

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Dương Thị Hà

**NGHIÊN CỨU ĐẶC TRƯNG HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ
CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CỘNG HƯỞNG BẬC CAO
CÓ TÍNH NĂNG ĐÀN HỒI Ở VÙNG TẦN SỐ GHz**

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

Dương Thị Hà

**NGHIÊN CỨU ĐẶC TRƯNG HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỬ
CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CỘNG HƯỞNG BẬC CAO
CÓ TÍNH NĂNG ĐÀN HỒI Ở VÙNG TẦN SỐ GHz**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LIỆU ĐIỆN TỬ

Mã số: 9440123

Xác nhận của Học viện

Người hướng dẫn 1

Người hướng dẫn 2

Khoa học và Công nghệ

(Ký, ghi rõ họ tên)

(Ký, ghi rõ họ tên)

KT. GIÁM ĐỐC

PHÓ GIÁM ĐỐC



Nguyễn Thị Trung

TS. Bùi Xuân Khuyến

GS. TS. Vũ Đình Lãm

Hà Nội - 2024

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án: “*Nghiên cứu đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa cộng hưởng bậc cao có tính năng đàn hồi ở vùng tần số GHz*” là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn khoa học của tập thể hướng dẫn. Luận án sử dụng thông tin trích dẫn từ nhiều nguồn tham khảo khác nhau và các thông tin trích dẫn được ghi rõ nguồn gốc. Các kết quả nghiên cứu của tôi được công bố chung với các tác giả khác đã được sự nhất trí của đồng tác giả khi đưa vào luận án. Các số liệu, kết quả được trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của tác giả. Luận án được hoàn thành trong thời gian tôi làm nghiên cứu sinh tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Hà Nội, ngày 20 tháng 7 năm 2024

Tác giả luận án

(Ký và ghi rõ họ tên)

Dương Thị Hà

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên, tôi xin được gửi lời cảm ơn chân thành và sâu sắc nhất tới GS.TS. Vũ Đình Lãm và TS. Bùi Xuân Khuyển, hai thầy đã luôn tận tình hướng dẫn, định hướng kịp thời và tạo điều kiện thuận lợi nhất để tôi hoàn thành luận án này.

Tôi xin chân thành cảm ơn Ban Lãnh đạo cùng các Phòng chức năng của Học viện Khoa học và Công nghệ, Ban Lãnh đạo Viện Khoa học vật liệu đã tạo điều kiện về môi trường học tập-nghiên cứu chuyên nghiệp-hiện đại trong suốt quá trình tôi thực hiện các kết quả của luận án.

Tôi xin chân thành cảm ơn TS. Bùi Sơn Tùng, các Thầy-Cô, anh chị đồng nghiệp tại Phòng Vật liệu biến hóa và ứng dụng và Phòng Vật lý Vật liệu từ và siêu dẫn - Viện Khoa học vật liệu đã hỗ trợ về triển khai các ý tưởng/nhiệm vụ khoa học, tạo điều kiện cho tôi về cơ sở vật chất trong quá trình thực hiện luận án.

Tôi xin chân thành cảm ơn Ban Giám hiệu, các Phòng chức năng và các Thầy-Cô giáo cùng đồng nghiệp tại Khoa Vật lý, Trường Đại học Sư phạm (Đại học Thái Nguyên), nơi tôi đang công tác đã giúp đỡ tôi về sắp xếp công việc chuyên môn tại cơ quan để tôi có thể đảm bảo tiến độ thực hiện luận án.

Tôi xin cảm ơn Quỹ Đồi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), Viện Nghiên cứu Dữ liệu lớn đã tài trợ Học bổng tiến sĩ trong nước (Mã số VINIF.2021.TS.092) cho tôi trong quá trình tôi thực hiện luận án.

Cuối cùng, tôi xin cảm ơn gia đình và đồng nghiệp đã luôn truyền động lực, tạo mọi điều kiện thuận lợi để tôi hoàn thành luận án này.

Hà Nội, ngày 20 tháng 7 năm 2024

Tác giả luận án

(Ký và ghi rõ họ tên)

