, dòng chủ yếu tập trung vào hai cạnh dọc của vòng hình vuông

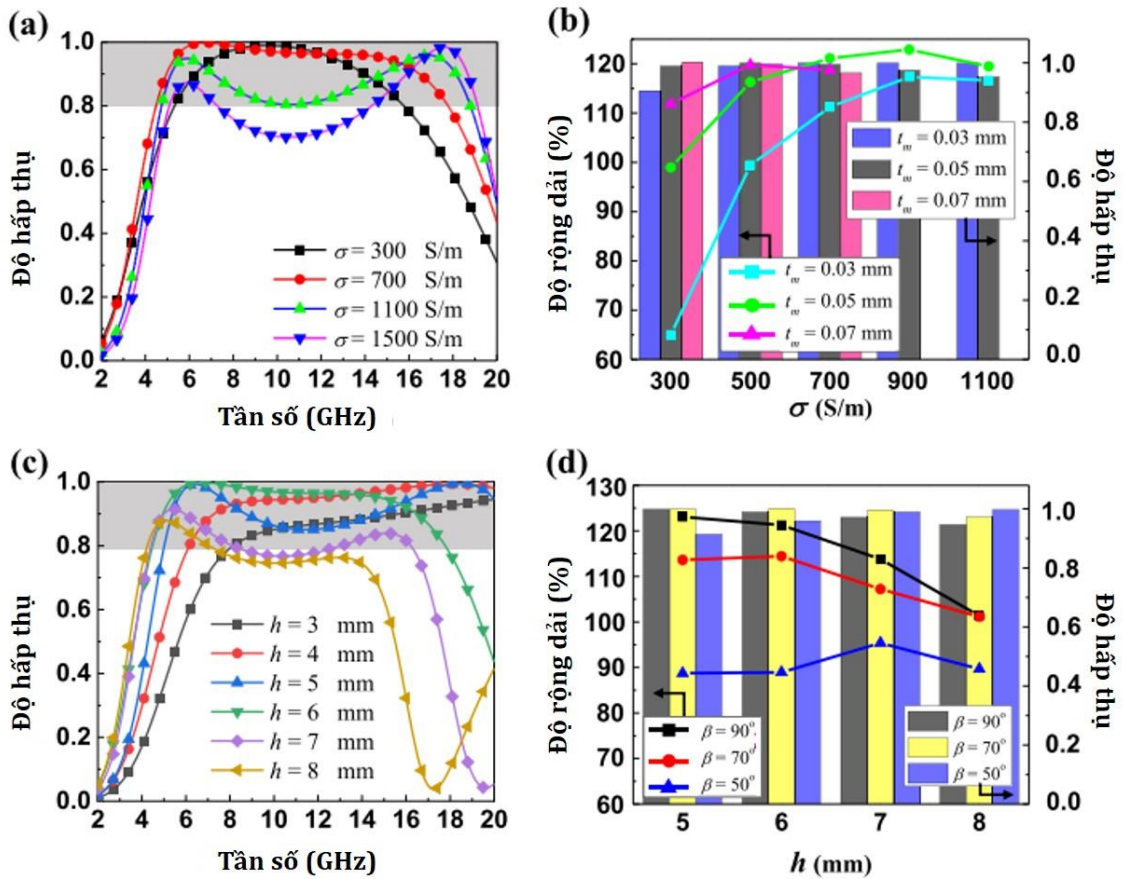
phía trước theo hướng \mathbf{E} trong khi được phân bố đều trên tấm đồng phía sau. Tuy nhiên, phân bố dòng giữa các lớp phía trên và dưới là song song tại tần số 15,1 GHz nhưng lại đối song song tại tần số 5,8 GHz. Kết quả này có thể được giải thích bởi sự ghép cặp giữa cấu trúc vòng vuông in và lớp 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]. 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.



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

Tiếp theo, luận án khảo sát sự thay đổi tính chất hấp thụ của cấu trúc OBMM với các giá trị khác nhau của tham số cấu trúc và thông số vật liệu trong chế độ hấp thụ. Cụ thể, nghiên cứu này thay đổi giá trị của σ và h để xem xét ảnh hưởng của chúng đến tần số và dải tần hấp thụ. Như thể hiện trong Hình 3.14(a), khi giá trị σ giảm từ 1500 S/m, khoảng cách giữa hai đỉnh hấp thụ giảm và dần gộp thành một đỉnh duy nhất khi $\sigma = 300$ S/m. Mặc dù vậy, khi σ tăng đến 1500 S/m, độ hấp thụ

giảm, đặc biệt là vùng trung tâm lân cận 10 GHz, do sự tách biệt mạnh mẽ giữa tần số cộng hưởng từ và điện. Điều này có thể được hiểu thông qua sơ đồ lai hóa MMs cặp dây bị cắt, trong đó độ dẫn càng cao dẫn đến lai hóa càng mạnh và gây nên sự phân tách lớn hơn giữa hai cộng hưởng từ và điện được lai hóa [102-104].



Hình 3.14. Kết quả mô phỏng 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 .

Độ dẫn của vật liệu cũng ảnh hưởng đến dải hấp thụ của MMs. Dải tần hấp thụ của cấu trúc đề xuất có thể được đánh giá như sau:

$$BW = 2 \frac{f_{\text{high}} - f_{\text{low}}}{f_{\text{high}} + f_{\text{low}}} \quad (3.5)$$

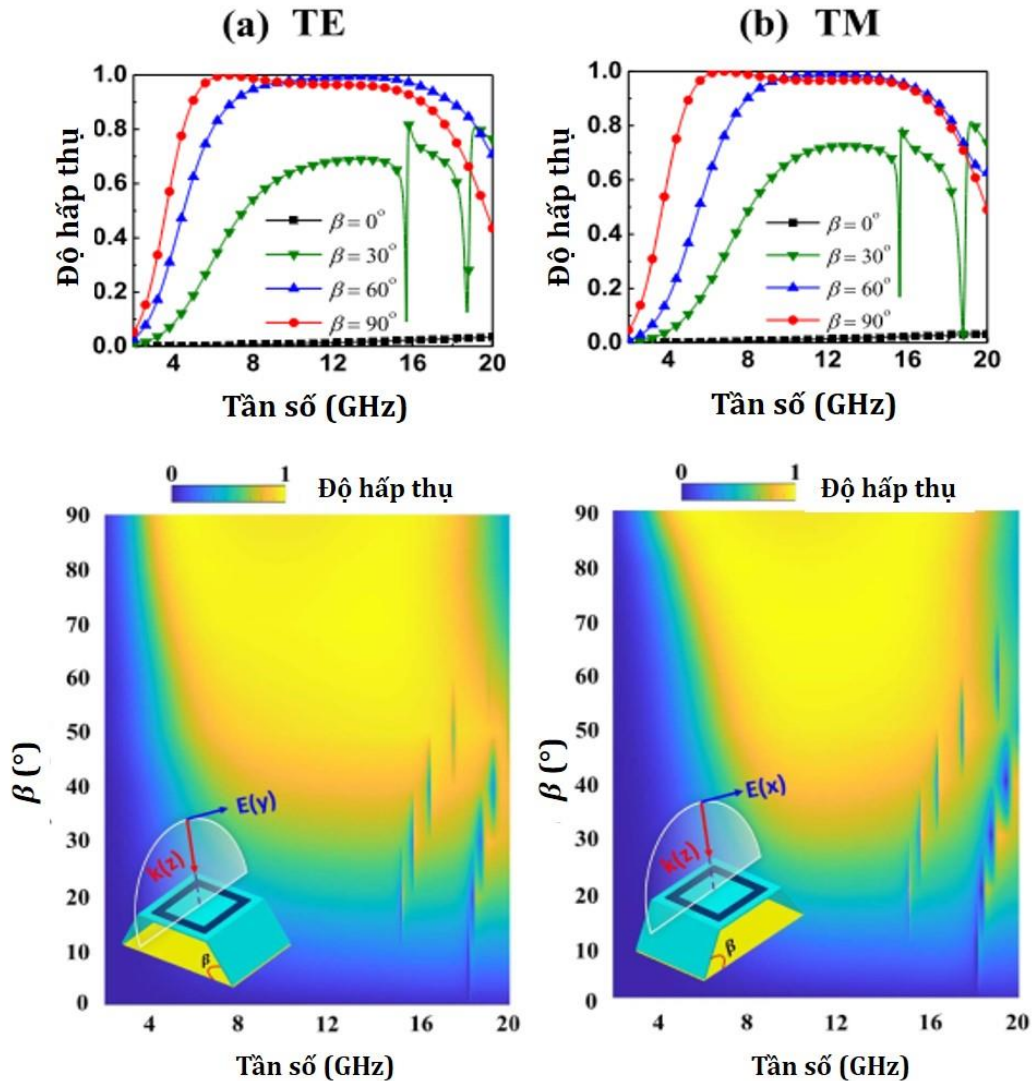
trong đó f_{high} và f_{low} lần lượt là tần số giới hạn trên và dưới của dải tần, mà trong đó độ hấp thụ duy trì trên 80%. Hình 3.14(a) cho thấy độ hấp thụ dải rộng được duy trì trên 80% khi độ dẫn điện σ nằm trong khoảng 300 đến 500 S/m. Nghiên cứu này chỉ quan tâm về các trường hợp đạt hấp thụ trên 80% trong toàn bộ dải hấp thụ. Do đó, trường hợp $\sigma = 1500$ S/m có thể bị bỏ qua. Hình 3.14(b) trình bày bằng thông được

tính toán theo độ dẫn điện σ với các giá trị khác nhau của t_m . Khi σ tăng từ 300 đến 500 S/m, dải tần mở rộng và giá trị hấp thụ tối đa tăng khi độ dày lớp mực in tăng. Tuy nhiên, khi σ lớn hơn hoặc bằng 700 S/m, giá trị hấp thụ tối đa có xu hướng giảm khi độ dày lớp mực tăng; trong khi đó, dải hấp thụ mở rộng hơn khi t_m tăng từ 0,03 đến 0,05 mm nhưng lại giảm khi giá trị $t_m = 0,07$ mm. Theo như quan sát, $t_m = 0,05$ mm là giá trị độ dày tối ưu của lớp mực hoạt động hiệu quả nhất trong vùng tần số nghiên cứu. Dải hấp thụ đạt giá trị tối ưu là 117% với độ dẫn và độ dày của lớp mực là $\sigma = 700$ S/m và $t_m = 0,05$ mm, tương ứng.

Hình 3.14(c) biểu diễn sự phụ thuộc của phổ hấp thụ vào tham số h . Có thể thấy rằng sự thay đổi của h gây nên ảnh hưởng khác nhau đối với cộng hưởng từ và điện. Cụ thể, khi h tăng từ 3 đến 8 mm, đỉnh cộng hưởng từ dịch chuyển đi rất nhỏ trong khi tần số cộng hưởng điện giảm mạnh. Kết quả này có thể được giải thích bằng bản chất nội tại của các cộng hưởng từ và điện. Như đã được chứng minh trước đó, ϵ được kiểm soát bởi khoảng cách giữa các cấu trúc trong ô cơ sở của MM. Việc tăng h dẫn đến giảm mật độ của các electron trong cấu trúc dẫn đến đỉnh cộng hưởng điện dịch chuyển đáng kể về phía tần số thấp hơn [5]. Cường độ của cả hai đỉnh hấp thụ cũng có xu hướng giảm, có thể lí giải một cách đơn giản là do giảm thể tích lớp không khí khi h tăng. Sự thay đổi về cường độ và tần số của hai đỉnh hấp thụ chính dẫn đến sự thay đổi tương ứng của toàn bộ dải hấp thụ. Hình 3.14(d) mô tả độ rộng dải và giá trị hấp thụ tối đa khi góc nghiêng β và chiều dài h thay đổi. Hai tham số này trực tiếp quyết định tương tác giữa cấu trúc và sóng điện từ tới. 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.

Khi gấp (hoặc kéo phẳng) mẫu MMs, góc β thay đổi khiến cấu trúc biến dạng. Đặc biệt, góc này xác định góc nghiêng và chiều cao tổng thể của cấu trúc MM. Do đó, khảo sát phổ hấp thụ theo các giá trị β khác nhau là việc làm cần thiết. Như thể hiện trong Hình 3.15, phổ hấp thụ thay đổi trong cả hai chế độ TE và TM. Với chế độ TE, độ hấp thụ khá thấp (<50%) khi góc β nhỏ hơn 30° . Tuy nhiên, khi β tăng, cường độ hấp thụ cũng tăng và dải hấp thụ được mở rộng, đạt giá trị hơn 80% trong khoảng tần số từ 8 đến 20 GHz. Mặc dù dải hấp thụ trong chế độ TM hẹp hơn so với

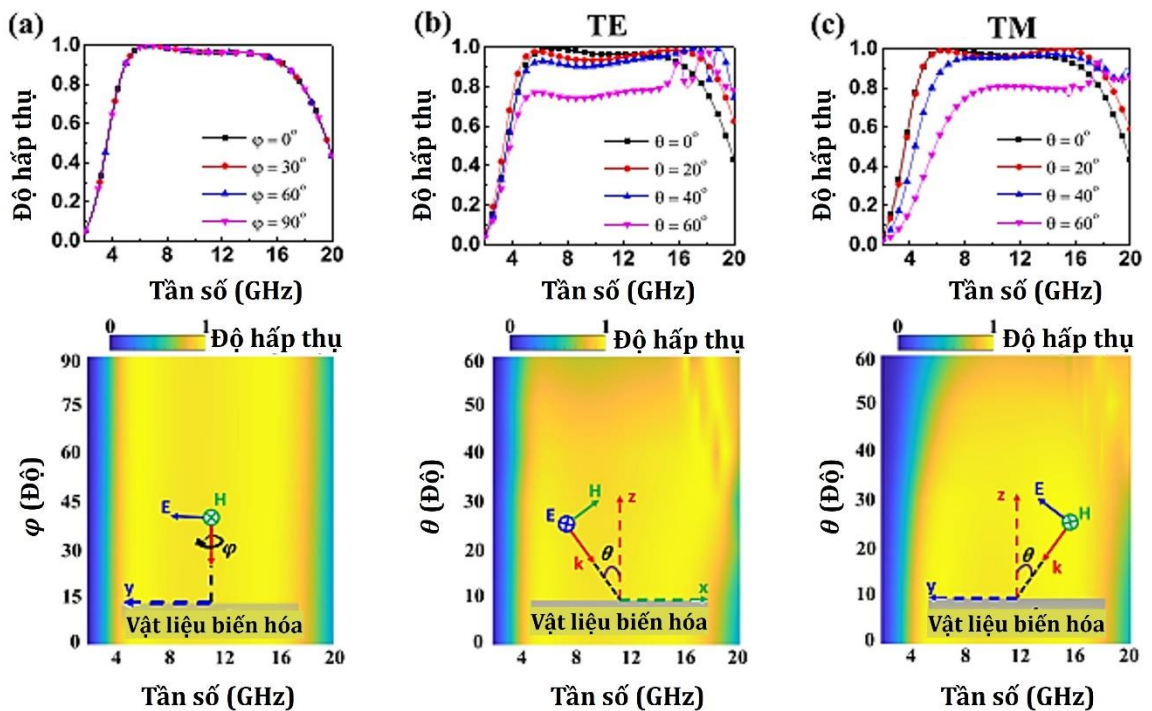
chế độ TE, nhưng sự khác biệt là có thể chấp nhận được. Do đó, cấu trúc này có thể hoạt động hiệu quả dưới cả hai chế độ.



Hình 3.15. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của phổ hấp thụ (chế độ I) vào góc gập β trong chế độ (a) điện trường ngang (TE) và (b) từ trường ngang (TM).

L luận án cũng nghiên cứu tính ổn định của cấu trúc OBMM đề xuất dưới các giá trị khác nhau của góc phân cực φ và góc tới θ . Kết quả tính toán tương ứng được trình bày trong Hình 3.16. Trước tiên, sóng điện từ tới được đặt vuông góc với bề mặt OBMM để quan sát sự phụ thuộc vào góc phân cực. Như có thể thấy từ Hình 3.16(a), cấu trúc này không phụ thuộc vào phân cực; cụ thể, độ hấp thụ và dải hấp thụ gần như không thay đổi khi góc phân cực tăng từ 0° đến 90° . Điều này là dễ hiểu do tính đối xứng trong thiết kế OBMM tương ứng với các hướng của \mathbf{E} và \mathbf{H} . Trong các Hình 3.16(b) và 3.16(c), chúng ta có thể thấy độ hấp thụ bị ảnh hưởng khi góc tới θ thay đổi trong chế độ TE và TM, tương ứng. Trong chế độ TE, vật liệu hấp thụ đề xuất

hoạt động hiệu quả với các giá trị góc tới từ 0° đến 60° . Khi θ tăng, độ hấp thụ ổn định trong khi độ rộng dải hấp thụ có sự dịch chuyển xanh và mở rộng nhẹ. Trong chế độ TM, độ hấp thụ của cấu trúc vẫn ổn định nhưng độ rộng dải hấp thụ có sự dịch chuyển đáng kể lên vùng tần số cao hơn khi θ tăng. Sự khác biệt giữa chế độ TE và TM có thể được giải thích do dải hấp thụ của OBMM được tạo thành từ cả cộng hưởng từ (tại 5,8 GHz) và cộng hưởng điện (tại 15,1 GHz). Nhìn chung, ảnh hưởng của góc tới gây ra đối với mỗi đỉnh cộng hưởng là khác nhau. Ví dụ, trong chế độ TE, vị trí của tần số cộng hưởng từ chỉ bị chi phối bởi các tham số hình học mà không phụ thuộc vào góc tới, trong khi cường độ của nó giảm dần khi θ tăng. Mặt khác, trong chế độ TM, mật độ "điện tử tự do" trong cấu trúc thay đổi khi có sự thay đổi điện trường tại một góc tới nhất định và ảnh hưởng mạnh đến cả tần số cộng hưởng từ và điện.



Hình 3.16. Phổ hấp thụ mô phỏng (chế độ I) dưới các (a) góc phân cực khác nhau và (b, c) các góc tới khác nhau tại chế độ TE và TM, tương ứng.

Luận án so sánh một số tiêu chí của đặc tính hấp thụ như tần số hoạt động, loại cấu trúc, phân cực và khả năng chuyển đổi giữa nghiên cứu này với các công trình công bố trước đó, như được trình bày trong Bảng 3.1. Có nhiều kỹ thuật để đạt được hấp thụ dải rộng được liệt kê như cộng hưởng không phụ thuộc tần số, cấu trúc dựa trên nước, cấu trúc toàn điện môi và cấu trúc sử dụng vật liệu có tính chất điện trở.

OBMM được đề xuất sử dụng cấu trúc gấp đơn giản với tính năng có thể điều chỉnh/đa chức năng, có thể hấp thụ sóng điện từ dải rộng với góc phân cực lớn.

Bảng 3.1. So sánh giữa cấu trúc hấp thụ MM đề xuất với các thiết kế trước đó.