Dương Thị Hà

MỤC LỤC	
DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT	i
DANH MỤC BẢNG	ii
DANH MỤC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ	iii
Chương 1. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU BIẾN HÓA	6
1.1. Tổng quan về vật liệu biến hóa hấp thụ mạnh sóng điện từ (MPA)	6
1.1.1. Lịch sử hình thành và phát triển của MPA	6
1.1.2. Phân loại MPA	12
1.1.3. Cơ chế hấp thụ sóng điện từ của MPA trong vùng tần số GHz.....	17
1.2. Lý thuyết cộng hưởng bậc cao của MPA.....	20
1.2.1. Đặc trưng điện từ của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ có cộng hưởng bậc cao (H-MPA).....	21
1.2.2. Lý thuyết mạch tương đương cho cộng hưởng bậc cao	23
1.3. Đặc tính điện từ của một số cấu trúc H-MPA.....	28
1.3.1. Cấu trúc đĩa tròn và vòng cộng hưởng hình tròn	28
1.3.2. Cấu trúc đĩa tròn bị cắt.....	33
1.4. Cải tiến hoạt động của MPA dựa trên tính đàn hồi của vật liệu	35
1.4.1. MPA đàn hồi dựa trên lớp điện môi Polyimide	36
1.4.2. MPA đàn hồi dựa trên lớp điện môi Polydimethylsiloxane (PDMS).....	39
1.4.3. MPA đàn hồi có lớp điện môi làm từ giấy.....	41
1.5. Kết luận chương 1	42
Chương 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	44
2.1. Phương pháp mô phỏng tính chất điện từ của H-MPA đàn hồi.....	44
2.2. Mô hình tính toán các tham số hiệu dụng của H-MPA.....	49
2.2.1. Mô hình mạch điện LC	49
2.2.2. Tính toán trở kháng hiệu dụng	53
2.3. Phương pháp chế tạo H-MPA hoạt động trong vùng tần số GHz.....	55
2.4. Phương pháp thực nghiệm đánh giá đặc trưng điện từ của H-MPA.....	58
2.5. Kết luận chương 2	60
Chương 3. ĐẶC TRƯNG HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CỘNG HƯỞNG TỪ BẬC LẺ	61
3.1. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA tích hợp tụ điện hoạt động trong cả hai băng tần VHF (30 - 300 MHz) và S (2,0 – 4,0 GHz)	62
3.1.1. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA có cấu trúc cộng hưởng hình vuông, chưa được tích hợp tụ điện.....	62

3.1.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA được tích hợp tụ điện	68
3.1.3. Khảo sát ảnh hưởng của tụ điện đến tính chất hấp thụ của vật liệu	71
3.1.4. Ảnh hưởng của góc tới sóng điện từ lên đặc trưng hấp thụ của H-MPA.....	73
3.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA đàn hồi hoạt động trong băng tần UHF (300 MHz – 1000 MHz) và băng tần L (1,0 – 2,0 GHz)	79
3.2.1. Thiết kế mô phỏng H-MPA đàn hồi.....	79
3.2.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc ba ở trạng thái phẳng	80
3.2.3. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc ba ở các trạng thái biến dạng khác nhau.....	83
3.3. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA đàn hồi trong vùng tần số THz	85
3.3.1. Thiết kế cấu trúc H-MPA đàn hồi hoạt động trong vùng THz	85
3.3.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA đàn hồi hoạt động trong vùng THz.....	87
3.4. Kết luận chương 3	94
Chương 4. ĐẶC TRƯNG HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CỘNG HƯỞNG TỪ BẬC CHẴN CÓ TÍNH NĂNG ĐÀN HỒI	95
4.1. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc hai có tính năng đàn hồi....	95
4.1.1. Thiết kế cấu trúc H-MPA cộng hưởng từ bậc hai	95
4.1.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc hai ở trạng thái phẳng	98
4.1.3. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc hai ở trạng thái uốn cong	103
4.2. Cộng hưởng từ bậc hai trong cấu trúc cộng hưởng dạng gấp khúc	108
4.2.1. Thiết kế và chế tạo vật liệu	108
4.2.2. Ảnh hưởng của các tham số cấu trúc và sự phân cực sóng điện từ lên đặc trưng hấp thụ của vật liệu ở trạng thái phẳng	110
4.2.3. Cộng hưởng từ bậc hai khi sóng điện từ tới bề mặt cấu trúc theo hướng xiên góc	112
4.2.4. Cộng hưởng từ bậc hai khi cấu trúc bị uốn cong	114
4.3. Kết luận chương 4	117
KẾT LUẬN	118
KIẾN NGHỊ	119
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO	121
PHỤ LỤC	133

DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt/ Kí hiệu	Tiếng Anh	Tiếng Việt
A	Absorption	Độ hấp thụ
C	C band	Vùng tần số từ 4,0 đến 8,0 GHz
CST	Computer Simulation Technology	Công nghệ mô phỏng bằng máy tính
CW	Cut Wire	Thanh kim loại
CWP	Cut – Wire Pair	Cặp thanh kim loại
DEC	Differential Equivalent- Circuit	Mạch tương đương cho cộng hưởng bậc cao
EM	Electromagnetic	Điện từ
FWHM	Full Width at Half Maximum	Độ rộng ở nửa cực đại
FBW	Fractional Bandwidth	Độ rộng tương đối
FR-4	Fire Retardant	Vật liệu điện môi FR-4
FIT	Finite Integration Technique	Kỹ thuật tích phân hữu hạn
H-MPA	High-order Metamaterial perfect absorber	Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ cộng hưởng bậc cao
L	L band	Vùng tần số từ 1,0 đến 2,0 GHz
MMs	Metamaterials	Vật liệu biến hóa
MPA	Metamaterial perfect absorber	Vật liệu biến hóa hấp thụ mạnh sóng điện từ
NIR	Near Infrared	Hồng ngoại gần
PDMS	Polydimethylsiloxane	Vật liệu Polydimethylsiloxane
PCB	Printed Circuit Board	Bảng mạch in
S	S band	Vùng tần số từ 2,0 đến 4,0 GHz
SRR	Split-Ring Resonator	Vòng cộng hưởng có rãnh
RCS	Radar cross section	Tiết diện radar
R	Reflection	Độ phản xạ
TE	Transverse Electric	Điện trường ngang
TM	Transverse Magnetic	Từ trường ngang
T	Transmittance	Độ truyền qua
UV	Ultraviolet	Cực tím
UHF	Ultra high frequency	Vùng tần số từ 300 MHz đến 1000 MHz
VNA	Vector Network Analyzer	Hệ phân tích mạng véc tơ
VHF	Very high frequency	Vùng tần số từ 30 MHz đến 300 MHz
X	X band	Vùng tần số từ 8,0 đến 12,0 GHz

DANH MỤC BẢNG

Bảng 3.1. Số liệu phổ hấp thụ mô phỏng của MPA được đề xuất khi t_d thay đổi. ...	70
Bảng 3.2. Số liệu phổ hấp thụ mô phỏng trong băng tần VHF của H-MPA được đề xuất khi điện dung C_1 thay đổi.	72
Bảng 3.3. Số liệu phổ hấp thụ mô phỏng trong băng tần VHF của H-MPA được đề xuất khi điện dung C_2 thay đổi.	73
Bảng 3.4. Các thông số hình học tối ưu của H-MPA	79

DANH MỤC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

- Hình 1.1.** Các hiện tượng trực quan đối với vật liệu biến hóa: (a) định luật khúc xạ Snell ngược, (b) hiệu ứng Doppler ngược và (c) bức xạ Čerenkov ngược.....7
- Hình 1.2.** Cấu trúc và phổ hấp thụ của (a) MPA đầu tiên được đề xuất, (b) MPA có cấu trúc cộng hưởng dạng chữ I, (c) MPA đẳng hướng hai chiều, (d) MPA điện môi8
- Hình 1.3.** Cấu trúc MPA được đề xuất cho các ứng dụng (a) cảm biến, (b) RCS ...11
- Hình 1.4.** (a) Cấu trúc vật liệu MPA hấp thụ siêu hẹp; (b) Phổ hấp thụ/phản xạ của vật liệu.....13
- Hình 1.5.** (a) Minh họa ô cơ sở của MPA đa dải tần hoạt động trong vùng GHz, mẫu MPA chế tạo với 2 (b) và 3 (c) vòng cộng hưởng kích thước khác nhau, (d) phổ hấp thụ của mẫu MPA.....14
- Hình 1.6.** (a) MPA có cấu trúc đa lớp (b) phổ hấp thụ của MPA đề xuất khi số lớp thay đổi.....14
- Hình 1.7.** Phổ hấp thụ mô phỏng của MPA có cấu trúc gồm (a) 4 lớp cộng hưởng giống nhau, (b) 4 lớp cộng hưởng có kích thước khác nhau, (c) kích thước của 4 cấu trúc cộng hưởng.....15
- Hình 1.8.** Một số MPA hấp thụ băng tần rộng: (a) cấu trúc cộng hưởng được sắp xếp đồng phẳng; (b) các cấu trúc cộng hưởng xếp chồng lên nhau; (c) sử dụng điện trở; (d) sử dụng vật liệu plasmonic16
- Hình 1.9.** Mô hình phản xạ và giao thoa của MPA.....19
- Hình 1.10.** (a) Cấu trúc ô cơ sở của MPA trong vùng THz, (b) và (c) lần lượt biểu diễn pha và biên độ của phản xạ đầu tiên (đường đứt nét) và thứ cấp (đường liền nét) với các độ dày lớp điện môi khác nhau. Vị trí đỉnh hấp thụ được đánh dấu bằng các vòng tròn.20
- Hình 1.11.** (a) Cấu trúc CW và (b) CWP, (c) phổ hấp thụ mô phỏng của cấu trúc CW và CWP, (d) phân bố dòng điện bề mặt ở đỉnh thứ tư và (e) phổ truyền qua của vật liệu hấp thụ CWP.22
- Hình 1.12.** (a) Sơ đồ các thông số vật lý của MPA dạng CWP, (b) mạch LC tương đương của cấu trúc CWP không có tổn hao Ohmic và điện môi, (c) mạch LC tương đương đơn giản hóa, và (d) các nghiệm của mạch, (e) phân bố dòng điện bề mặt cảm ứng theo thứ tự cộng hưởng thứ nhất, thứ ba, thứ năm và thứ bảy, (f) mạch LC tương đương với tổn hao điện môi và Ohmic để tính trở kháng hiệu dụng.24