Tham khảo	Tần số trung tâm (GHz)	Dải hấp thụ (GHz)	Số lớp	Loại cấu trúc	Không phụ thuộc phân cực	Có khả năng chuyển đổi
[105]	5 và 12,5	3,9 - 6 và 11,6 - 14,5	29	Cấu trúc đa lớp	Có	Không
[106]	32	2,5 - 40	3	ITO	Có	Không
[107]	1,45	0,9 - 1,9	2	Silicon pha tạp n	Có	Không
[108]	10	5 - 15	2	Cấu trúc dựa trên nước	Có	Không
[109]	-	8,4 - 9,3 (ON) 9,2 - 10,4 (OFF)	3	Điện trở chip và diode PIN	Có	Có
[110]	9	1,2 - 19	3	Vật liệu từ	Có	Không
[111]	14,7	12,3 - 17,8	3	Không phụ thuộc tần số cộng hưởng	-	Không
Nghiên cứu này	10	5 - 16	3	Mực điện trở	Có	Có

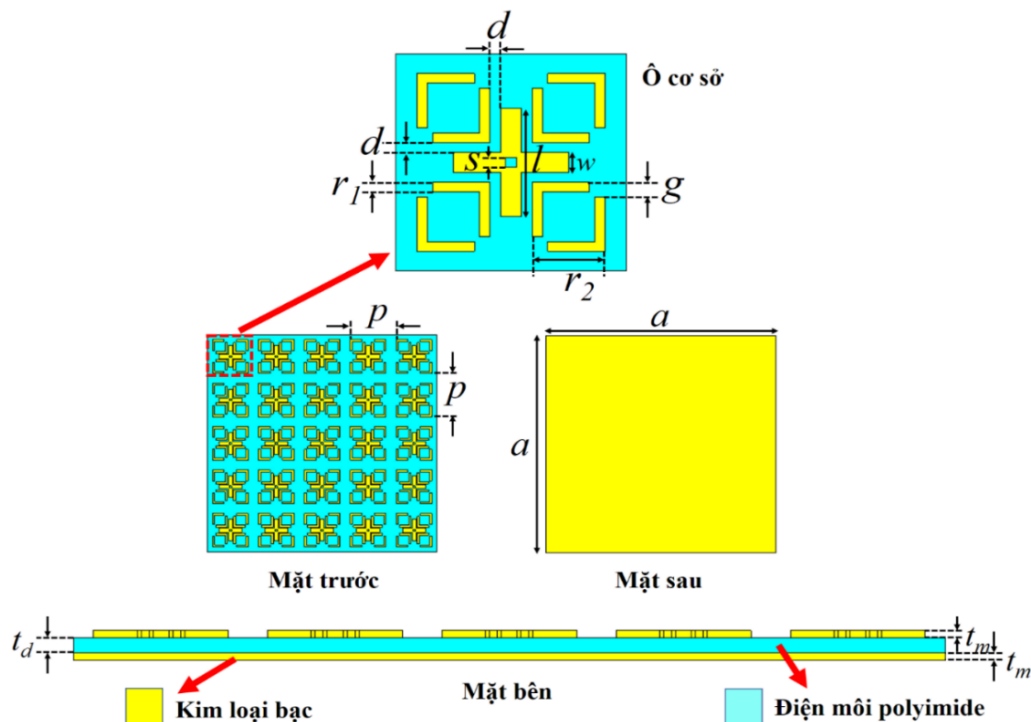
3.3. Điều khiển dải tần số hấp thụ sóng điện từ ở vùng THz bằng cách uốn cong vật liệu biến hóa

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

Nghiên cứu về MM nói chung và MA nói riêng có ý nghĩa đặc biệt trong việc phát triển vật liệu và công nghệ hoạt động ở vùng tần số THz [112, 113]. Vùng tần số THz được coi là một trong những chế độ tần số ít được nghiên cứu trong phổ điện từ, mặc dù nó rất hấp dẫn đối với nhiều ứng dụng đầy hứa hẹn [114, 115]. Vùng THz này về cơ bản là vùng tần số chuyển tiếp giữa vùng tần số vi sóng (với các thiết bị và linh kiện điện tử dựa trên đáp ứng cô điển của điện tử) và vùng tần số hồng ngoại, quang học (chủ yếu liên quan đến các đặc trưng quang học, quang tử, thậm chí là

lượng tử với các thiết bị và linh kiện đặc trưng như laser và thấu kính). Nhờ tính chất phụ thuộc mạnh vào cấu trúc, MA có thể được thiết kế phù hợp nhằm tạo ra đáp ứng điện từ mạnh trong vùng tần số THz. Đặc biệt, đối với vùng tần số từ 0,1 THz đến 1 THz, thường được gọi là băng tần THz thấp, được coi là dải tần tiềm năng cho các mạng không dây 5G và 6G [116], MA hứa hẹn là nền tảng để phát triển các thiết bị và linh kiện mới có hiệu suất cao hơn so với các thiết bị linh kiện sử dụng các vật liệu thông thường trong tự nhiên.

Mô hình thiết kế MA ở vùng THz có khả năng uốn cong được thể hiện trên Hình 3.17. Về mặt cấu trúc, MA 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. Các cấu trúc cộng hưởng này được sắp xếp lặp lại tạo thành một dãy tuần hoàn của các ô cơ sở. Trong đó, 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 và bạc. Điện môi polyimide có độ điện thẩm là 3,5 với hệ số tổn hao là 0,0027. Kim loại bạc có độ dẫn điện là $6,3 \times 10^7$ S/m.



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

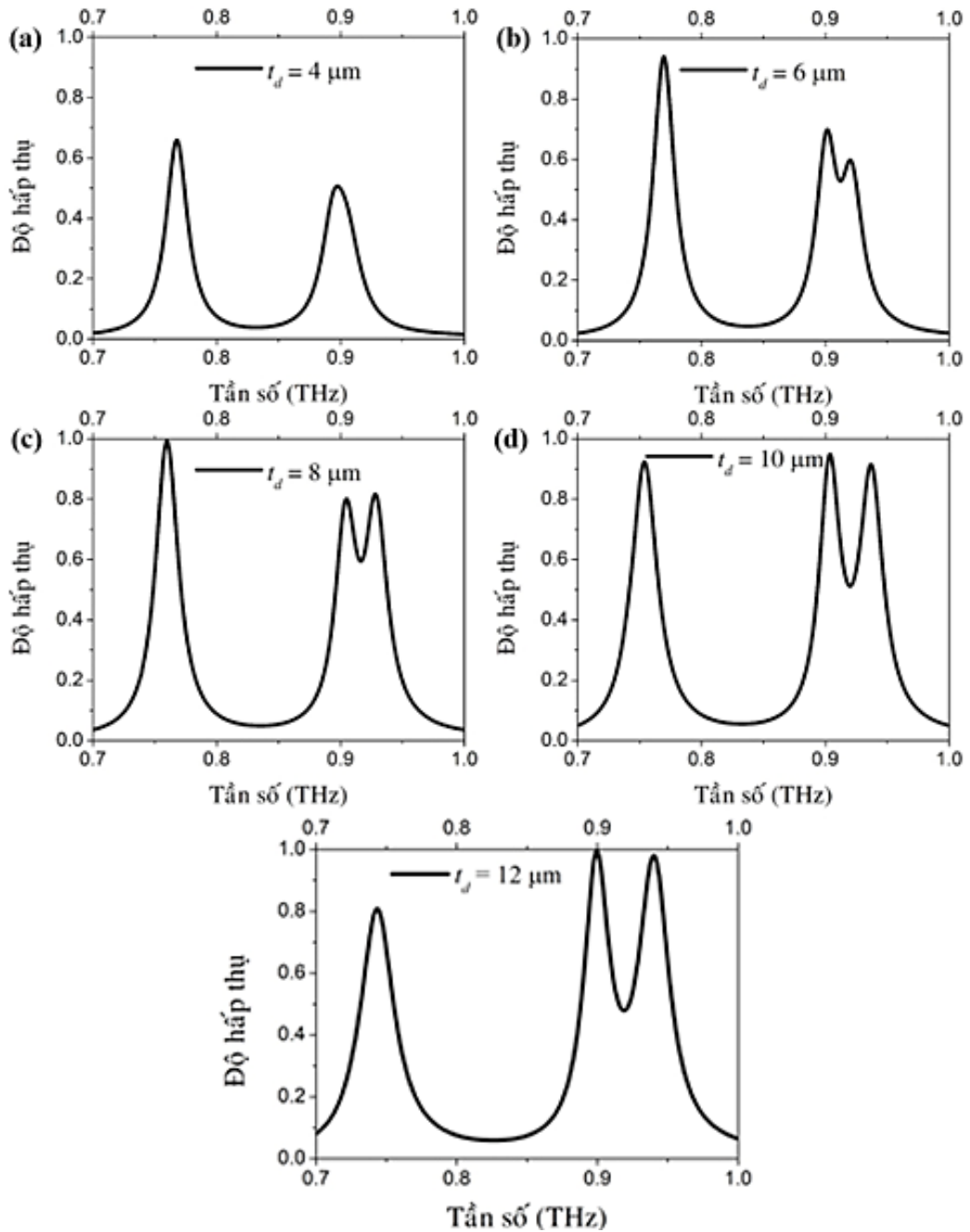
Bảng 3.2. Giá trị các tham số cấu trúc của mẫu vật liệu biến hóa được mô phỏng.

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

Rất nhiều nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, tham số cấu trúc độ dày có ảnh hưởng đáng kể đến độ hấp thụ và cường độ cộng hưởng của MM [117,118]. Vì thế, ảnh hưởng của độ dày điện môi polyimide được nghiên cứu để tối ưu khả năng hấp thụ của MA ở vùng tần số THz.

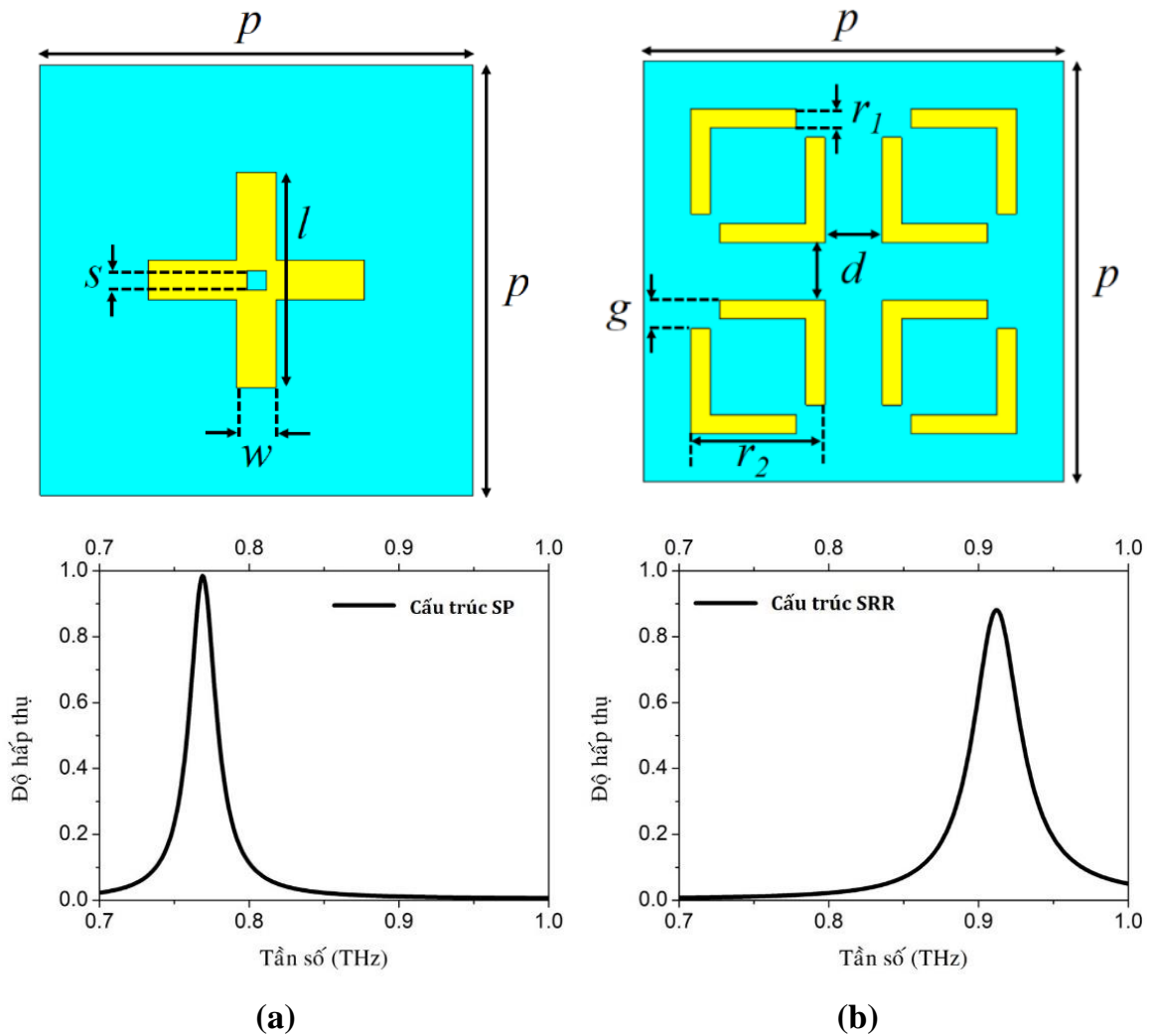
Hình 3.18 biểu diễn phổ hấp thụ của MA ứng với các độ dày điện môi t_d khác nhau. Ở $t_d = 4 \mu\text{m}$, MA tạo ra hai cực đại hấp thụ ở tần số 0,76 THz (với độ hấp thụ 68%) và 0,9 THz (với độ hấp thụ 50%). Việc tăng độ dày lớp điện môi lên $6 \mu\text{m}$ làm tăng độ hấp thụ của các đỉnh này lên tương ứng là 95% và 70%. Ngoài ra, đỉnh hấp thụ thứ ba xuất hiện ở tần số 0,92 THz với độ hấp thụ là 60%. Tại $t_d = 8 \mu\text{m}$, MA duy trì ba đỉnh hấp thụ, với đỉnh thứ nhất ở tần số 0,76 THz và đỉnh thứ hai và thứ ba di chuyển sang tần số cao hơn (lần lượt là 0,91 THz và 0,93 THz). Độ hấp thụ ba đỉnh lúc này tương ứng là 99%, 81%, và 83%. Ở $t_d = 10 \mu\text{m}$, phổ hấp thụ thể hiện ba cực đại hấp thụ ở 0,76 THz, 0,91 THz và 0,94 THz với giá trị lần lượt là 93%, 95% và 90%. Tiếp tục tăng độ dày lên $12 \mu\text{m}$ thì độ hấp thụ của đỉnh thứ nhất giảm còn 81%, trong khi độ hấp thụ của đỉnh thứ hai và thứ ba tăng lên 100% và 98%. Nhìn chung, MA được đề xuất thể hiện các đặc tính hấp thụ tối ưu khi độ dày lớp điện môi là $10 \mu\text{m}$, với độ hấp thụ vượt quá 90% ở cả ba đỉnh.



Hình 3.18. Phổ hấp thụ mô phỏng của MA khi thay đổi độ dày lớp điện môi.

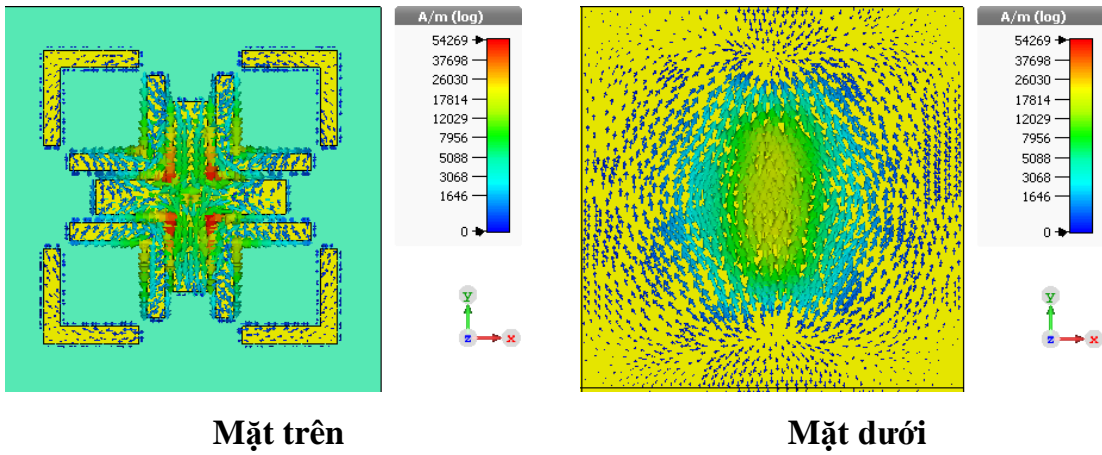
Để làm rõ vai trò của từng cấu trúc cộng hưởng lên phổ hấp thụ đa đỉnh, MA đề xuất đã được tách thành hai MA đơn lẻ chỉ sử dụng cấu trúc SP hoặc cấu trúc SRR. Phổ hấp thụ của hai cấu trúc đơn lẻ này được mô phỏng và trình bày trên Hình 3.19. Kết quả cho thấy, cả hai cấu trúc SP và SRR đều chỉ cho một đỉnh hấp thụ duy nhất. Tần số cộng hưởng của MA đơn lẻ sử dụng cấu trúc SP và SRR tương ứng là 0,77 và 0,92 THz. Mặc dù vậy, trong cấu trúc MA được đề xuất, phổ hấp thụ đa đỉnh không chỉ tồn tại các cộng hưởng đặc trưng của cấu trúc SP và SRR, mà còn xuất hiện thêm một cộng hưởng mới [Hình 3.18(d)]. Điều này cho thấy sự tương tác giữa trường điện

từ cảm ứng của hai cấu trúc cộng hưởng SP và SRR cũng đóng vai trò đáng kể. Dưới ảnh hưởng của tương tác này, đỉnh cộng hưởng mới đã được sinh ra ở lân cận tần số cộng hưởng riêng của cấu trúc SP.

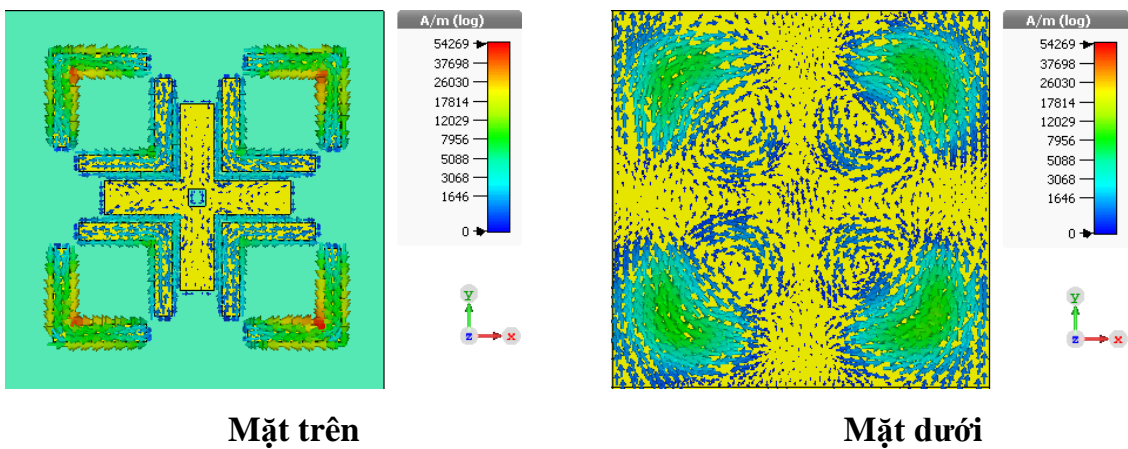


Hình 3.19. Phổ hấp thụ mô phỏng của vật liệu biến hóa khi chỉ có (a) cấu trúc SP và (b) SRR với $t_d = 10 \mu m$.

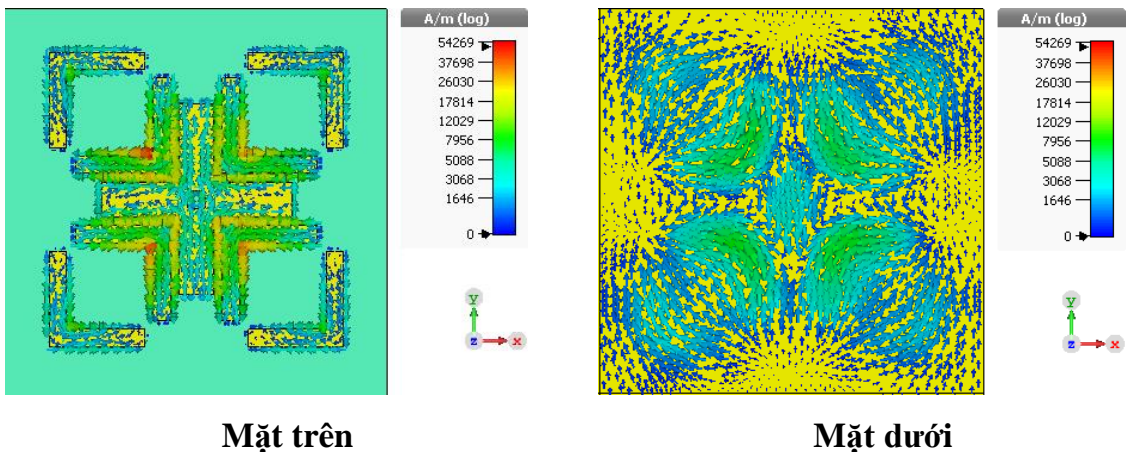
Nhằm làm sáng tỏ bản chất của MA khi tương tác với sóng điện từ, luận án đã tiến hành mô phỏng và biểu diễn dòng điện cảm ứng trên bề mặt của các lớp kim loại ở các tần số hấp thụ khác nhau trong Hình 3.20-3.22. Kết quả nghiên cứu cho thấy tại các tần số cộng hưởng, chiều dòng điện trên bề mặt hai lớp kim loại ở phía trên và dưới là đối xứng và ngược chiều nhau, chứng tỏ rằng hiện tượng cộng hưởng từ đã xuất hiện. Lưu ý rằng, các dòng điện được phân bố không giống nhau tại các tần số cộng hưởng khác nhau. Ở đỉnh hấp thụ thứ nhất, với tần số cộng hưởng 0,76 THz, dòng điện chủ yếu tập trung ở vị trí của cấu trúc SP. Sự phân bố này chứng tỏ rằng đỉnh hấp thụ tại tần số 0,76 THz được là do cấu trúc SP tạo ra.



Hình 3.20. Mô phỏng phân bố mật độ dòng điện tại tần số cộng hưởng 0,76 THz.



Hình 3.21. Mô phỏng phân bố mật độ dòng điện tại tần số cộng hưởng 0,91 THz.

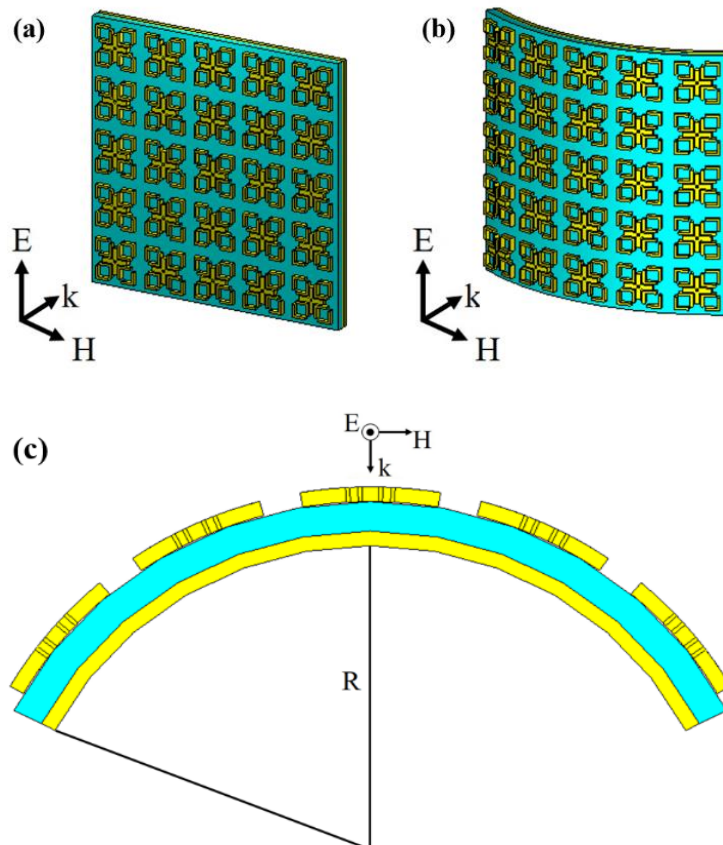


Hình 3.22. Mô phỏng phân bố mật độ dòng điện tại tần số cộng hưởng 0,94 THz.

Trong khi đó, các cộng hưởng ở 0,91 và 0,94 THz được kích thích bởi cấu trúc SRR. Tuy nhiên, sự phân bố dòng điện không đồng đều trên SRR ở các tần số này là kết quả của các tương tác điện từ giữa các cấu trúc SP và SRR. Cụ thể, ở tần số 0,91 THz, dòng điện chủ yếu phân bố ở các nhánh của SRR nằm xa tâm của ô cơ sở, trong khi ở tần số 0,94 THz, dòng điện lại chủ yếu tập trung tại các nhánh của SRR nằm

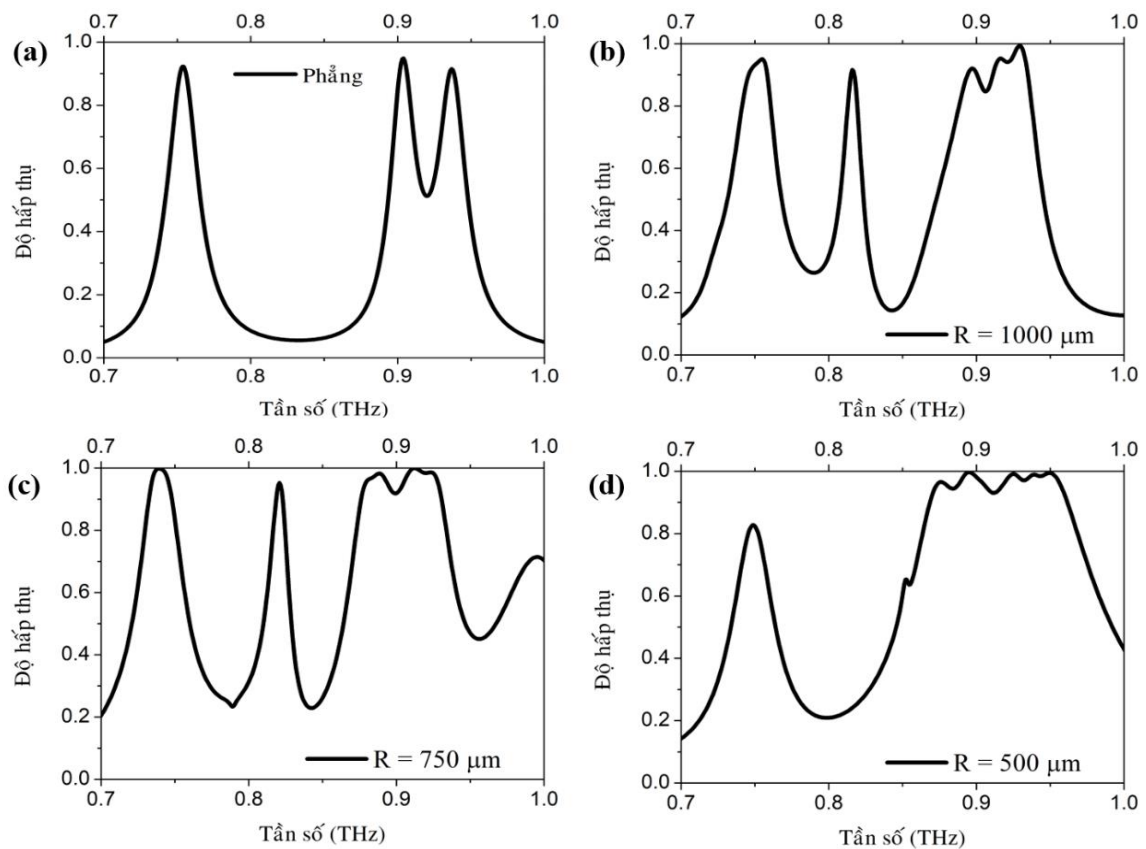
gần tâm của ô cơ sở. Hiện tượng quan sát được cho thấy cộng hưởng đặc trưng của SRR đã biến đổi thành hai cộng hưởng mới có sự phân bố dòng điện khác nhau, do ảnh hưởng của tương tác trường điện từ giữa cấu trúc SP và SRR. Kết quả là, cấu trúc MA được đề xuất thể hiện hấp thụ kép ở hai tần số 0,91 và 0,94 THz, thay vì hấp thụ đơn ở tần số 0,92 THz của vật liệu biến hóa chỉ cấu tạo bởi cấu trúc SRR.

Trong nghiên cứu tiếp theo, luận án khảo sát ảnh hưởng của độ cong đến các đặc tính hấp thụ của MA. Cấu hình của MA trong nghiên cứu này được mô tả trong Hình 3.23(a) và 3.23(b) tương ứng cho các MA ở dạng phẳng và uốn cong. Phạm vi uốn của vật liệu được miêu tả trong Hình 3.23(c), liên quan đến tham số bán kính uốn cong, ký hiệu là R . Tham số R này thể hiện bán kính của đường tròn tạo bởi mặt cong của vật liệu khi nó bị uốn. Để hiểu rõ đặc trưng của MA dưới tác động uốn cong, luận án đã nghiên cứu phổ hấp thụ của MA, sử dụng lớp điện môi có độ dày $10\ \mu\text{m}$, cả ở trạng thái phẳng và uốn cong theo các bán kính cong khác nhau.



Hình 3.23. (a) Vật liệu hấp thụ 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 .

Hình 3.24(a) biểu diễn phổ hấp thụ của vật liệu ở dạng phẳng. Rõ ràng, MA ở trạng thái này được đặc trưng bởi ba đỉnh hấp thụ nổi bật nằm ở khoảng 0,76, 0,91 và 0,94 THz, mỗi đỉnh thể hiện độ hấp thụ vượt quá 90%. Tiếp theo, phổ hấp thụ mô phỏng khi vật liệu bị uốn cong với bán kính cong là 1000 μm được biểu diễn trên Hình 3.24(b). Kết quả cho thấy 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%. Trong Hình 3.24(c), phổ hấp thụ được trình bày ứng với MA có bán kính cong $R = 750 \mu\text{m}$. Cấu hình này tạo ra hai đỉnh hấp thụ đơn lẻ ở 0,74 và 0,82 THz, có độ hấp thụ lần lượt là 99,8% và 95%. Đáng chú ý, 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 vượt quá 90%. Hình 3.24(d) mô tả đặc trưng hấp thụ của MA có bán kính cong $R = 500 \mu\text{m}$. Trong trường hợp này, 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 MA 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

Trong chương này, nghiên cứu sinh đã trình bày một MA có thể cấu hình lại trong vùng vi sóng dựa trên cấu trúc nhiều lớp. Bằng tác động cơ học xoay lớp cấu trúc cộng hưởng dạng vòng ở trên cùng quanh trục thẳng đứng của MA một góc 90° , MA đã tạo ra hai chế độ hấp thụ riêng biệt. Ở cấu hình MRC chỉ có một đỉnh hấp thụ duy nhất, trong khi cấu hình CRC cho phép hấp thụ sóng điện từ đa dải tần. Nguồn gốc của các đỉnh hấp thụ mới trong cấu hình thứ hai đã được nghiên cứu và tìm ra bằng cách nghiên cứu dòng điện cảm ứng trên các mẫu kim loại và bằng cách nối tắt các nhóm cấu trúc cộng hưởng vòng thành phần. Cấu trúc được đề xuất đã được kiểm chứng thực nghiệm và cho thấy sự dễ dàng trong chuyển đổi giữa hai cấu hình khác nhau để có được tính năng hấp thụ mong muốn.

Tiếp theo, luận án đã đề xuất thiết kế một OBMM đơn giản nhưng có hai chức năng hoạt động như một vật liệu hấp thụ hoặc phản xạ dải rộng bằng cách sử dụng giấy in có thể co giãn. Cấu trúc vật liệu đề xuất đã được tối ưu hóa thông qua việc nghiên cứu các tham số hình học. Ở chế độ hấp thụ, độ hấp thụ đạt được là hơn 90% trong toàn bộ dải tần số hấp thụ từ 6 đến 16 GHz. Khi cấu trúc được kéo căng hoàn toàn, OBMM này hoạt động giống như một tấm gương kim loại, phản xạ tất cả các sóng điện từ tới trong vùng tần số được khảo sát. Ngoài ra, kết quả cho thấy rằng nó cũng có thể hoạt động hiệu quả dưới nhiều góc tới, lên tới 60° , và cũng thể hiện tính chất hấp thụ không phụ thuộc vào góc phân cực của sóng điện từ.

Cuối cùng, trong phần này của luận án, một thiết kế của MA trong miền tần số THz đã được đề xuất, thể hiện tính linh hoạt đối với độ uốn cong. MA được đề xuất và mô phỏng có cấu trúc đa lớp gồm: lớp kim loại bạc liên tục ở dưới, lớp điện môi polyimide trung gian có khả năng uốn dẻo và lớp kim loại bạc ở trên cùng được tạo hình thành các cấu trúc cộng hưởng SRR và SP. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng đặc trưng hấp thụ được tối ưu, đạt mức độ hấp thụ vượt quá 90% tại tất cả các đỉnh hấp thụ, khi độ dày lớp điện môi được điều chỉnh cỡ $10 \mu\text{m}$. Điều quan trọng là, dải tần hấp thụ có thể được điều khiển linh hoạt bằng cách uốn cong MA. Khi vật liệu được uốn cong, phổ hấp thụ của MA chuyển từ ba đỉnh sang đa đỉnh và cuối cùng là đa đỉnh kết hợp với dải rộng. Nhìn chung, MA có khả năng duy trì độ hấp thụ tốt trên cả cấu hình phẳng và cong, trong vùng bán kính cong từ 1000 đến $750 \mu\text{m}$. Khi bán kính

cong đạt đến 500 μm , một số đỉnh hấp thụ bắt đầu có xu hướng bị suy giảm cường độ.

Bảng 3.3 so sánh kết quả nghiên cứu điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ bằng tác động cơ học trong Chương 3 với một số kết quả nghiên cứu khác. Các nghiên cứu khác cho thấy có nhiều phương pháp điều khiển cơ học đa dạng khác nhau thông qua việc tích hợp nước hoặc sử dụng cơ cấu truyền động. Về cơ bản, các vật liệu biến hóa được nghiên cứu trong Chương này có cấu trúc và phương pháp điều khiển bằng cơ học đơn giản nhưng vẫn có thể điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ một cách hiệu quả, cho phép chuyển đổi liên quan đến dải tần hoặc cường độ hấp thụ.

Bảng 3.3. So sánh giữa các nghiên cứu điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ bằng tác động cơ học trong luận án với các nghiên cứu khác.

Tham khảo	Phương pháp điều khiển	Chức năng điều khiển	Vùng tần số hoạt động	Đặc điểm cấu trúc
[119]	Điều khiển độ dày của lớp điện môi làm từ nước	Chuyển đổi giữa hấp thụ dải rộng - hấp thụ dải hẹp	Vùng GHz	Tích hợp nước làm lớp điện môi
[120]	Điều khiển kích thước của cấu trúc cộng hưởng làm từ nước	Chuyển đổi giữa hấp thụ dải rộng - hấp thụ đỉnh kép	Vùng GHz	Tích hợp nước làm cấu trúc cộng hưởng
[68]	Điều khiển độ dày lớp điện môi không khí	Dịch chuyển tần số hấp thụ	Vùng GHz	Truyền động
[121]	Điều khiển khoảng cách giữa các lớp	Dịch chuyển tần số hấp thụ	Vùng THz	Truyền động vi cơ điện tử

Nghiên cứu trong luận án (Mục 3.1)	Xoay các lớp	Chuyển đổi giữa hấp thụ dải rộng - hấp thụ dải hẹp	Vùng GHz	Cấu trúc đa lớp, Mục dẫn điện dựa trên graphene
Nghiên cứu trong luận án (Mục 3.2)	Kéo, gấp	Chuyển đổi giữa hấp thụ dải rộng - phản xạ dải rộng	Vùng GHz	Giấy, Mục điện trở
Nghiên cứu trong luận án (Mục 3.3)	Uốn cong	Chuyển đổi giữa hấp thụ đa đỉnh – hấp thụ dải rộng	Vùng THz	Điện môi dẻo polyimide

Các kết quả nghiên cứu này sẽ góp phần cung cấp một cách tiếp cận đơn giản nhưng hiệu quả dựa trên tác động cơ học để tạo ra các MA có thể cấu hình lại. Các MA có thể cấu hình lại này sẽ rất hữu ích cho các thiết bị có thể chuyển đổi và điều chỉnh được, bao gồm bộ lọc, ăng-ten và thông tin liên lạc.