Hình 1.13. (a) Phần thực và (b) phần ảo của trở kháng hiệu dụng, (c) phổ hấp thụ của CWP tính toán bằng phương pháp EC, tính số và đo đạc, (d) thiết lập phép đo độ phản xạ.	27
Hình 1.14. Phổ hấp thụ mô phỏng của MPA dạng đĩa tròn (a) và dạng vòng nhẫn tròn (b); c) và (d) phân bố dòng điện bề mặt tại các tần số hấp thụ khác nhau cho hai cấu trúc cộng hưởng tương ứng.	29
Hình 1.15. (a), (b) Kết quả mô phỏng và (c), (d) kết quả đo đạc phổ hấp thụ quanh hai vùng cộng hưởng của MPA dạng vòng cộng hưởng kín dưới các góc phân cực khác nhau.	30
Hình 1.16. (a) Minh họa cấu trúc ô cơ sở của MPA và (b) mô hình mạch LC của nó ở cộng hưởng từ cơ bản, (c) phổ hấp thụ, truyền qua và phản xạ mô phỏng.	31
Hình 1.17. Minh họa phân bố dòng điện bề mặt của MPA ở các tần số cộng hưởng khác nhau.	32
Hình 1.18. Phổ hấp thụ phụ thuộc (a) góc phân cực và (b) góc tới.	32
Hình 1.19. Cấu trúc MPA được đề xuất.	33
Hình 1.20. (a) Mẫu MPA chế tạo được, (b) phổ hấp thụ của MPA đề xuất, (c) phân bố dòng điện bề mặt tại các đỉnh hấp thụ của MPA.	34
Hình 1.21. Cấu trúc ô cơ sở của MPA (a) và (b), phổ hấp thụ của MPA với các tham số hình học khác nhau (c) và (d).	34
Hình 1.22. Phân bố dòng điện bề mặt tại các tần số hấp thụ của MPA cho trường hợp phổ hấp thụ có 4 đỉnh.	35
Hình 1.23. Phân bố dòng điện bề mặt tại các tần số hấp thụ của MPA cho trường hợp phổ hấp thụ có 5 đỉnh.	35
Hình 1.24. (a) Ô cơ sở của MPA dựa trên điện môi Polyimide, (b) MPA được uốn cong, (c) Phổ hấp thụ khi ở trạng thái phẳng và uốn cong.	37
Hình 1.25. (a) Cấu trúc ô cơ sở và (b) mặt trên của cấu trúc MPA, (c) thiết lập phép đo tham số tán xạ của MPA khi được uốn cong.	38
Hình 1.26. Phổ hấp thụ của (a) MPA ở dạng phẳng và (b) MPA được uốn cong với bán kính uốn cong là 40 mm.	38
Hình 1.27. Minh họa MPA sử dụng điện môi PDMS và phổ hấp thụ của vật liệu đề xuất khi bị uốn cong.	39
Hình 1.28. (a) Minh họa cấu trúc của MPA sử dụng lớp điện môi PDMS có thể điều khiển bằng cách tác dụng lực kéo dài dọc theo hướng trục x và y, (b) minh họa cấu trúc hình học của MPA khi bị kéo giãn theo các trục khác nhau.	40