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

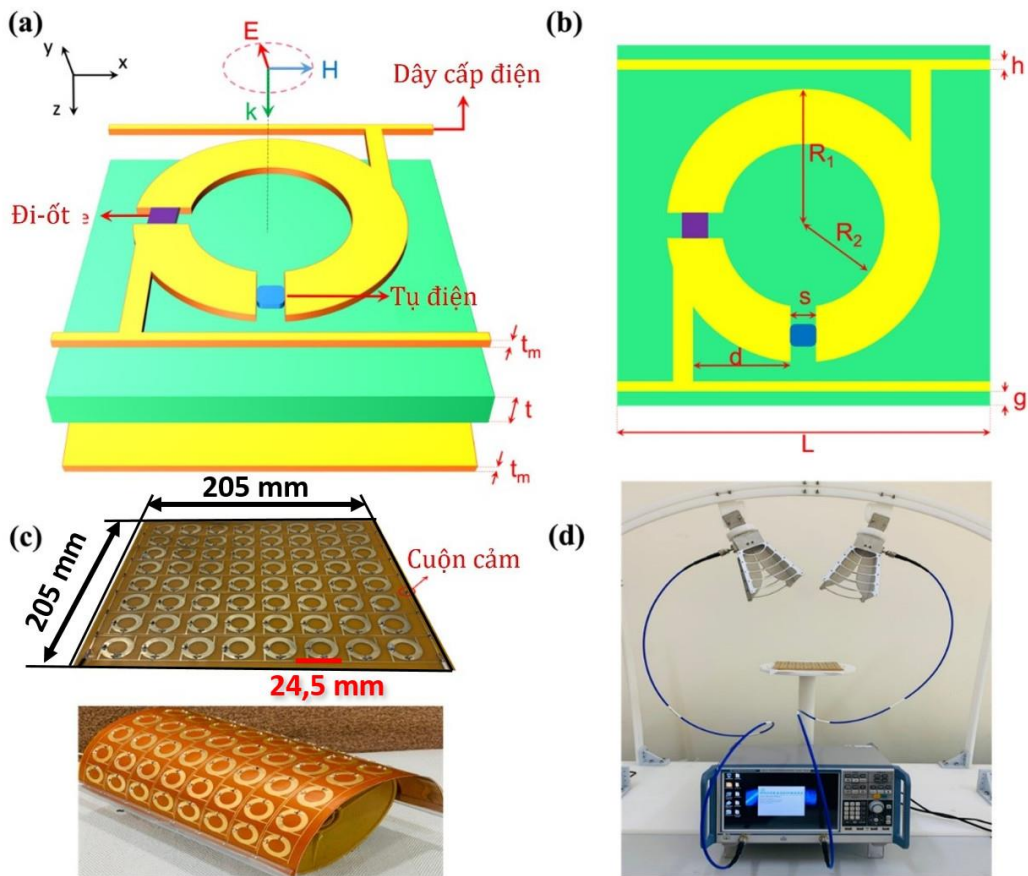
4.1. Vật liệu biến hóa đa chức năng hoạt động ở vùng GHz có khả năng chuyển đổi giữa chức năng hấp thụ và chức năng xoay góc phân cực của sóng điện từ

4.1.1. Cấu trúc vật liệu biến hóa đa chức năng

Trong mục này, nghiên cứu sinh đã nghiên cứu đề xuất một vật liệu biến hóa đa chức năng (Bi-functional metamaterial – BMM) có thể thay đổi đặc trưng điện từ dưới tác động của điện áp. Cấu trúc đề xuất của BMM 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. Vật liệu polyimide nổi tiếng với đặc tính nhẹ và linh hoạt. Sử dụng polyimide làm lớp điện môi cho phép cấu trúc của chúng ta dễ dàng uốn cong và biến dạng (Hình 4.1(c)). 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 điện từ truyền qua cấu trúc. 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. Để phục vụ mục đích tạo ra một cấu trúc có thể điều chỉnh được, một diode biến thiên được tích hợp vào rãnh bên trái của vòng cộng hưởng. Hai đường cấp nguồn được thiết kế để cung cấp điện áp cho diode 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. Cấu trúc chi tiết với các tham số cấu trúc tương ứng được hiển thị trong Hình 4.1(b). Trong thí nghiệm thực tế, một mẫu gồm 8×8 ô cơ sở đã được chế tạo, như trong Hình 4.1(c), bằng cách sử dụng kỹ thuật quang khắc và hàn linh kiện ngoại vi. Mỗi mảng được ngăn cách bởi một cuộn cảm để ngăn chặn sự tương tác ghép cặp giữa chúng và để đảm bảo không có dòng điện bề mặt chảy ngược về nguồn.

Trong thiết kế của vật liệu, các diode biến thiên và tụ điện có điện dung 0,2 pF được sử dụng để tạo ra MM đa chức năng. Diode 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. Để đơn giản, diode biến thiên được định nghĩa là một mạch nối tiếp RLC với các giá trị R, L và C tương ứng

được trích xuất từ mô hình SPICE của nó bằng cách sử dụng phần mềm ADS [122]. Các giá trị R , L , C của diode theo điện áp ngoài được liệt kê trong Bảng 4.1.

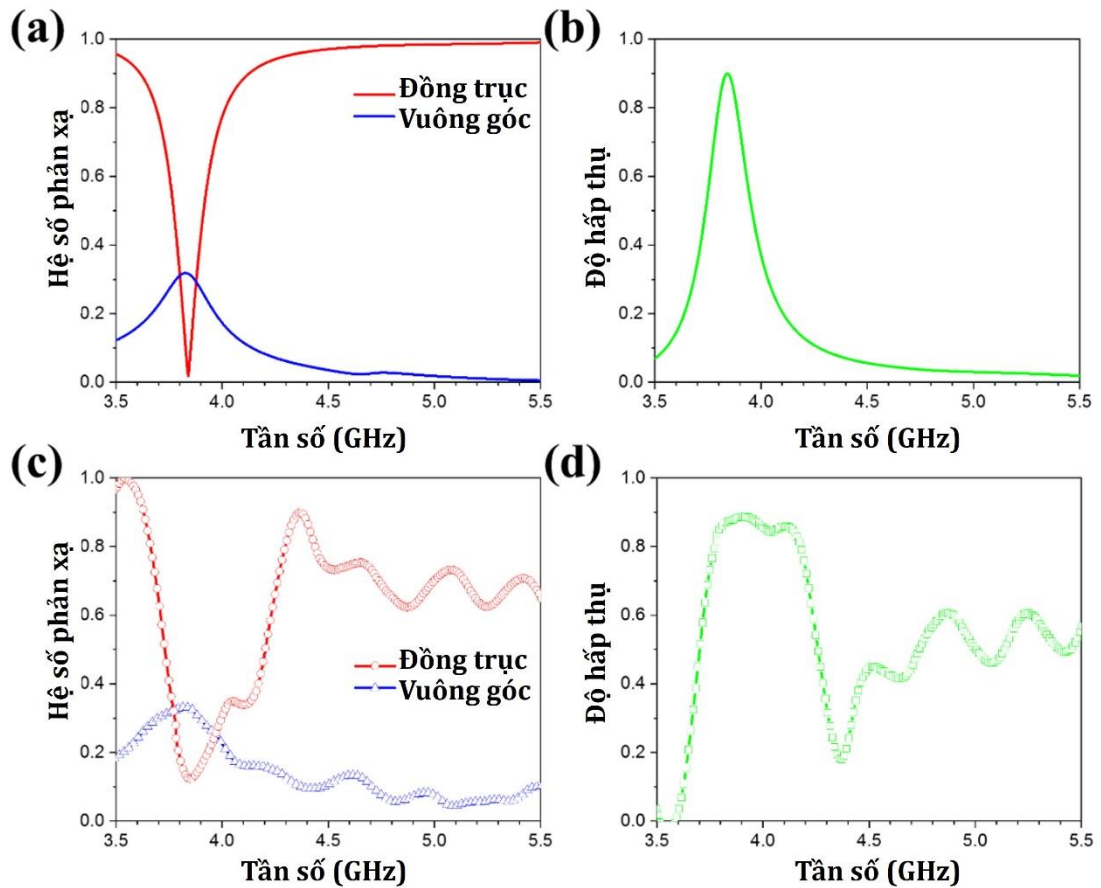


Hình 4.1. (a) Sơ đồ cấu trúc ô đơn vị BMM được đề xuất. (b) Ảnh mặt trên của ô đơn vị với tham số cấu trúc: $L = 24,5$, $R_1 = 10$, $R_2 = 5,8$, $s = 1$, $d = 8,5$, $g = 0,5$, $h = 0,5$, $t = 2$, $t_m = 0,035$ mm. (c) Mẫu BMM được chế tạo có tích hợp với các tụ điện và diode và (d) cấu hình phép đo phổ hấp thụ sử dụng máy phân tích mạng ZNB20.

Bảng 4.1. Các giá trị tham số hiệu dụng của diode [122].

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

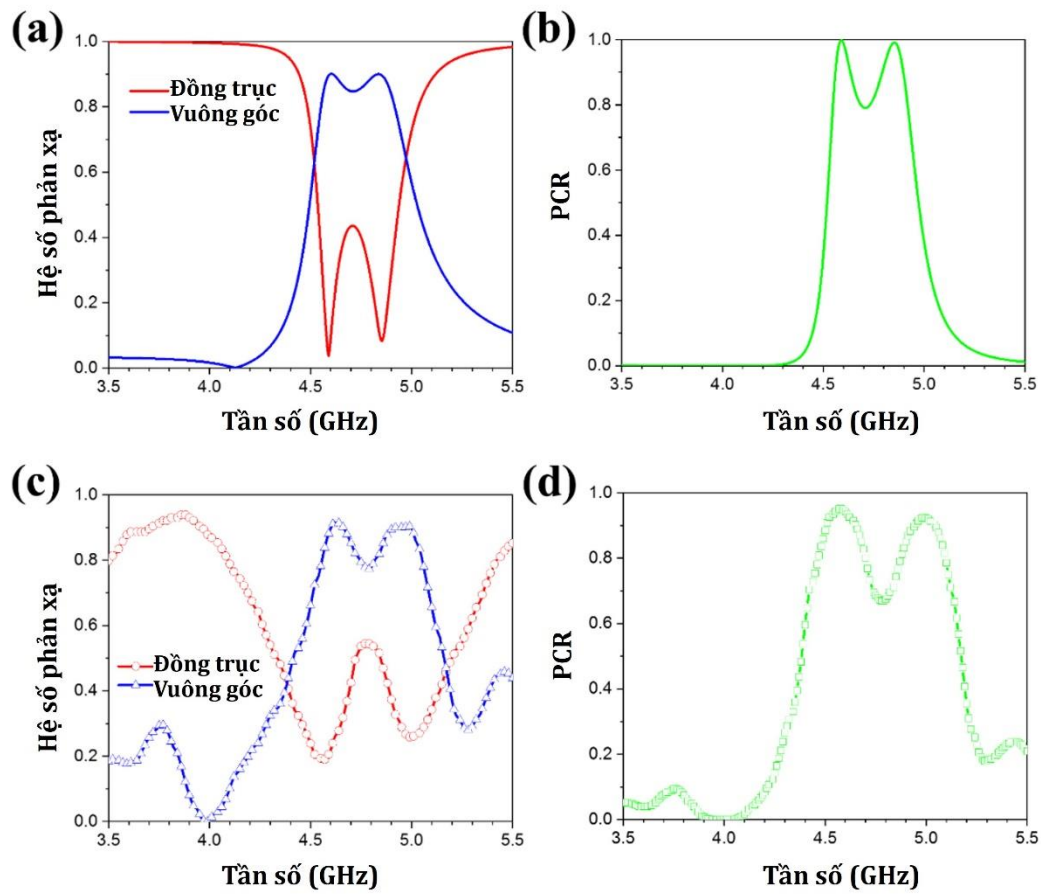
4.1.2. Chuyển đổi giữa chức năng hấp thụ sóng điện từ và chức năng xoay góc phân cực của sóng điện từ bằng điện áp ngoài



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

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 BMM hoạt động ở trạng thái hấp thụ đơn đỉnh (single-peak absorption - SPA). Hệ số phản xạ mô phỏng của cấu trúc MM ở trạng thái này được hiển thị trong Hình 4.2(a). Có thể quan sát thấy 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. Độ hấp thụ tương ứng được minh họa trong Hình 4.2(b). Phổ hấp thụ thể hiện một cực đại ở tần số cộng hưởng với độ hấp thụ gần 90%. Kết quả đo trong Hình 4.2(c) và 4.2(d) hiển thị một đỉnh hấp thụ khoảng 3,85 GHz với độ hấp thụ đạt gần 90% như kết quả mô phỏng. Sự tồn tại của một đỉnh ở lân cận trong phổ đo có thể là do sai số về giá trị của tụ điện thực.

Nhìn chung, cả kết quả mô phỏng và thực nghiệm chỉ ra rằng trong trường hợp không có điện áp phân cực, BMM hoạt động giống như một MA.



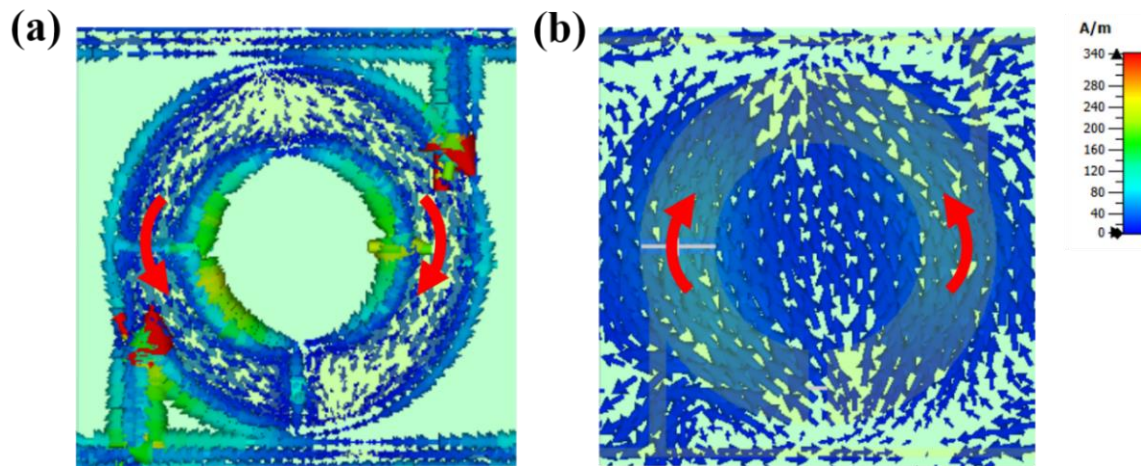
Hình 4.3. (a) Các hệ số phản xạ đồng trục và phản xạ vuông góc được mô phỏng và (b) hệ số chuyển đổi góc phân cực PCR tương ứng của BMM ở điện áp phân cực -19 V. Kết quả đo đạc tại -19 V của (c) các hệ số phản xạ và (d) hệ số PCR tương ứng.

Tiếp theo, điện áp phân cực được đặt vào với giá trị khoảng -19V. Ở điện áp này, điện dung của diode biến thiên đạt đến giá trị tối thiểu và cấu trúc BMM thể hiện trạng thái bộ chuyển đổi phân cực dải kép (dual polarization-conversion - DPC). Hệ số chuyển đổi phân cực (polarization conversion ratio - PCR) được tính toán theo công thức:

$$PCR = \frac{|R_{xy}|^2}{|R_{yy}|^2 + |R_{xy}|^2}, \quad (4.1)$$

Kết quả mô phỏng của các hệ số phản xạ được hiển thị trong Hình 4.3(a). 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

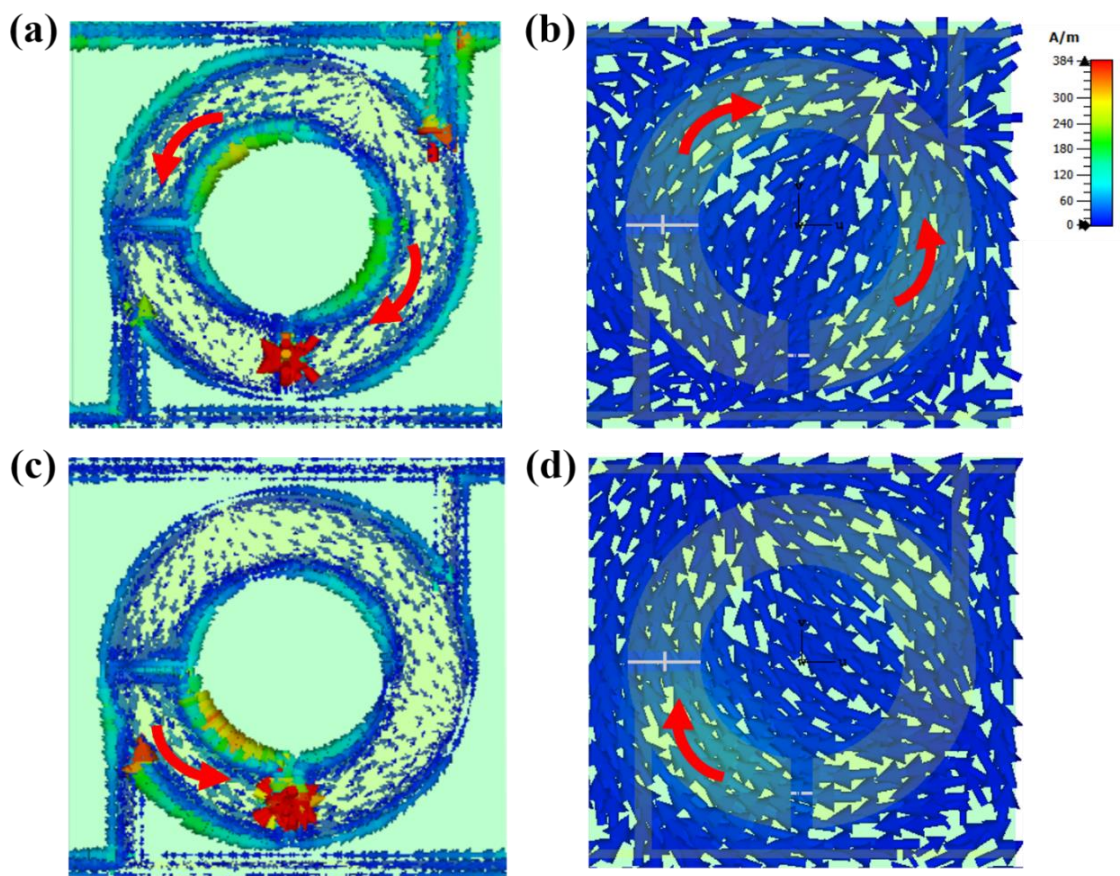
0,91. Đối với cả hai cực đại, các phản xạ phân cực đồng trục có giá trị lần lượt là 0,04 và 0,02 tại 4,59 và 4,86 GHz. Các giá trị cực nhỏ này của các hệ số phản xạ phân cực đồng trục kết hợp với các giá trị cao của các hệ số phân cực vuông góc cho thấy trạng thái phân cực của sóng phản xạ ở cả hai tần 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. Vì hai đỉnh cộng hưởng gần nhau, một DPC được tạo ra với vùng tần số rộng có giá trị hệ số chuyển đổi phân cực PCR là khá cao. Hình 4.3(b) cho thấy, 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%. Kết quả này cho thấy hiệu suất chuyển đổi góc phân cực của BMM được đề xuất là rất tốt ở chế độ DPC. Các kết quả đo được của các hệ số phản xạ phân cực đồng trục và phân cực vuông góc cũng như PCR tương ứng được thể hiện trong Hình 4.3(c) và 4.3(d). Các tần số cộng hưởng đo được là khoảng 4,6 và 5 GHz với hệ số PCR thực nghiệm tương ứng lần lượt là 96% và 92%. Những kết quả này cho thấy sự phù hợp tốt giữa mô phỏng và thử nghiệm. Những sai lệch nhỏ có thể được dự đoán bởi thực tế là không thể mô phỏng chính xác hình dạng thực của tụ điện và diode trên bề mặt của BMM, điều này có thể dẫn đến sự khác biệt nhỏ giữa các tham số phản xạ mô phỏng và đo đạc.



Hình 4.4. Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt tại lớp đồng (a) trên cùng và (b) dưới cùng ở tần số cộng hưởng 3,84 GHz ở 0 V.

Để làm rõ cơ chế chuyển đổi chế độ và vai trò của các thành phần ngoại vi, luận án cũng đã nghiên cứu sự phân bố dòng điện bề mặt trong các chế độ chuyển đổi hấp thụ và phân cực ở tần số cộng hưởng. Hình 4.4 trình bày sự phân bố dòng điện bề mặt ở tần số cộng hưởng 3,84 GHz ở chế độ SPA. Dòng điện này tập hợp đối xứng

ở hai bên trái và phải của vòng. Dòng điện ở lớp trên cùng và dưới cùng, trong trường hợp này, là đối song. Từ đó, có thể kết luận rằng, cộng hưởng trong chế độ SPA là cộng hưởng từ [88]. Tuy nhiên, dòng điện chạy qua bên trái và bên phải của vòng là tương tự nhau ở trạng thái này, do đó cấu trúc trở nên đối xứng hơn. Ở chế độ SPA, hai cấu trúc kim loại hầu như được kết nối với nhau. Do đó, cấu trúc của BMM lúc này đối xứng theo trục y. Từ trường gây ra bởi cộng hưởng từ vuông góc với điện trường tới. Do đó, không có tương tác nào giữa chúng và do đó, không có chuyển đổi phân cực trong trường hợp này. Kết quả là điện trường tới và điện trường phản xạ có cùng hướng dọc theo trục y.

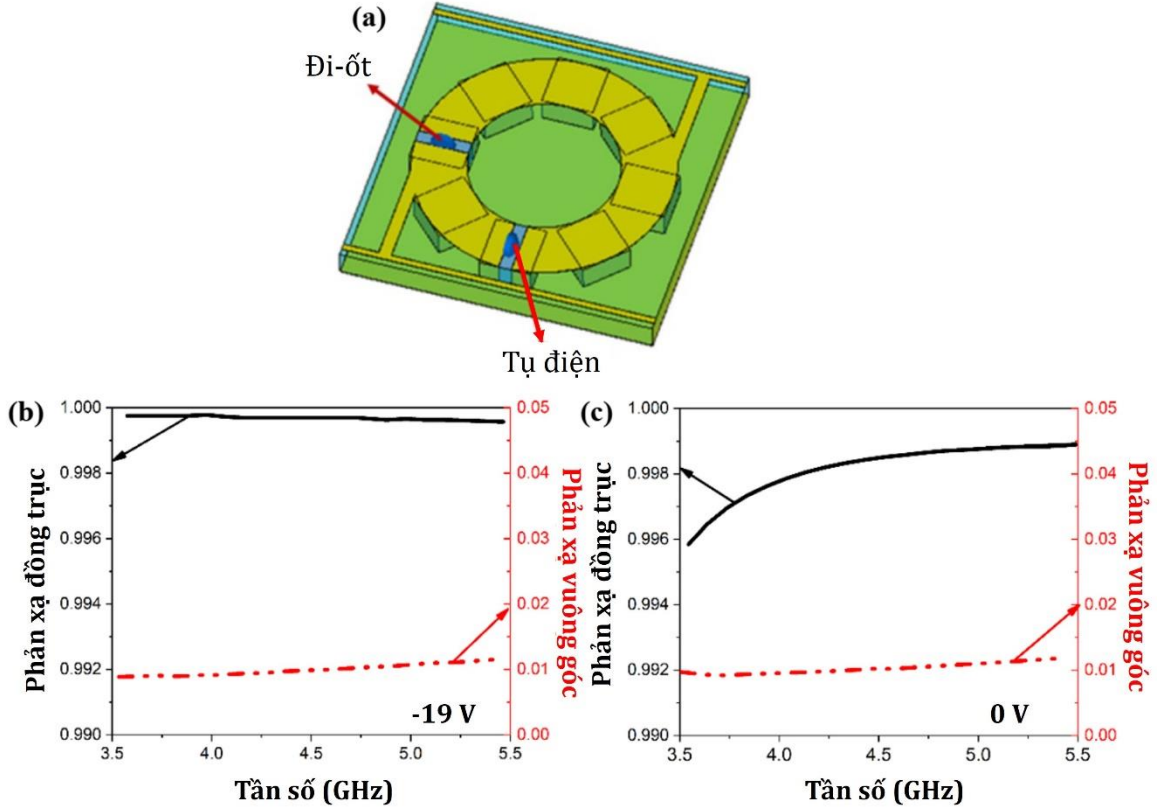


Hình 4.5. Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt tại các lớp đồng (trái) trên cùng và (phải) dưới cùng ở tần số cộng hưởng là (a)-(b) 4,59 GHz và (c)-(d) 4,86 GHz ở -19 V.

Khi BMM hoạt động ở chế độ DPC, sự phân bố dòng điện cảm ứng ở tần số cộng hưởng 4,59 và 4,86 GHz trên các lớp đồng trên cùng và dưới cùng được minh họa trong Hình 4.5(a) - 4.5(b) và Hình 4.5(c) - 4.5(d), tương ứng. Ở tần số 4,59 GHz, dòng điện chủ yếu tích tụ ở phía trên bên trái và phía dưới bên phải của vòng. Mặt

khác, ở tần số 4,86 GHz, dòng điện bề mặt cảm ứng được tăng cường ở phía dưới bên trái của vòng. Những phân bố dòng điện này chỉ ra vai trò của từng phần của vòng trong việc hình thành các tần số cộng hưởng. Ở cả hai tần số cộng hưởng, dòng điện luôn tập trung trong tụ điện. Hiện tượng này cho thấy rằng ở chế độ DPC, tụ điện cũng cần thiết để tạo ra tính dị hướng của cấu trúc khi điện dung của diode biến thiên đạt đến giá trị tối thiểu. Trong mọi trường hợp, hướng phân bố dòng điện bề mặt cảm ứng trên các lớp đồng trên cùng và dưới cùng đối diện với nhau (được biểu thị bằng mũi tên màu đỏ). Những quan sát này chứng minh rằng các cộng hưởng quan sát được cũng là cộng hưởng từ [88]. Đặc biệt, sự phân bố dòng điện trong Hình 4.5 luôn đối xứng qua các trục theo đường chéo. Cụ thể, dòng điện ở tần số 4,59 GHz chạy dọc theo hướng u , trong khi dòng điện ở tần số 4,86 GHz chạy dọc theo hướng v . Những kết quả này chứng minh thêm mối liên hệ trực tiếp giữa tính đối xứng của cấu trúc và chế độ DPC. Do giá trị của diode biến thiên ở chế độ DPC bằng với điện dung của tụ điện, BMM thể hiện tính đối xứng dọc theo hướng u . Sự đối xứng này là do đáp ứng của cấu trúc đối với các thành phần u và v của điện trường tới.

Ngoài ra, để kiểm tra xem liệu các hiệu ứng nhiễu xạ liên quan đến kích thước ô cơ sở của vật liệu có gây ảnh hưởng lên các tính chất của vật liệu đã nghiên cứu, luận án đã tiến hành mô phỏng cho trường hợp BMM được nối tắt bằng các thanh kim loại đồng nối giữa các lớp đồng trước và sau. Ở đây, tám thanh kim loại đồng được thiết kế dọc theo các hướng x -, y -, u - và v , như trong Hình 4.6(a), để đảm bảo rằng tất cả các cộng hưởng từ gây ra bởi tính dị hướng của cấu trúc cũng được loại bỏ. Hình 4.6(b) và 4.6(c) biểu diễn các phản xạ đồng trục và phản xạ vuông góc mô của BMM được nối tắt ở điện áp phân cực lần lượt là -19 và 0 V. Có thể thấy rằng, hiện tượng cộng hưởng không xảy ra trong vùng tần số được khảo sát cho cả -19 V và 0 V, do tất cả các cộng hưởng từ của BMM đã bị triệt tiêu khi cấu trúc được nối tắt. Mặt khác, điều đó cũng có nghĩa là cộng hưởng liên quan đến kích thước ô cơ sở không được cảm ứng và hiệu ứng nhiễu xạ không ảnh hưởng đến BMM trong vùng tần số được khảo sát. Hiện tượng này là do kích thước nhỏ của ô cơ sở so với bước sóng hoạt động. Đối với cấu trúc đề xuất, tỷ lệ của ô cơ sở của BMM so với bước sóng hoạt động chỉ xấp xỉ 0,3.



Hình 4.6. (a) Ô đơn vị của BMM được nối tắt với các thanh kim loại đồng nối giữa hai lớp đồng trước và sau. Kết quả mô phỏng phổ phản xạ đồng trục và vuông góc của BMM được nối tắt ở điện áp phân cực (b) -19 V và (c) 0 V.

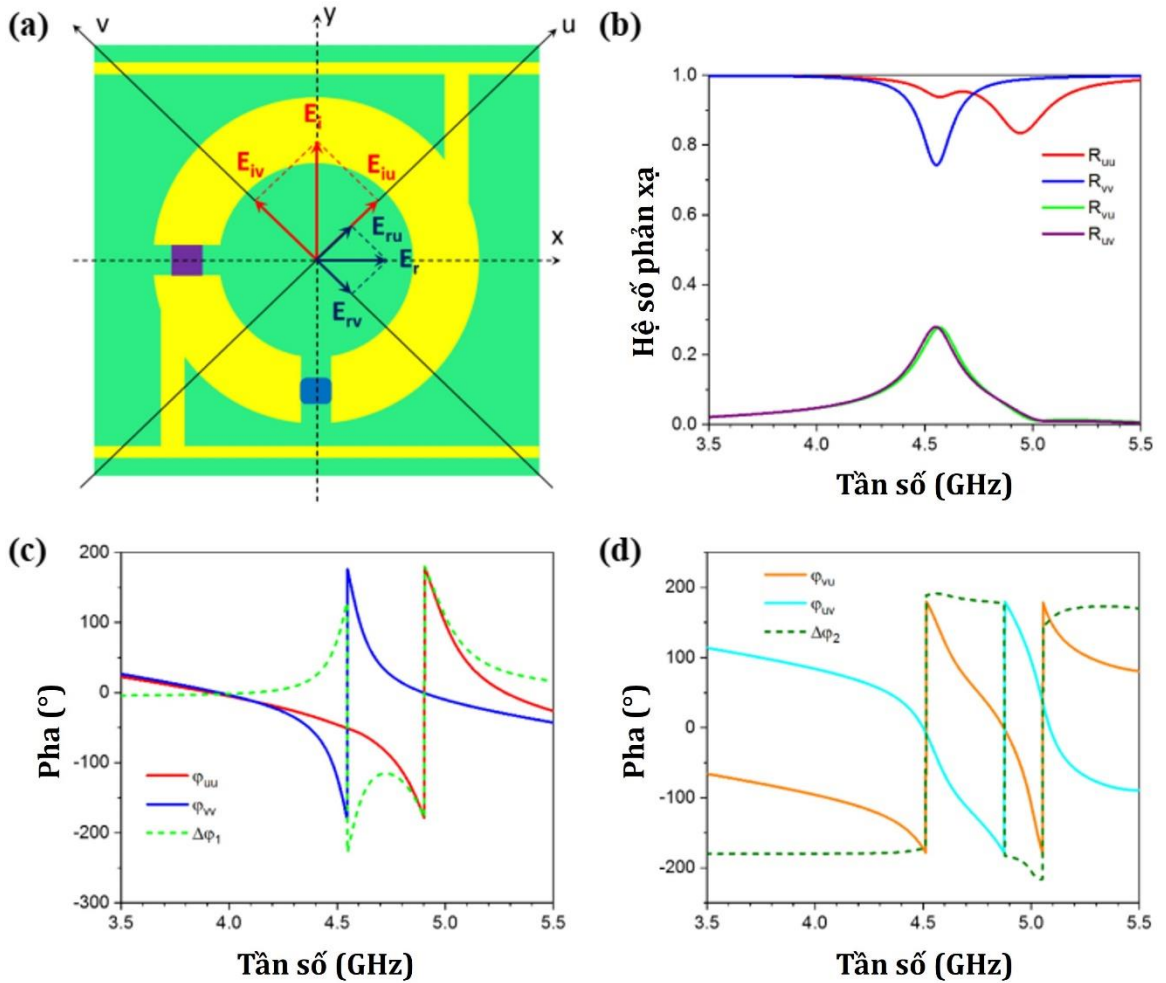
Để hiểu rõ hơn về nguyên lý cơ sở cho sự chuyển đổi phân cực của cấu trúc BMM ở chế độ DPC, nghiên cứu đã phân tách sóng điện từ tới với điện trường phân cực theo hướng y thành hai thành phần u và v trực giao với nhau, như trong Hình 4.7(a). Sóng điện từ tới và sóng phản xạ có thể được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{E}_{iu} + \mathbf{E}_{iv} = \hat{\mathbf{u}}E_{iu} + \hat{\mathbf{v}}E_{iv}, \quad (4.2)$$

ở đó $E_{iu} = E_{iv} = \sqrt{2}E_i$. Do ô cơ sở của vật liệu không đẳng hướng trong chế độ PC, sóng điện từ thể hiện sự thay đổi về cường độ và pha sau khi được phản xạ từ cấu trúc MM

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_r &= \mathbf{E}_{ru} + \mathbf{E}_{rv} \\ &= \hat{\mathbf{u}}(R_{uu}E_{iu}e^{i\varphi_{uu}} + R_{uv}E_{iv}e^{i\varphi_{uv}}) + \hat{\mathbf{v}}(R_{vv}E_{iv}e^{i\varphi_{vv}} + R_{vu}E_{iu}e^{i\varphi_{vu}}), \end{aligned} \quad (4.3)$$

với $\hat{\mathbf{u}}$ và $\hat{\mathbf{v}}$ là các vectơ đơn vị, (R_{uu}, R_{vv}) và (R_{uv}, R_{vu}) là độ lớn của các hệ số phản xạ đồng trục và phản xạ vuông góc theo trục u và v với các pha tương ứng lần lượt là φ_{uu} , φ_{vv} , φ_{uv} và φ_{vu} .



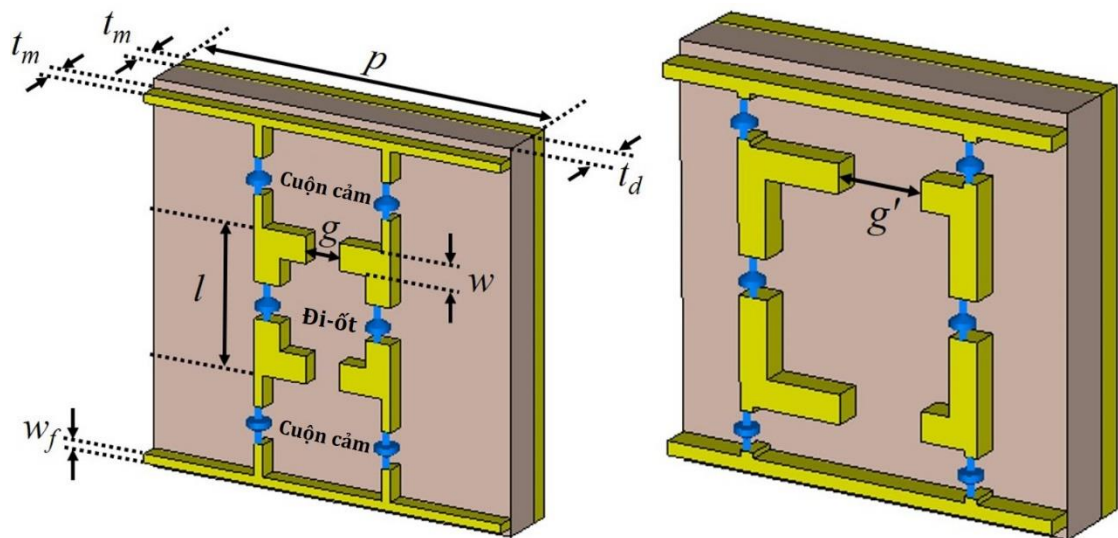
Hình 4.7. (a) Sơ đồ trực quan của điện trường phân tách theo hướng u và v . (b) Cường độ của các hệ số phản xạ theo hướng u và v . Các pha của (c) phổ phản xạ đồng trục và phổ phản xạ vuông góc và (d) độ lệch giữa hai pha theo hướng u và v .

Các mô phỏng khác cũng được thực hiện để nghiên cứu cường độ và pha của các hệ số phản xạ theo hướng u và v , như thể hiện trong Hình 4.7(b)-4.7(d). Có thể thấy từ Hình 4.7(b) rằng $|R_{uu}| \approx |R_{vv}|$ và $|R_{uv}| = |R_{vu}|$ ở cả hai tần số cộng hưởng. Ở tần số cộng hưởng 4,59 và 4,86 GHz, độ lệch pha giữa R_{uu} và R_{vv} , $\Delta\varphi_1 = \varphi_{uu} - \varphi_{vv}$, là khoảng -180° , trong khi độ lệch pha giữa R_{uv} và R_{vu} , $\Delta\varphi_2 = \varphi_{uv} - \varphi_{vu}$, là 180° [Hình 4.7(c) và 4.7(d)]. Theo phương trình (4.3), sự kết hợp của số hạng thứ nhất và thứ ba cũng như sự kết hợp của số hạng thứ hai và thứ tư tạo ra một trường phản xạ E_r phân cực theo hướng x . Điều này có nghĩa là, hiệu ứng chuyển đổi phân cực xảy ra ở các tần số cộng hưởng này. Cũng cần lưu ý rằng, độ lệch nhỏ giữa R_{uu} và R_{vv} dẫn đến hệ số phản xạ đồng trục không biến mất hoàn toàn ở các tần số cộng hưởng, giống như được quan sát thấy trong Hình 4.3(a).

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

Hình 4.8 minh họa thiết kế ô cơ sở MA có khả năng hấp thụ cả 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: tấm 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 diode.



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

Đối với MA băng tần đơn, ô cơ sở sử dụng cấu trúc cộng hưởng vòng bốn rãnh đối xứng (s-SRR) với hai diode 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 diode biến dung. Để ngăn các tín hiệu vi sóng gây nhiễu vào phân cực DC, cuộn cảm được đặt giữa đường cấp nguồn và s-SRR. Các cuộn cảm có trở kháng cao tại vùng tần số nghiên cứu nhằm loại bỏ hiệu quả tín hiệu vi sóng trong khi cho DC đi qua với trở kháng tối thiểu. 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). Các tham số cấu trúc cụ thể của MA băng tần đơn và kép đề xuất lần lượt được cung cấp trong Bảng 4.2 và Bảng 4.3.

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

Mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm CST Microwave Studio [17] để phân tích các MA đề xuất trong dải tần C, cụ thể là từ 4 đến 8 GHz. 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, diode biến dung SMV2019-079LF được lựa chọn sử dụng do có thể đơn giản hóa thành mạch RLC với các tham số mạch tương đương tại các điện áp phân cực khác nhau được liệt kê trong Bảng 4.4 [122].

Trong quá trình mô phỏng, một sóng phẳng được kích thích truyền vuông góc tới mặt phẳng MA. Điện trường phân cực dọc và song song với các rãnh tích hợp diode, trong khi từ trường được định hướng ngang theo các rãnh không có diode.