Hình 1.29. Minh họa khả năng điều khiển của MPA sử dụng lớp điện môi PDMS dưới tác dụng của lực kéo dài (a) dọc theo hướng trục x và (b) dọc theo hướng trục xy.....	40
Hình 1.30. (a) Lớp trên và (b) lớp dưới của MPA có lớp điện môi làm từ giấy, (c) phổ phản xạ thực nghiệm với và mô phỏng của vật liệu.	41
Hình 1.31. (a) Cấu trúc ô cơ sở của MPA có lớp điện môi làm từ giấy, (b) vật liệu chế tạo được ở trạng thái phẳng (bên trái) và uốn cong (bên phải), (c) phổ hấp thụ của vật liệu.	42
Hình 2.1. Sơ đồ các bước nghiên cứu H-MPA.....	44
Hình 2.2. Minh họa thiết lập lưới chính và lưới kép trong CST.	46
Hình 2.3. (a) Giao diện phần mềm CST, (b) tham số tán xạ và (c) phân bố dòng điện và mật độ năng lượng tổn thất bề mặt thu được sử dụng mô phỏng CST.	47
Hình 2.4. Thiết lập điều kiện biên mô phỏng H-MPA ở dạng phẳng.	47
Hình 2.5. Thiết lập điều kiện biên (a) và nguồn phát, nguồn thu (b) trong mô phỏng H-MPA uốn cong.	48
Hình 2.6. (a) Minh họa chiều của dòng điện cảm ứng trên hai thanh kim loại và (b) từ trường khi có cộng hưởng từ cơ bản, (c) mặt trên của cấu trúc, (d) mạch LC cho cộng hưởng từ và (e) cộng hưởng điện.	50
Hình 2.7. (a) Sơ đồ cấu trúc ô cơ sở và (b) mạch điện LC của cấu trúc.	52
Hình 2.8. (a) Phân bố dòng điện bề mặt tại 13,39 GHz, (b) minh họa chiều dòng điện và điện tích cảm ứng và (c) bán kính hiệu dụng ở tần số cộng hưởng từ bậc ba.	53
Hình 2.9. (a) Minh họa cấu trúc ô cơ sở (a), (b) phổ hấp thụ, (c) trở kháng hiệu dụng của H-MPA; (d) cấu trúc vật liệu, (e) phổ hấp thụ, và (f) trở kháng hiệu dụng của MPA dải rộng trong vùng THz.	54
Hình 2.10. Hệ thiết bị quang khắc.....	55
Hình 2.11. (a) Chuẩn bị chế tạo mẫu, (b) quy trình chế tạo vật liệu MMs sử dụng phương pháp quang khắc.	56
Hình 2.12. Mẫu vật liệu MMs được chế tạo theo phương pháp quang khắc.	57
Hình 2.13. Chế tạo vật liệu MPA đàn hồi bằng phương pháp in lưới.....	58
Hình 2.14. Máy phân tích mạng véc tơ VNA.....	58
Hình 2.15. Thiết lập phép đo đặc trưng phản xạ của H-MPA sử dụng hệ thiết bị VNA.	59
Hình 3.1. (a) Cấu trúc ô cơ sở của vật liệu, (b) phổ hấp thụ mô phỏng của vật liệu khi lớp điện môi có độ dày là $t_d = 3,0$ mm.....	62

- Hình 3.2.** Phân bố dòng điện cảm ứng trên các bề mặt kim loại tại (a) $f_1 = 2,05$ GHz; (b) $f_2 = 6,06$ GHz.....63
- Hình 3.3.** (a) Chiều dòng điện cảm ứng và từ trường (trong mặt phẳng \mathbf{E} , \mathbf{k}), (b) minh họa mặt trên của cấu trúc vật liệu và các tham số hình học, (c) mạch điện LC tương đương và (d) mạch điện thu gọn.63
- Hình 3.4.** Phổ hấp thụ (a) và độ hấp thụ (b) phụ thuộc vào độ dày lớp điện môi. ...65
- Hình 3.5.** Ảnh hưởng của kích thước cấu trúc cộng hưởng w lên (a) phổ hấp thụ và (b) độ hấp thụ tại các tần số f_1 và f_266
- Hình 3.6.** Ảnh hưởng của góc tới θ đến phổ hấp thụ của vật liệu.66
- Hình 3.7.** (a) Minh họa mô hình sóng tới bề mặt vật liệu theo phương vuông góc ($\theta = 0^\circ$) và xiên góc, phân bố dòng điện bề mặt và từ trường: (b) và (c) tại 2,56 GHz, (d) và (e) tại 3,8GHz, (f) và (g) tại 7,54 GHz, (h) và (i) tại 8,2 GHz.67
- Hình 3.8.** Sơ đồ minh họa cấu trúc siêu ô cơ sở của H-MPA khi được tích hợp tụ điện.68
- Hình 3.9.** Phổ phản xạ (R), hấp thụ (A) và truyền qua (T) của H-MPA tích hợp tụ điện trong (a) băng tần VHF và (b) băng tần S.69
- Hình 3.10.** Ảnh hưởng của độ dày lớp điện môi lên phổ hấp thụ trong (a) băng tần VHF và (b) băng tần S.70
- Hình 3.11.** Ảnh hưởng của kích thước tấm kim loại ở mặt trên của ô cơ sở lên phổ hấp thụ trong (a) băng tần VHF và (b) băng tần S.71
- Hình 3.12.** Ảnh hưởng của giá trị điện dung của tụ điện C_1 lên phổ hấp thụ của H-MPA trong các băng tần (a) VHF và (b) S.72
- Hình 3.13.** Ảnh hưởng của giá trị điện dung của tụ điện C_2 lên phổ hấp thụ của H-MPA trong các băng tần (a) VHF và (b) S.73
- Hình 3.14.** Mẫu H-MPA chế tạo được74
- Hình 3.15.** (a) Phân bố dòng điện trên bề mặt kim loại tại 106 MHz và 123,4 MHz và (b) phổ hấp thụ trong vùng băng tần VHF của vật liệu phụ thuộc góc tới của sóng điện từ θ75
- Hình 3.16.** Phân bố tổn hao (a) tại 106 MHz và (b) tại 123,4 MHz.....75
- Hình 3.17.** Kết quả mô phỏng và đo đạc phổ hấp thụ của H-MPA trong băng tần S với góc tới khác nhau : (a) 5° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° và (e) 55°76
- Hình 3.18.** Phân bố dòng điện bề mặt và mật độ năng lượng điện tại ba cộng hưởng khác nhau: (a), (b) 3,09 GHz, (c), (d) 3,55 GHz khi $\theta = 30^\circ$ và (e), (f) khi $\theta = 55^\circ$.78
- Hình 3.19.** Minh họa cấu trúc ô cơ sở của H-MPA (a) mặt trên và (b) mặt bên.80