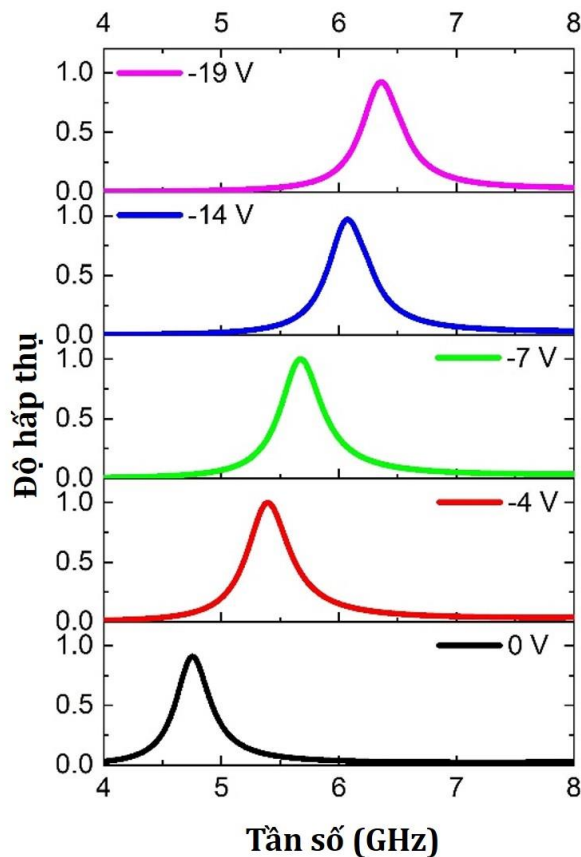
Các tính chất hấp thụ được tính toán bởi công thức $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$, trong đó $R(\omega) = |S_{11}(\omega)|^2$ và $T(\omega) = |S_{21}(\omega)|^2$ tương ứng là các hệ số phản xạ và truyền qua. Lưu ý rằng, thiết kế của MA có một tấm đồng liên tục phía sau có chức năng triệt tiêu hoàn toàn sóng truyền qua. Do đó, độ hấp thụ được đơn giản hóa thành $A(\omega) = 1 - R(\omega)$.

Bảng 4.4. Các thông số mạch tương đương cho diode biến dung [122].

Điện áp (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
-14	0,31	2,86	0,7
-19	0,24	2,38	0,7

4.2.2. Điều khiển tần số hấp thụ của vật liệu biến hóa bằng điện áp ngoài

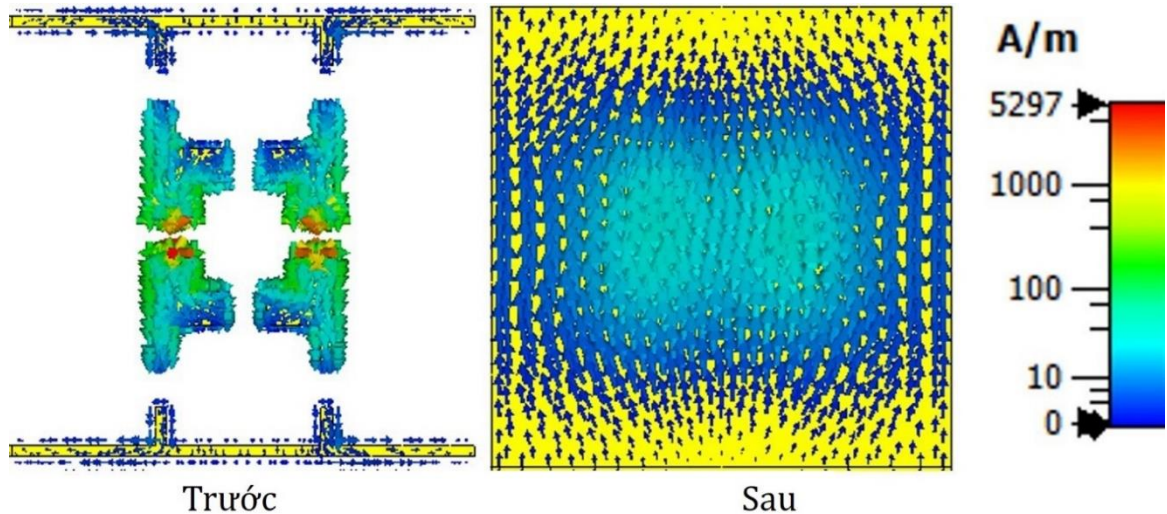
Hình 4.9 minh họa phổ hấp thụ của MA đơn băng tần được đề xuất. Ban đầu, trong trường hợp không có điện áp được đặt vào diode biến dung, MA thu được một đỉnh hấp thụ nổi bật trong dải C ở tần số 4,7 GHz với độ hấp thụ đạt 91%. Khi áp điện áp phân cực -4V, xảy ra sự thay đổi đáng chú ý khi đỉnh hấp thụ 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. Cụ thể, tại các điện áp phân cực -7V, -14V và -19V, 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.



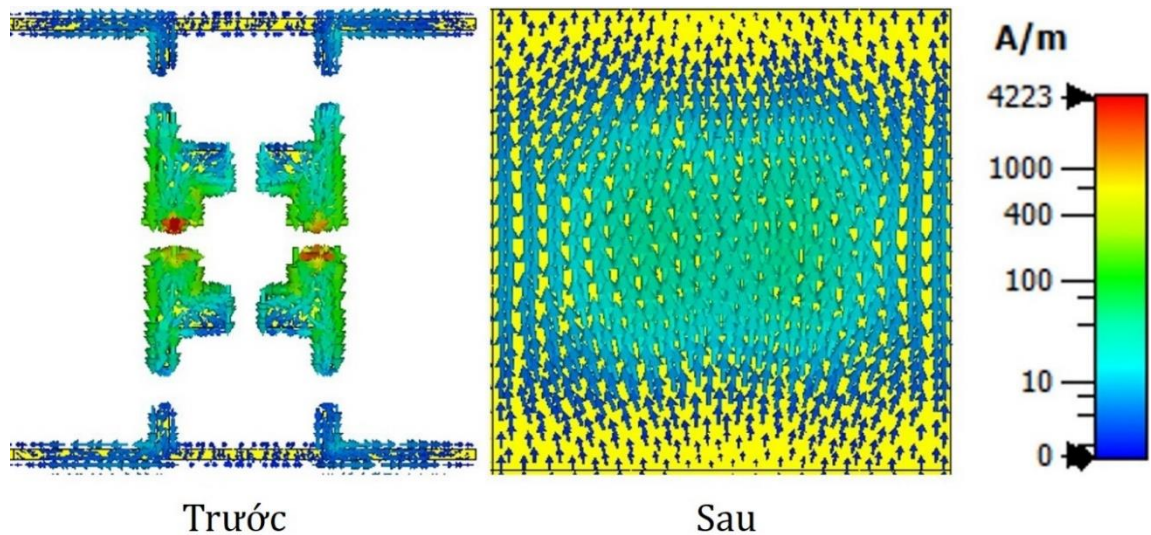
Hình 4.9. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của phổ hấp thụ MA đơn băng tần vào điện áp ngoài.

Để hiểu rõ hơn về đặc tính hấp thụ trong quá trình thay đổi điện áp ngoài, các mô phỏng đã được tiến hành để trực quan hóa dòng điện cảm ứng trên MA trong hai

điều kiện riêng biệt: 0V và -19V, như được mô tả trong Hình 4.10 và 4.11 tương ứng. Trong cả hai trường hợp, dòng điện cảm ứng ở lớp đồng trước và sau đều đối song, cho thấy tại tần số hấp thụ xảy ra kích thích cộng hưởng từ. Ngoài ra, các dòng điện chủ yếu tập trung trong các vùng tương ứng với vị trí của các s-SRR. Quan sát này ngụ ý rằng cộng hưởng từ chủ yếu được tạo ra bởi cấu trúc s-SRR, trong khi ảnh hưởng của đường cáp điện đến cộng hưởng là không đáng kể.

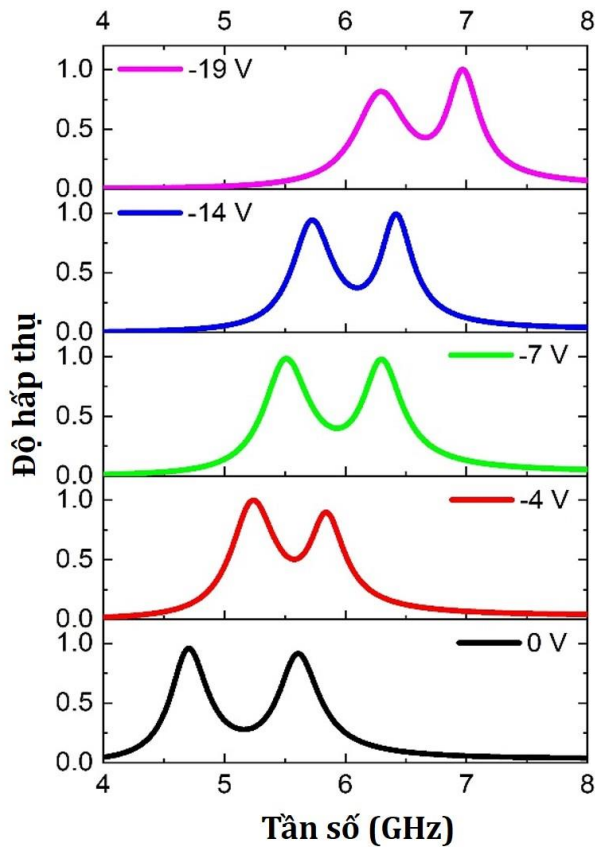


Hình 4.10. Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt trên MA ở tần số hấp thụ 4,7 GHz tương ứng với điện áp đặt vào là 0V.



Hình 4.11. Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt trên MA ở tần số hấp thụ 6,4 GHz tương ứng với điện áp đặt vào là 19 V.

Do các đỉnh hấp thụ quan sát được ở cả hai điện áp là cộng hưởng từ do s-SRR gây ra, nên sự thay đổi tần số hấp thụ được giải thích bởi sự điều biến của diode biến dung thông qua điện áp ngoài. Cụ thể, điện dung của diode giảm khi điện áp ngoài tăng. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng cộng hưởng từ của MA có thể được biểu diễn bằng mô hình cộng hưởng LC tương đương, với tần số cộng hưởng tỷ lệ nghịch với điện dung hiệu dụng của cấu trúc [88,123]. Trong cấu trúc MA đề xuất, điện dung của diode cũng góp phần tạo nên điện dung hiệu dụng của MA. Do đó, việc giảm điện dung của diode dẫn đến giảm điện dung hiệu dụng, làm dịch chuyển vị trí của đỉnh cộng hưởng từ. Kết quả là đỉnh hấp thụ dịch chuyển lên phía tần số cao hơn khi tăng điện áp ngoài đặt vào.



Hình 4.12. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của phổ hấp thụ MA dài kép vào điện áp ngoài.

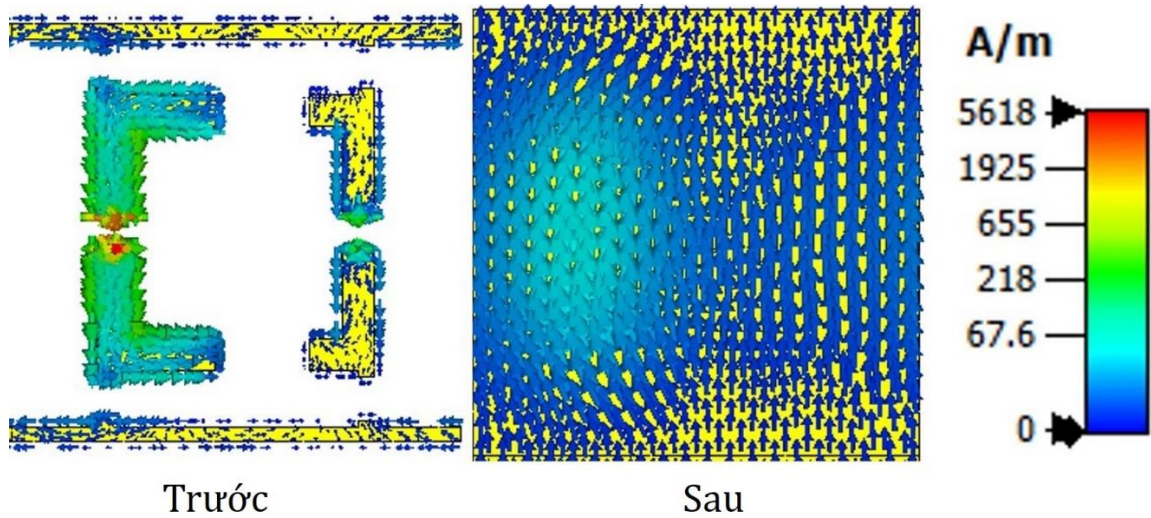
Để điều khiển hấp thụ bằng tần kép, cấu trúc MA được thay đổi như mô tả trong Hình 4.8(b). Ảnh hưởng của điện áp ngoài lên phổ hấp thụ của MA bằng tần kép được nghiên cứu và trình bày trong Hình 4.12. Dựa vào tính bất đối xứng của cấu trúc cộng hưởng, a-SRR thu được hai đỉnh hấp thụ riêng biệt khi không 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. 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 -19V, độ hấp thụ của đỉnh đầu tiên giảm nhẹ xuống còn 81,6%, trong khi độ hấp thụ của đỉnh thứ hai vẫn cao. Cường độ và tần số hấp thụ cụ thể của MA dải kép được tóm tắt trong Bảng 4.5.

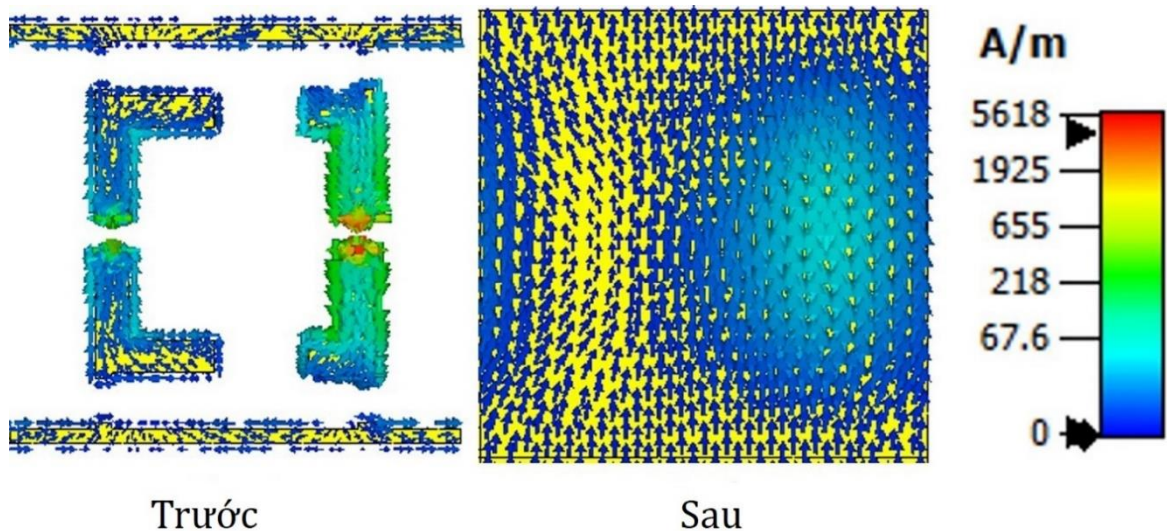
Bảng 4.5. Tính chất hấp thụ của MA dải kép ở các điện áp ngoài khác nhau.

Điện áp (V)	Đỉnh thứ 1		Đỉnh thứ 2	
	Tần số (GHz)	Độ hấp thụ	Tần số (GHz)	Độ hấp thụ
0	4,7	95,8%	5,6	91,5%
-4	5,2	99,8%	5,8	90%
-7	5,5	98,3%	6,3	97,7%
-14	5,7	94%	6,4	98,8%
-19	6,3	81,6%	6,9	99,9%

Để nghiên cứu sâu hơn về tính chất cộng hưởng của MA dải kép, các dòng điện cảm ứng được mô phỏng và trình bày như trong Hình 4.13-4.16. Hình 4.13 biểu diễn phân bố dòng điện bề mặt trên các lớp đồng ở tần số hấp thụ thứ nhất, trong khi Hình 4.14 mô tả các dòng điện tương ứng ở tần số hấp thụ thứ hai, cả hai trường hợp đều không có điện áp đặt vào. 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. 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 phần bên phải a-SRR.

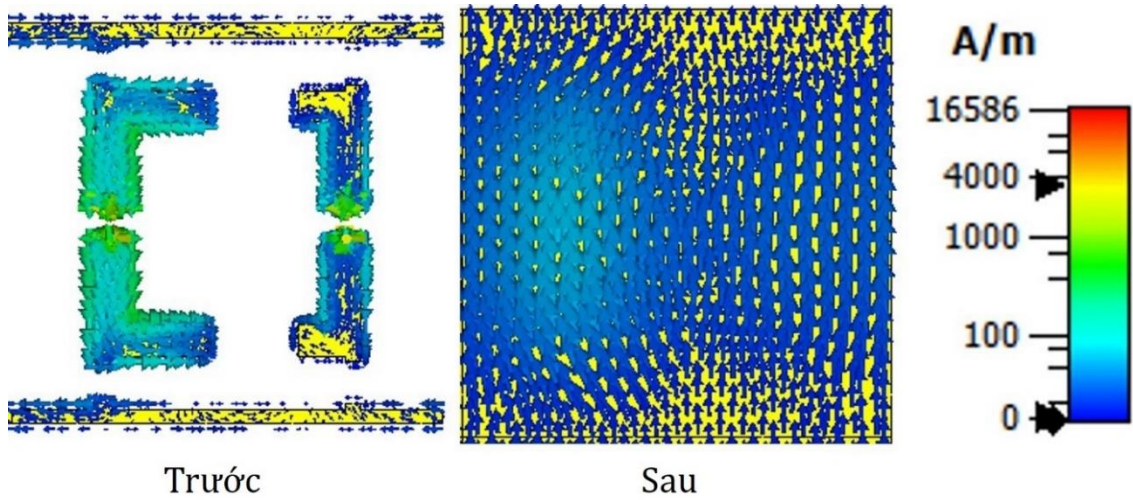


Hình 4.13. Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt trên MA ở tần số hấp thụ đầu tiên là 4,7 GHz tương ứng với điện áp đặt vào là 0V.

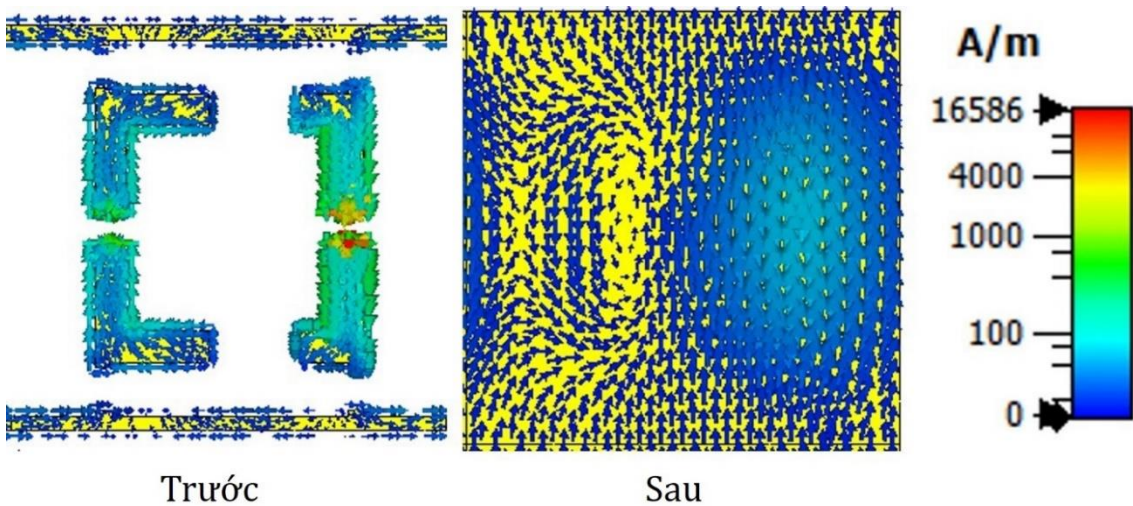


Hình 4.14. Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt trên MA ở tần số hấp thụ thứ hai là 5,6 GHz tương ứng với điện áp đặt vào là 0V.

Hiện tượng tương tự cũng được quan sát thấy trên Hình 4.15 và 4.16, khi điện áp ngoài là -19V, trong đó phần bên trái và bên phải của a-SRR tương ứng tạo ra đỉnh cộng hưởng thứ nhất và thứ hai. Do đó, có thể suy luận rằng dựa vào tính bất đối xứng của cấu trúc, mỗi phần của cấu trúc cộng hưởng có những tương tác khác nhau đối với sóng tới tại các tần số riêng biệt, do đó làm phát sinh hiện tượng hấp thụ dải kép. Những kết quả này làm sáng tỏ bản chất cộng hưởng của cấu trúc MA băng tần kép và góp phần đưa ra hiểu biết toàn diện về các cơ chế vật lý cơ bản của nó.



Hình 4.15. Mô phỏng 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 -19V.



Hình 4.16. Mô phỏng 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 -19V.

4.3. Kết luận chương 4

Trong chương này, luận án đã đề xuất một BMM, có thể chuyển đổi giữa các chế độ hoạt động khác nhau là hấp thụ và chuyển đổi phân cực. Cấu trúc được đề xuất có thể hoạt động hiệu quả ở hai trạng thái: trạng thái thứ nhất với khả năng hấp thụ sóng điện từ và trạng thái thứ hai với khả năng chuyển đổi phân cực của sóng điện từ. Vai trò của diode biến thiên là thiết yếu để đạt được chức năng kép, SPA và DPC, trong chỉ duy nhất một cấu trúc MM. Bằng cách tắt/bật điện áp phân cực, tính dị hướng của BMM có thể được vô hiệu/kích hoạt dựa trên các đặc trưng của diode biến

thiên. Các cơ chế hoạt động của BMM ở hai chế độ SPA và DPC được làm rõ thông qua nghiên cứu về phân bố mật độ dòng điện bề mặt và tổn thất điện năng.

Trong nghiên cứu này, luận án đã trình bày các thiết kế và tiến hành mô phỏng các MA băng tần đơn và kép có khả năng điều khiển bằng điện hoạt động trong vùng C. Bằng cách sử dụng diode biến dung, tổng điện dung hiệu dụng trong mô hình LC tương đương của MA có thể được điều chỉnh một cách chủ động. Từ đó cho phép điều chỉnh tần số hấp thụ thông qua điện áp ngoài. Bản chất cộng hưởng của hiện tượng hấp thụ cũng đã được nghiên cứu kỹ lưỡng. Ngoài ra, kết quả nghiên cứu đã chứng minh được rằng, việc sử dụng tính chất bất đối xứng trong cấu trúc cộng hưởng có khả năng thay đổi hiệu quả sự tương tác giữa MA và sóng tới, dẫn đến số lượng cực đại cộng hưởng hấp thụ tăng lên.

Bảng 4.6 trình bày kết quả nghiên cứu về điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ bằng điện áp ngoài được thảo luận trong Chương 4, và so sánh với các nghiên cứu khác. Những nghiên cứu này đã chỉ ra rằng phương pháp điều khiển có thể được thực hiện bằng cách tích hợp các vật liệu và linh kiện ngoại vi như graphene, PIN diode hoặc diode biến dung. Các vật liệu biến hóa được nghiên cứu trong Chương này có cấu trúc đơn giản và sử dụng phương pháp điều khiển bằng điện áp ngoài dễ thực hiện, nhưng vẫn đạt hiệu quả cao trong việc điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ. Điều này cho phép điều chỉnh tần số hấp thụ hoặc thay đổi chức năng của vật liệu biến hóa từ hấp thụ sang xoay góc phân cực của sóng điện từ.

Bảng 4.6. So sánh giữa các nghiên cứu điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ bằng điện áp ngoài trong luận án với các nghiên cứu khác.

Tham khảo	Phương pháp điều khiển	Chức năng điều khiển	Vùng tần số hoạt động	Đặc điểm cấu trúc
[124]	Điều khiển điện áp ngoài	Dịch chuyển tần số hấp thụ đơn đỉnh	Vùng GHz	Tích hợp diode biến dung
[125]	Điều khiển điện áp ngoài	Điều khiển cường độ hấp thụ	Vùng GHz	Graphene
[126]	Điều khiển điện áp ngoài	Điều khiển cường độ hấp thụ	Vùng GHz	Graphene

[127]	Điều khiển điện áp ngoài	Đa chức năng: hấp thụ đơn đỉnh - xoay góc phân cực đơn đỉnh	Vùng GHz	Tích hợp PIN diode
[128]	Điều khiển điện áp ngoài	Chuyển đổi giữa hấp thụ dải rộng - phản xạ dải rộng	Vùng GHz	Tích hợp PIN diode
[129]	Điều khiển điện áp ngoài	Dịch chuyển tần số hấp thụ đơn đỉnh	Vùng GHz	Tích hợp diode biến dung
Nghiên cứu trong luận án (Mục 4.1)	Điều khiển điện áp ngoài	Đa chức năng: hấp thụ dải hẹp - xoay góc phân cực dải kép	Vùng GHz	Tích hợp diode biến dung
Nghiên cứu trong luận án (Mục 4.2)	Điều khiển điện áp ngoài	Dịch chuyển tần số hấp thụ đơn đỉnh/đỉnh kép	Vùng GHz	Tích hợp diode biến dung

Các kết quả thu được trong chương này hữu ích trong việc mở rộng các ứng dụng tiềm năng của MM. Khả năng kiểm soát các đặc tính hấp thụ một cách chủ động thông qua điện áp ngoài làm nổi bật tiềm năng của MA cho các ứng dụng như hấp thụ sóng điện từ, hệ thống thông tin liên lạc và công nghệ radar. Các kết quả này cũng góp phần làm nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo về cấu trúc và tính chất MA để đạt được hiệu quả hoạt động tốt hơn nữa, nhờ đó việc phát triển thế hệ thiết bị đa chức năng tiên tiến trong tương lai dựa trên MM có thể trở thành hiện thực trong tương lai không xa.

KẾT LUẬN CHUNG

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. Luận án đã tập trung nghiên cứu điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa bằng các tác động ngoại vi cơ học và điện áp. Những kết quả nghiên cứu của luận án được công bố trên 03 tạp chí quốc tế thuộc danh mục SCIE, 01 tạp chí quốc gia và 01 kỷ yếu hội thảo khoa học chuyên ngành.

Luận án có đóng góp cho nghiên cứu về Khoa học vật liệu nói chung và Vật liệu biến hóa nói riêng.

1. Luận án đã nghiên cứu tổng quan về vật liệu biến hóa điều khiển bằng các tác động ngoại vi và đã trình bày các phương pháp điều khiển bằng tác động ngoại vi đa dạng khác nhau như cơ, quang, nhiệt, điện, từ. Trên cơ sở đó, luận án đã lựa chọn hai đối tượng nghiên cứu của luận án là các vật liệu biến hóa có khả năng điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ bằng tác động cơ học và điện áp.

2. Luận án đã nghiên cứu các phương pháp nghiên cứu phù hợp với đối tượng và nội dung nghiên cứu của luận án. Các phương pháp nghiên cứu bao gồm cả lý thuyết và thực nghiệm. Từ thiết kế và mô phỏng cấu trúc và tính chất điện từ của vật liệu biến hóa sử dụng phần mềm CST Microwave, kết hợp với các tính toán liên quan đến tần số và trở kháng của vật liệu, vật liệu biến hóa sau đó sẽ được chế tạo bằng phương pháp quang khắc. Cuối cùng, đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu được kiểm chứng bằng thực nghiệm dựa trên phương pháp đo đặc sóng điện từ lan truyền trong không gian sử dụng thiết bị phân tích mạng Vector Network Analyzer.

3. Luận án đã thu được một số kết quả nghiên cứu chính cụ thể như sau:

3.1. 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 với dải tần ứng với độ hấp thụ trên 70% rộng hơn 360%, ở chế độ TE, và rộng hơn 469%, ở chế độ TM so với cấu hình MRC.

3.2. 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.

3.3. 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.

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 không chỉ cung cấp thông tin quý báu cho các ứng dụng hiện tại mà còn đề xuất một hướng phát triển tiềm năng để tạo ra các thiết bị đa chức năng hoạt động tốt hơn trong tương lai, dựa trên khả năng tương tác và kiểm soát của MM.

KIẾN NGHỊ NHỮNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Những nghiên cứu tập trung vào điều khiển biên độ và tần số hấp thụ của vật liệu biến hóa đang mang đến những thông tin quý báu về cách mà các đặc tính hấp thụ có thể linh hoạt thay đổi. Bằng cách khám phá sâu hơn về sự biến đổi này, chúng ta có thể hiểu rõ hơn về cách các vật liệu này tương tác với sóng điện từ và năng lượng, từ đó tạo ra những ứng dụng tiềm năng vượt trội so với những vật liệu truyền thống.

Việc nghiên cứu các tính chất hấp thụ này không chỉ giới hạn ở khả năng điều khiển, mà còn tạo ra sự tương tác mới mẻ giữa vật liệu và ứng dụng. Các khía cạnh như tương quan giữa biên độ và tần số hấp thụ, cách chúng có thể ảnh hưởng đến hiệu suất và ứng dụng của các thiết bị, đang chờ được khám phá sâu hơn. Bằng cách nắm bắt được những sự tương quan này, ta có thể tối ưu hóa thiết kế và điều khiển để đạt được hiệu suất tốt nhất cho các ứng dụng cụ thể.

Ngoài ra, việc tiến xa hơn trong nghiên cứu này có thể đặt nền móng cho những bước phát triển tiếp theo, nơi các vật liệu biến hóa được tích hợp một cách thông minh vào các thiết bị điện tử mới. Các thiết bị thông minh thế hệ mới có thể tận dụng sự đa dạng của tính chất hấp thụ để tạo ra những ứng dụng độc đáo và hiệu quả, từ các cảm biến tiên tiến cho đến việc kiểm soát tự động và tương tác người-máy.

Đối với các hướng nghiên cứu tiếp theo, mở rộng tới các vùng tần số cao hơn, như vùng hồng ngoại và vùng quang học, đang là một bước 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 CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ 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 Khuyển, Nguyễn Thanh Tùng, Bùi Sơn Tùng, Phạm Thanh Sơn, Trịnh Thị Giang, Vũ Đình Lâm, “*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**(91) 63-72 (2023).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bose J. C., 1898, “On the rotation of plane of polarisation of electric wave by a twisted structure”, *Proceedings of the Royal Society of London*, 63(389-400), 146-152.
- [2] Lindman K. F., 1914, “Om en genom ett isotropt system av spiralformiga resonatorer alstrad rotationspolarisation av de elektromagnetiska vågorna”, *Öfversigt af Finska Vetenskaps-Societetens förhandlingar A*, 57(3), 1-32.
- [3] Kock W. E., 1948, “Metallic delay lenses”, *The Bell System Technical Journal*, 27(1), 58-82.
- [4] Veselago V. G., 1968, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ”, *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), 509.
- [5] Pendry J. B., Holden A. J., Stewart W. J., and Youngs I., 1996, “Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures”, *Physical Review Letters*, 76(25), 4773.
- [6] Pendry J. B., Holden A. J., Robbins D. J., and Stewart W. J., 1999, “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2075-2084.
- [7] Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., and Schultz S., 2000, “Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity”, *Physical Review Letters*, 84(18), 4184.
- [8] Shelby R. A., Smith D. R., and Schultz S., 2001, “Experimental verification of a negative index of refraction”, *Science*, 292(5514), 77-79.
- [9] Rong C., Yan L., Li L., Li Y., and Liu M., 2023, “A review of metamaterials in wireless power transfer”, *Materials*, 16(17), 6008.
- [10] Fu B., Wan G.-B., Ma X., Chen Y.-X., Jiao X.-H., 2023, “A 2.5-D miniaturized metamaterial absorber with minimal frequency deviation at large incident angles for both TE and TM modes at low frequency”, *Optics Communications*, 537, 129471.
- [11] Shan D. Wang H., Cao K. and Zhang J., 2022, “Wireless power transfer system with enhanced efficiency by using frequency reconfigurable metamaterial”, *Scientific Reports*, 12, 331.
- [12] Yao X., Huang Y., Li G., He Q., Chen H., Weng X., Liang D., Xie J., Deng L., 2022, “Design of an ultra-broadband microwave metamaterial absorber based

- on multilayer structures”, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 32(8), e23222.
- [13] Hannan S., Islam M. T., Soliman M. S., Faruque M. R. I., Misran N. and Islam Md. S., 2022, “A co-polarization-insensitive metamaterial absorber for 5G n78 mobile devices at 3.5 GHz to reduce the specific absorption rate”, *Scientific Reports*, 12, 11193.
- [14] Devarapalli A. B. and Moyra T., 2023, “Design of a metamaterial loaded W-shaped patch antenna with FSS for improved bandwidth and gain”, *Silicon*, 15, 2011–2024.
- [15] Jain P., Chhabra H., Chauhan U., Prakash K., Gupta A., Soliman M. S., Islam Md. S. and Islam M. T., 2023, “Machine learning assisted hepta band THz metamaterial absorber for biomedical applications”, *Scientific Reports*, 13, 1792.
- [16] Vafapour Z., 2022, “Cost-effective bull’s eye aperture-style multi-band metamaterial absorber at sub-THz band: design, numerical analysis, and physical interpretation”, *Sensors*, 22(8), 2892.
- [17] Peng Z., Zheng Z., Yu Z., Lan H., Zhang M. Wang S., Li L., Liang H., and Su H., 2023, “Broadband absorption and polarization conversion switchable terahertz metamaterial device based on vanadium dioxide”, *Optics & Laser Technology*, 157, 108723.
- [18] Kang J., Qu Z., Duan J. Jing H., Hao J., Song C. Wang J., and Zhang B., 2023, “Multispectral flexible ultrawideband metamaterial absorbers for radar stealth and visible light transparency”, *Optical Materials*, 135, 113351.
- [19] Bilal R. M. H., Saeed M. A., Naveed M. A., Zubair M., Mehmood M. Q. and Massoud Y., 2022, “Nickel-based high-bandwidth nanostructured metamaterial absorber for visible and infrared spectrum”, *Nanomaterials*, 12(19), 3356.
- [20] Nandakumar S., Youssef Trabelsi, Vasudevan B., and Gunasekaran S., 2023, “MXene fractal-based dual-band metamaterial absorber in the visible and near-infrared regime”, *Optical and Quantum Electronics* 55, 992.
- [21] Landy N. I., Sajuyigbe S. Mock J. J., Smith D. R., and Padilla W. J., 2008, “Perfect metamaterial absorber”, *Physical Review Letters*, 100, 20, 207402.
- [22] Wu J., Sun Y., Wu B., Sun C. Wu X., 2022, “Perfect metamaterial absorber for solar energy utilization”, *International Journal of Thermal Sciences*, 179, 107638.

- [23] Patel S. K., Surve J., Katkar V., Parmar J., 2022, "Optimization of metamaterial-based solar energy absorber for enhancing solar thermal energy conversion using artificial intelligence", *Advanced Theory and Simulations*, 5(8), 2200139.
- [24] Talati S., Ghazali S. M. and SoltaniNia V., 2023, "Design and construct full invisible band metamaterial-based coating with layer-by-layer structure in the microwave range from 8 to 10 GHz", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 56(17), 175401.
- [25] Li S., Liu L., Jiang Y., Tang C., Gu C. and Li Z., 2022, "Ultrathin optically transparent metamaterial absorber for broadband microwave invisibility of solar panels", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(4), 045101.
- [26] Appasani B., Srinivasulu A., and Ravariu C., 2023, "A high Q terahertz metamaterial absorber using concentric elliptical ring resonators for harmful gas sensing applications", *Defence Technology*, 22, 69-73.
- [27] Lochbaum A., Dorodnyy A., Koch U., Koepfli S. M., Volk S., Fedoryshyn Y., Wood V., and Leuthold J., 2020, "Compact Mid-Infrared Gas Sensing Enabled by an All-Metamaterial Design", *Nano Letters*, 20(6), 4169–4176.
- [28] Afsar Md. S. U., Faruque M. R. I., Abdullah S. and Al-Mugren K. S., 2023, "Compact and Polarization Insensitive Satellite Band Perfect Metamaterial Absorber for Effective Electromagnetic Communication System", *Materials*, 16(13), 4776.
- [29] Hannan S., Islam M. T., Soliman M. S., Faruque M. R. I., Misran N., and Islam Md. S., 2022, "A co-polarization-insensitive metamaterial absorber for 5G n78 mobile devices at 3.5 GHz to reduce the specific absorption rate", *Scientific Reports*, 12, 11193.
- [30] Hannan S., Islam M. T., Soliman M. S., Sahar N. B. M., Singh M. S. J., Faruque M. R. I., Alzamil A., 2022, "A filling-factor engineered, perfect metamaterial absorber for multiple applications at frequencies set by IEEE in C and X bands", *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 934-946.
- [31] Xie Y., Liu X., Cai Y., Zhu J., 2022, "Polarization-insensitive dielectric metamaterial absorber for near-unity UV-light trapping in monolayer graphene", *Optics Communications*, 503, 127459.
- [32] Li Z., Xia H., Zhao Y., Lei W., Zhao C., Xie W., 2022, "Polarization-insensitive and absorption-tunable ultra-broadband terahertz metamaterial absorbers based on multiple resonant rings", *Results in Physics*, 39, 105786.

- [33] Huang X., Zhou Z., Cao M., Li R., Sun C. and Li X., 2022, “Ultra-broadband mid-infrared metamaterial absorber based on multi-sized resonators”, *Materials*, 15(15), 5411.
- [34] Zhang C., Zhao S. Ji, Liu J., Dai Z., H., 2022, “Design and analysis of a polarization-independent and incident angle insensitive triple-band metamaterial absorber”, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 138, 115131.
- [35] Sheta E. M., Choudhury P. K., Ibrahim A.-B. M.A., 2022, “Polarization-insensitive ultra-wideband metamaterial absorber comprising different forms of ZrN structures at the metasurface”, *Optical Materials*, 133, 112990.
- [36] Đỗ Thành Việt, 2015, Nghiên cứu chế tạo và tính chất hấp thụ tuyệt đối sóng viba của vật liệu meta (metamaterials), Luận án tiến sĩ, Đại học Bách Khoa Hà Nội.
- [37] Nguyễn Thị Hiền, 2016, Nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số cấu trúc lên dải tần làm việc của vật liệu meta có chiết suất âm, Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
- [38] Phạm Thị Trang, 2017, Nghiên cứu khả điều khiển tần số và biên độ cộng hưởng của vật liệu biến hóa (metamaterial), Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
- [39] Đặng Hồng Lưu, 2018, Nghiên cứu vật liệu biến hóa (metamaterials) hấp thụ sóng điện từ ở vùng tần số THz, Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
- [40] Đinh Hồng Tiệp, 2019, Nghiên cứu chế tạo vật liệu hấp thụ băng tần rộng vùng GHz trên cơ sở vật liệu biến hóa (metamaterials), Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
- [41] Trần Văn Huỳnh, 2022, Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ đẳng hướng của MMs trên cơ sở kết hợp với Graphene, Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
- [42] Moradi A., and Tokan N. T., 2022, “Magnetostatic microwaves in circular metallic waveguides filled with uniaxial negative permeability media”, *Journal of Applied Physics*, 132(14), 143901.
- [43] Chang Q., Liu X., Wang Z., Saito N., and Fan T., 2022, “Design of three-dimensional isotropic negative-refractive-index metamaterials with wideband response based on an effective-medium approach”, *Applied Physics A*, 128, 440.