Hình 3.20. (a) Phổ hấp thụ và (b) trở kháng hiệu dụng của H-MPA trong băng tần UHF, (c) phổ hấp thụ và (d) trở kháng hiệu dụng của H-MPA trong băng tần L.....	81
Hình 3.21. Phân bố dòng điện bề mặt tại (a) 450 MHz và (b) 1,47 GHz.....	81
Hình 3.22. Ảnh hưởng của góc tới với (a) - (c) sóng phân cực TE và (b) - (d) sóng phân cực TM.	82
Hình 3.23. Ảnh hưởng của góc phân cực lên phổ hấp thụ của H-MPA đề xuất.	83
Hình 3.24. Sự phụ thuộc của phổ hấp thụ mô phỏng vào bán kính uốn đối với các đỉnh hấp thụ (a) cơ bản và (b) bậc cao.	84
Hình 3.25. Phân bố dòng điện bề mặt trên các lớp kim loại của H-MPA với bán kính uốn $R = 200$ mm ở các tần số khác nhau.	85
Hình 3.26. Cấu trúc ô cơ sở của H-MPA hoạt động trong vùng tần số THz.	86
Hình 3.27. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng và (b) trở kháng hiệu dụng của H- MPA.	87
Hình 3.28. Phân bố điện trường tại các tần số (a) 34,9 THz và (b) 97,2 THz.	87
Hình 3.29. Phổ hấp thụ của H-MPA (a) phụ thuộc góc phân cực và (b) phụ thuộc góc tới.....	88
Hình 3.30. Phân bố điện trường (a) tại 57,75 THz, (b) tại 110 THz và (c) tại 117,38 THz khi sóng tới dưới góc 60°	89
Hình 3.31. Minh họa (a) định nghĩa bán kính uốn cong R , (b) mẫu uốn cong trong mô phỏng và (c) phổ hấp thụ của vật liệu ở trạng thái uốn cong với bán kính uốn khác nhau.	90
Hình 3.32. (a) Phổ hấp thụ của vật liệu, (b) vị trí đỉnh và (c) độ hấp thụ khi độ dày lớp điện môi t_d thay đổi từ 0,1 đến 0,2 μm	91
Hình 3.33. Phổ hấp thụ của vật liệu khi p thay đổi từ 4 đến 5,5 μm , độ dày lớp điện môi được giữ không đổi 0,13 μm	92
Hình 3.34. Phân bố điện trường tại hai mặt kim loại tại các tần số (a) 16,15 THz và (b) 44,75 THz	92
Hình 3.35. (a) Trở kháng hiệu dụng và (b) phân bố mật độ năng lượng tiêu tán tại các phần của vật liệu.....	93
Hình 3.36. Phân bố mật độ năng lượng tổn hao tại tần số (a) 16,15 THz và (b) 44,75 THz.....	93
Hình 4.1. (a) Ô cơ sở của mẫu H-MPA được đề xuất, (b) ảnh cấu trúc mặt trên của ô cơ sở, (c) thiết lập phép đo hệ số phản xạ của H-MPA chế tạo được.	96
Hình 4.2. Phổ hấp thụ mô phỏng của H-MPA đang xét khi độ dày lớp điện môi thay đổi từ 0,3 đến 2,0 mm.	97

Hình 4.3. Phân bố dòng điện bề mặt tại (a) 4,3 GHz và (b) 13,0 GHz.	97
Hình 4.4. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng của H-MPA, (b) trở kháng hiệu dụng cho trường hợp sóng tới phân cực TE, (c) phân bố dòng điện bề mặt và (e) phân bố điện trường và từ trường tại 4,3 GHz với sóng tới phân cực TE, (d) phân bố dòng điện bề mặt và (f) phân bố điện trường và từ trường tại 4,3 GHz với sóng tới phân cực TM.	98
Hình 4.5. (a) Mô hình mạch điện LC trong trường hợp cộng hưởng từ cơ bản, (b) mạch điện rút gọn.....	100
Hình 4.6. Phổ hấp thụ mô phỏng khi góc phân cực tăng từ 0 đến 80° (a) và khi thay đổi góc tới từ 0° đến 75° với sóng phân cực (b) TE và (c) TM.....	101
Hình 4.7. Phân bố dòng điện tại (a) 4,3 GHz và (b) 8,6 GHz với sóng phân cực TE, (c) 4,3 và (d) 8,7 GHz ở phân cực TM.....	102
Hình 4.8. Phân bố điện trường tại (a) 8,6 GHz dưới sóng phân cực TE, (b) 8,7 GHz dưới sóng phân cực TM, (c) mạch điện LC tương đương và (d) mạch điện LC rút gọn	103
Hình 4.9. Minh họa cấu hình uốn cong và định nghĩa bán kính uốn cho các trường hợp sóng tới phân cực (a) TE, (b) TM và (c) mẫu vật liệu chế tạo được.....	104
Hình 4.10. Phổ hấp thụ mô phỏng (a), (c), (e) và thực nghiệm (b), (d), (f) của H-MPA với bán kính uốn cong thay đổi từ R = 100 mm đến R = 20 mm đối với phân cực TE.	105
Hình 4.11. Phổ hấp thụ mô phỏng (a), (c), (e) và thực nghiệm (b), (d), (f) của H-MPA với bán kính uốn cong thay đổi từ R = 100 mm đến R = 20 mm đối với phân cực TM	106
Hình 4.12. Phân bố dòng điện bề mặt với sóng phân cực TE tại 8,56 GHz khi vật liệu uốn cong với R = 100 mm.....	107
Hình 4.13. Phân bố dòng điện bề mặt với sóng phân cực TM tại 8,6 GHz khi vật liệu uốn cong với R = 100 mm.....	107
Hình 4.14. (a) Sơ đồ cấu trúc ô cơ sở của H-MPA đề xuất, (b) sơ đồ quy trình chế tạo vật liệu, (c) mẫu H-MPA được chế tạo và (d) thiết lập phép đo phản xạ của mẫu vật liệu khi ở trạng thái uốn cong.....	108
Hình 4.15. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng và thực nghiệm, (b) trở kháng hiệu dụng của H-MPA đề xuất, (c) mật độ tổn thất năng lượng và (d) dòng điện bề mặt ở tần số 3,7 GHz.	109
Hình 4.16. (a) Ảnh hưởng của độ dày lớp điện môi lên phổ hấp thụ, (b) sự thay đổi cường độ và vị trí đỉnh hấp thụ khi độ dày điện môi thay đổi từ 0,3 đến 0,7 mm..	110

Hình 4.17. (a) Ảnh hưởng của độ rộng vòng cộng hưởng lên phổ hấp thụ, (b) sự thay đổi cường độ và vị trí đỉnh hấp thụ khi độ rộng vòng cộng hưởng thay đổi từ 1,0 đến 4,0 mm.....	111
Hình 4.18. (a) Minh họa góc phân cực sóng điện từ φ , (b) Ảnh hưởng của góc phân cực lên phổ hấp thụ của vật liệu.	111
Hình 4.19. (a) Minh họa góc tới θ , (b) ảnh hưởng của góc tới lên phổ hấp thụ của vật liệu dưới sóng điện từ phân cực TE.	112
Hình 4.20. Phân bố dòng điện bề mặt tại tần số (a) 3,7 GHz và (b) 7,5 GHz dưới sóng phân cực TE.	113
Hình 4.21. (a) Minh họa góc tới θ và (b) ảnh hưởng của góc tới lên phổ hấp thụ của vật liệu dưới sóng điện từ phân cực TM.	113
Hình 4.22. Phân bố dòng điện bề mặt tại tần số (a) 3,7 GHz và (b) 7,5 GHz dưới sóng phân cực TM.	114
Hình 4.23. (a) Cấu hình uốn cong và (b) định nghĩa bán kính uốn R của H-MPA	115
Hình 4.24. Phổ hấp thụ (a) mô phỏng và (b) thực nghiệm của H-MPA với bán kính uốn giảm dần từ $R = \infty$ (trạng thái phẳng) đến $R = 200$ mm.	115
Hình 4.25. Phân bố dòng điện bề mặt khi $R = 300$ mm tại (a) 7,43 GHz và (b) 7,6 GHz	116