- [44] Wu Q., Ling F., Zhang C., Zhong Z., and Zhang B., 2023, “Water-based metamaterials absorber with broadband absorption in terahertz region”, *Optics Communications*, 526, 128874.
- [45] Zhang Q., Zhang G., Che Z., Zhu J., Feng Y., and Qiu R., 2023, “Polarization-insensitive electromagnetically induced transparency-like and dual-band absorption based on graphene and vanadium dioxide metamaterials”, *Optics Communications*, 530, 129164.
- [46] Lagarkov A. N., Matytsin S. M., Rozanov K. N., and Sarychev A. K., 1998, “Dielectric properties of fiber-filled composites”, *Journal of Applied Physics*, 84(7), 3806.
- [47] Liu L., Matitsine S. M., Gan Y. B., and Rozanov K. N., 2005, “Effective permittivity of planar composites with randomly or periodically distributed conducting fibers”, *Journal of Applied Physics*, 98(6), 063512.
- [48] Qin F., Peng M., Estevez D., and Brosseau C., 2022, “Electromagnetic composites: From effective medium theories to metamaterials”, *Journal of Applied Physics*, 132(10), 101101.
- [49] Liu R., Cui T., Huang D., Zhao B., and Smith D. R., 2007, “Description and explanation of electromagnetic behaviors in artificial metamaterials based on effective medium theory”, *Physical Review E*, 76(2), 026606.
- [50] Zhao Q., Kang L., Du B., Zhao H., Xie Q., Huang X., Li B., Zhou J., and Li L., 2008, “Experimental demonstration of isotropic negative permeability in a three-dimensional dielectric composite”, *Physical Review Letters*, 101(2), 027402.
- [51] Liu X., Zhao Q., Lan C., and Zhou J., 2013, “Isotropic Mie resonance-based metamaterial perfect absorber”, *Applied Physics Letters*, 103(3), 031910.
- [52] Holloway C. L., Kuester E. F., Baker-Jarvis J., and Kabos P., 2003, “A double negative (DNG) composite medium composed of magnetodielectric spherical particles embedded in a matrix”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(10), 2596 - 2603.
- [53] Lim J.-H., and Kim S.-S., 2016, “Analysis of Magnetic Permeability Spectra of Metamaterials Composed of Cut Wire Pairs by Circuit Theory”, *Journal of Magnetism*, 21(2), 187-191.

- [54] La Y., Jeon O. S., Lee Y. J., Park S. Y., Yoo Y. J., Lim T., and Yang K. H., 2020, “Tunable metamaterial absorber using ferromagnetic resonance”, *Journal of the Korean Physical Society*, 77, 1012–1015.
- [55] Wang P., Ren W., Xue Z., and Li W., 2022, “Design of 2.5d miniaturized broadband absorber for ultrahigh-frequency band”, *Electronics*, 11(10), 1664.
- [56] Ha D. T., Hanh V. T. H., Tung B. S., Hien N. T., Dung D. N., Khuyen B. X., Chen L. Y., Lee Y. P., and Lam V. D., 2021, “Ultrathin hybrid absorber based on high-order metamaterial”, *Journal of Optics*, 23(9), 095101.
- [57] Naqvi S. A., Baqir M. A., Gourley G., Iftikhar A., Khan M. S., and Anagnostou D. E., 2022, “A novel meander line metamaterial absorber operating at 24 ghz and 28 ghz for the 5G applications”, *Sensors*, 22(10), 3764.
- [58] Luo W., Wang X., Wang S., Wang X., Liu Z., Li L., Hu F., Wen Y., and Zhou J., 2022, “Miniaturization of dielectric ceramic-based metamaterial perfect absorber”, *Applied Physics Letters*, 120(1), 013502.
- [59] Fan K., Stenger V., and Padilla W. J., 2022, “Pyroelectric metamaterial millimeter-wave detector”, *Applied Physics Letters*, 121(2), 021701.
- [60] Ruan J.-Fu, Lan F., Zou R.-Z., Meng Z.-F., and Hu Y.-H., 2022, “Broadband water-based metamaterial absorber for millimeter-wave, high-power applications”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 36(4), 557-567.
- [61] Chen C., Chai M., Jin M., and He T., 2022, “Terahertz metamaterial absorbers”, *Advanced Materials Technologies*, 7(5), 2101171.
- [62] Wu M., Zhao X., Zhang J., Schalch J., Duan G., Cremin K., Averitt R. D., and Zhang X., 2017, “A three-dimensional all-metal terahertz metamaterial perfect absorber”, *Applied Physics Letters*, 111(5), 051101.
- [63] Hendrickson-Stives A. K., Kang L., Donahue N. R., Keating C. D., and Werner D. H., 2022, “3D printed metamaterial absorbers for mid-infrared surface-enhanced spectroscopy”, *Applied Physics Letters*, 120(19), 191703.
- [64] Wu J.-W., Xu W., Li Y., Liu Y.-F., Gao F., Su W., Xu S., and Sun H.-B., 2022, “Multi-wavelength metamaterial absorber for retrieving complex refractive index of thin-film materials at infrared regimes”, *Measurement*, 195, 111167.
- [65] Huang Z., and Wang B., 2022, “Ultra-broadband metamaterial absorber for capturing solar energy from visible to near infrared”, *Surfaces and Interfaces*, 33, 102244.

- [66] Kumar R., Singh B. K., and Pandey P. C., 2022, "Broadband metamaterial absorber in the visible region using a petal-shaped resonator for solar cell applications", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 142, 115327.
- [67] Dinh M. Q., Le M. T., Ngo S. T., and Tung N. T., 2021, "Unifying approach to multilayer metamaterials absorber for bandwidth enhancement", *Optics Communications*, 485, 126725.
- [68] Kim J., Jeong H., and Lim S., 2019, "Mechanically actuated frequency reconfigurable metamaterial absorber", *Sensors and Actuators A: Physical*, 299, 111619,
- [69] Piper L. K., Singh H. J., Woods J. R. C., Sun K., Muskens O. L., and Apostolopoulos V., 2021, "Mechanically tunable terahertz metamaterial perfect absorber", *Advanced Photonics Research*, 2(12), 2100136.
- [70] Y. Liu, J. Zhou, Q. Chang, J. Liu, J. Ji, and L.-H. Shao, "Transparent and electrically tunable electromagnetic wave absorbing metamaterial", *Applied Physics Letters*, 120(9, pp. 094101, **2022**.
- [71] Squires A. D., Gao X., Du J., Han Z., Seo D. H., Cooper J. S., Murdock A. T., Lam S. K. H., Zhang T., and Laan T. V. D., 2022, "Electrically tuneable terahertz metasurface enabled by a graphene/gold bilayer structure", *Communications Materials*, 3(56).
- [72] Wang W., Wang J., Yan M., Wang J., Ma H., Feng M., and Qu S., 2018, "Dual band tunable metamaterial absorber based on cuboid ferrite particles", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(31), 315001.
- [73] Wang W., Xu C., Yan M., Wang A., Wang J., Feng M., Wang J., and Qu S., 2019, "Broadband tunable metamaterial absorber based on U-shaped ferrite structure", *IEEE Access*, 7, 150969 - 150975.
- [74] Wang Z., Ma Y., Li M., Wu L., Guo T., Zheng Y., Chen Q., and Fu Y., 2022, "A thermal-switchable metamaterial absorber based on the phase-change material of vanadium dioxide", *Nanomaterials*, 12(17), 3000.
- [75] Liu L., Chen C., Jiang Y., Shu C., and He C., 2022, "Active modulation of absorption in terahertz hybrid metal-vanadium dioxide metasurface", *Journal of Alloys and Compounds*, 906, 163913.

- [76] Zhao X., Fan K., Zhang J., Seren H. R., Metcalfe G. D., Wraback M., Averitt R. D., and Zhang X., 2015, “Optically tunable metamaterial perfect absorber on highly flexible substrate”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 231, 74-80.
- [77] Jeong H., Cui Y., Tentzeris M. M., and Lim S., 2020, “Hybrid (3D and inkjet) printed electromagnetic pressure sensor using metamaterial absorber”, *Additive Manufacturing*, 35, 101405.
- [78] Li D., Zhou J., Li Y., Xue W., Zhu Z., and Wen Y., 2023, “Microwave heating of carbon materials for on-demand thermal patterning via tunable electromagnetic resonators”, *Carbon*, 203, 865–875.
- [79] Linden S., Enkrich C., Dolling G., Klein M. W., Zhou J., Koschny T., Soukoulis C. M., Burger S., Schmidt F., and Wegener M., 2006, “Photonic metamaterials: magnetism at optical frequencies”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 12(6), 1097 – 1105.
- [80] Sellier A., Teperik T. V., and Lustrac A. de, 2013, “Resonant circuit model for efficient metamaterial absorber”, *Optics Express*, 21(S6), A997 - A1006.
- [81] Sun L., Cheng H., Zhou Y., and Wang J., 2012, “Broadband metamaterial absorber based on coupling resistive frequency selective surface”, *Optics Express*, 20(4), 4675 - 4680.
- [82] Lv Z., Li Z., Han Y., Cao Y., and Yang L., 2022, “A wideband and ultra-thin metamaterial absorber based on resistive FSS”, *Symmetry*, 14(6), 1148.
- [83] Mayank A., and Manoj K. M., 2021, “An approach for circuit modeling of a multiband resonators based planar metamaterial absorber”, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 63(1), 181–187.
- [84] CST Microwave Studio, Dassault Systèmes. <http://www.cst.com>.
- [85] Weiland T., 1977, “A discretization model for the solution of Maxwell’s equations for six-component fields”, *Archiv für Elektronik und Uebertragungstechnik*, 31, 116-120.
- [86] Weiland T., 1996, “Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods”, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 9, 295-319.
- [87] <https://www.rohde-schwarz.com>.
- [88] Zhou J., Economon E. N., Koschny T., and Soukoulis C. M., 2006, “Unifying approach to left-handed material design”, *Optics Letters*, 31(24), 3620-3622.

- [89] Alici K. B. and Ozbay E., 2008, “Characterization and tilted response of a fishnet metamaterial operating at 100 GHz”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(13), 135011.
- [90] Tung N. T., Lee Y. P. and Lam V. D., 2009, “Transmission properties of electromagnetic metamaterials: From split-ring resonator to fishnet structure”, *Optical Review*, 16, 578–582.
- [91] Song Z., Chen A., Zhang J., and Wang J., 2019, “Integrated metamaterial with functionalities of absorption and electromagnetically induced transparency”, *Optics Express*, 27(18), 25196-25204.
- [92] Shi S., Qiao X. and Jia Q., 2021, “A compact ultra-broadband metamaterial absorber for Ku-, K-, and Ka- band applications”, *Physica Scripta*, 96(12), 125522.
- [93] Li L., Zhang X., Song C. and Huang Y., 2020, “Progress, challenges and perspective on metasurfaces for ambient radio frequency energy harvesting”, *Applied Physics Letters*, 116, 060501.
- [94] Le D. H. and Lim S., 2019, “Four-mode programmable metamaterial using ternary foldable origami” *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11, 28554.
- [95] Le D. H., Xu Y., Tentzeris M. M. and Lim S., 2020, “Transformation from 2D meta-pixel to 3D meta-pixel using auxetic kirigami for programmable multifunctional electromagnetic response”, *Extreme Mechanics Letters*, 36, 100670.
- [96] An N., A. Domel G., Zhou J., Rafsanjani A. and Bertoldi K., 2020, “Programmable hierarchical kirigami”, *Advanced Functional Materials*, 30, 2070039.
- [97] Coulais C., Kettenis C. and Van Hecke M., 2018, “A characteristic length scale causes anomalous size effects and boundary programmability in mechanical metamaterials”, *Nature Physics* 14(40).
- [98] Perhirin S. and Auffret Y., 2013, “A low consumption electronic system developed for a 10 km long all-optical extension dedicated to sea floor observatories using power-over-fiber technology and SPI protocol”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 55, 2562.
- [99] Iyer A. K. and Eleftheriades G. V., 2008, “Mechanisms of subdiffraction free-space imaging using a transmission-line metamaterial superlens: an experimental verification”, *Applied Physics Letters*, 92, 131105.

- [100] Danaeifar M., Kamyab M. and Jafargholi A., 2012, "Broadband cloaking with transmission-line networks and metamaterial", *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 22, 663.
- [101] Ghosh S. and Srivastava K. V., 2014, "An equivalent circuit model of FSS-based metamaterial absorber using coupled line theory", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 14, 511-514.
- [102] Prodan E., Radloff C., Halas N. J. and Nordlander P. A., 2003, "A hybridization model for the plasmon response of complex nanostructures", *Science*, 302(5644), 419-422.
- [103] Kante B., Burokur S. N., Sellier A., Lustrac A. D. and Lourtioz J. M., 2009, "Controlling plasmon hybridization for negative refraction metamaterials", *Physical Review B*, 79, 07512.
- [104] Tung N. T., Viet D. T., Tung B. S., Hieu N. V., Lievens P. and Lam V. D., 2012, "Broadband negative permeability by hybridized cut-wire pair metamaterials", *Applied Physics Express*, 5, 112001.
- [105] Kim Y. J., Yoo Y. J., Kim K. W., Rhee J. Y., Kim Y. H. and Lee Y. P., 2014, "Dual broadband metamaterial absorber", *Optics Express*, 23, 3861.
- [106] Zhang C., Yang J., Cao W., Yuan W., Ke J., Yang L. and Cui T., 2019, "Transparently curved metamaterial with broadband millimeter wave absorption", *Photonics Res.*, 7(4), 478-485.
- [107] Wang Y., Zhu D., Cui Z., Hou L., Lin L., Qu F., Liu X. and Nie P., 2019, "All-dielectric terahertz plasmonic metamaterial absorbers and high-sensitivity sensing", *ACS Omega*, 4, 18645.
- [108] Zhao J., Wei S., Wang C., Chen K., Zhu B., Jiang T. and Feng Y., 2018, "Broadband microwave absorption utilizing water-based metamaterial structures", *Opt. Express*, 26, 8522.
- [109] Lee D., Jeong H. and Lim S., 2017, "Electronically switchable broadband metamaterial absorber", *Sci. Rep.*, 7, 4891.
- [110] Ning J., Dong S., Luo X., Chen K., Zhao J., Jiang T. and Feng Y., 2020, "Ultra-broadband microwave absorption by ultra-thin metamaterial with stepped structure induced multi-resonances", *Results Phys.*, 18, 103320.
- [111] Vu D. Q., Le D. H., Dinh D. T., Trinh T. G., Yue L., Le D. T. and Vu D. L., 2018, "Broadening the absorption bandwidth of metamaterial absorber by coupling three dipole resonances", *Phys. B Condens. Matters*, 532, 90.

- [112] Chen H.-T., O'Hara J. F., Azad A. K., Taylor A. J., 2011, "Manipulation of terahertz radiation using metamaterials", *Laser Photon. Rev.*, 5, 513-533.
- [113] Chuanxin C., Minqi C., Jin M., He T., 2022, "Terahertz Metamaterial Absorbers", *Adv. Mater. Technol.*, 7(5), 2101171.
- [114] Ferguson B. and Zhang X. C., 2002, "Materials for terahertz science and technology". *Nat. Mater.* 1, 26-33.
- [115] Williams G. P., 2006, "Filling the THz gap - high power sources and applications", *Rep. Prog. Phys.*, 69, 301-326.
- [116] Q. Bi, "Ten trends in the cellular industry and an outlook on 6G," *IEEE Commun. Mag.*, 57(12), pp. 31–36, Dec. 2019.
- [117] Min-hua L., Shou-yin L., Lin-yan G., Hai L., He-lin Y., Bo-xun X., 2013, "Influence of the dielectric-spacer thickness on the dual-band metamaterial absorber", *Optics Communications*, 295, 262-267.
- [118] Guangwu D., Jacob S., Xiaoguang Z., Zhang J., Averitt R. D., and Zhang X., 2018, "Analysis of the thickness dependence of metamaterial absorbers at terahertz frequencies", *Optics Express*, 26(3), 2242-2251.
- [119] Zhang Y., Dong H., Mou N., Li H., Yao X., and Zhang L., 2021, "Tunable and transparent broadband metamaterial absorber with water-based substrate for optical window applications", *Nanoscale*, 13, 7831–7837.
- [120] Song Q., Zhang W., Wu P. C., Zhu W., Shen Z. X., Chong P. H. J., Liang Q. X., Yang Z. C., Hao Y. L., Cai H., Zhou H. F., Gu Y., Lo G.-Q., Tsai D. P., Bourouina T., Leprince-Wang Y., and Liu A.-Q., 2017, "Water-resonator-based metasurface: an ultrabroadband and near-unity absorption", *Advanced Optical Materials*, 5, 1601103.
- [121] Hu F., Xu N., Wang W., Wang Y., Zhang W., Han J., Zhang W., 2016, "A dynamically tunable terahertz metamaterial absorber based on an electrostatic MEMS actuator and electrical dipole resonator array", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 26, 025006.
- [122] Zhao J., Cheng Q., Chen J., Qi M. Q., Jiang W. X., and Cui T. J., 2013, "A tunable metamaterial absorber using varactor diodes", *New Journal of Physics*, 15, 043049.
- [123] Khuyen B. X., Tung B. S., Kim Y. J., Hwang J. S., Kim K. W., Rhee J. Y., Lam V. D., Kim Y. H., Lee Y. P., 2018, "Ultra-subwavelength thickness for

- dual/triple-band metamaterial absorber at very low frequency”, *Scientific Reports*, 8, 11632.
- [124] Xu J., Wang J., Yang R., Tian J., Chen X., and Zhang W., 2018, “Frequency-tunable metamaterial absorber with three bands”, *Optik*, 172, 1057–1063.
- [125] Wang L., Xia D., Fu Q., Ding X., and Wang Y., 2020, “A tunable ultra-wideband metamaterial absorber based on graphene”, *Journal of Computational Electronics*, 20, 107–115.
- [126] Wang L., Xia D., Fu Q., Ding X., and Wang Y., 2020, “Graphene-based tunable wideband metamaterial absorber with polarization insensitivity and wide incident angle”, *Frontiers in Physics*, 8, 303.
- [127] Hassan A. G., Sumaid M., Ahmed F., Shoaib N., Abbasi Q. H., and Nikolaou S., 2023, “Reconfigurable absorptive and polarization conversion metasurface consistent for wide angles of incidence”, *Scientific Reports*, 13, 18209.
- [128] Li H., Costa F., Wang Y., Cao Q., and Monorchio A., 2020, “A wideband multifunctional absorber/reflector with polarization-insensitive performance”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68, 5033–5038
- [129] Ghosh S., Srivastava K. V., 2017, “Polarization-insensitive single-/dual-band tunable absorber with independent tuning in wide frequency range”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65, 4903–4908.