MỞ ĐẦU

Vật liệu hấp thụ sóng điện từ là vật liệu được lựa chọn hoặc thiết kế đặc biệt có thể triệt tiêu hoặc giảm thiểu đồng thời sự phản xạ và truyền qua của bức xạ điện từ. Khi đề cập đến vật liệu hấp thụ điện từ, chúng ta có thể dễ dàng liên tưởng khái niệm này với công nghệ tàng hình trong lĩnh vực quân sự. Được đề xuất lần đầu tiên vào những năm 1950, công nghệ tàng hình đã phát triển mạnh mẽ và ứng dụng rộng rãi trong cả lĩnh vực quân sự và dân dụng. Vật liệu hấp thụ lý tưởng ứng dụng trong thực tế phải có các đặc tính như độ hấp thụ cao, dải tần hấp thụ rộng, mỏng và nhẹ. Tuy nhiên, các vật liệu hấp thụ truyền thống như màn hình Salisbury (Salisbury screen), bộ hấp thụ Jauman, màn hình Dallenbach (Dallenbach screen) ... thường khó đạt được các đặc tính này. Do cơ chế hoạt động, các vật liệu hấp thụ này thường có độ dày ít nhất bằng một phần tư bước sóng. Do đó, kích thước và khối lượng của chúng trở nên lớn hơn ở dải bước sóng dài (chẳng hạn như vùng vi sóng), dẫn đến khó đáp ứng được yêu cầu của các thiết bị hấp thụ nhẹ và kích thước nhỏ.

Song song với nỗ lực tìm kiếm các vật liệu mới, tiên tiến, việc tạo ra các vật liệu nhân tạo trong đó có vật liệu biến hóa (Metamaterials - MMs) với các đặc tính điện từ mới lạ là một bước tiến quan trọng, mở ra nhiều lĩnh vực nghiên cứu mới và nhận được sự quan tâm to lớn từ các nhà khoa học. MMs có cấu tạo gồm các phần tử có kích thước nhỏ hơn bước sóng hoạt động – được gọi là cấu trúc cộng hưởng, được sắp xếp theo quy luật tuần hoàn [1]. Khác với các vật liệu tự nhiên, MMs có độ từ thẩm và độ điện thẩm có thể điều chỉnh được một cách chủ động bằng cách thay đổi hình dạng hoặc kích thước của các cấu trúc cộng hưởng. Điều này làm cho MMs có được các đặc tính điện từ đặc biệt, không tồn tại trong các vật liệu tự nhiên, bao gồm chiết suất âm, trong suốt cảm ứng điện từ [2,3], truyền qua bất thường [4], hiệu ứng Doppler ngược [5] ... Từ các đặc tính điện từ đó, một số ứng dụng quan trọng của MMs đã được các nhà nghiên cứu đề xuất, điển hình là siêu thấu kính [6,7], áo choàng tàng hình [8], và đặc biệt là hấp thụ sóng điện từ [9] ...

Vật liệu biến hóa hấp thụ mạnh sóng điện từ (Metamaterial perfect absorber - MPA) được Landy và cộng sự đề xuất và chứng minh bằng thực nghiệm lần đầu tiên vào năm 2008 [9]. MPA có ưu điểm là kích thước ô cơ sở nhỏ hơn bước sóng hấp thụ, độ hấp thụ cao, dải tần hấp thụ có thể điều chỉnh được. Do đó, MPA được quan tâm nghiên cứu cho nhiều ứng dụng liên quan đến hấp thụ sóng điện từ, từ lĩnh vực dân dụng đến quân sự trong các vùng tần số khác nhau [10-12]. Ngày nay, sự phát triển các công nghệ hiện đại của AI (trí tuệ nhân tạo), học máy, 5G/6G và IoT (internet vạn vật) đòi hỏi phát triển MPA phù hợp cho công nghệ nhiều đầu vào và nhiều đầu ra (multiple-input and multiple-output - MIMO) trong truyền thông không dây, hoạt

động ở các vùng tần số thấp, từ băng tần VHF đến băng tần X (tần số từ 0,03 GHz đến 12 GHz) [13]. Các MPA này được nghiên cứu nhằm tiến tới các ứng dụng đầy hứa hẹn trong thu năng lượng [14], hệ thống UHF-RFID [15,16], thiết bị Wi-Fi cho liên lạc 4G [17], thiết bị đeo được [18], thông tin vệ tinh, viễn thông vô tuyến đường dài và các kênh không dây tốc độ cao [19] ... Bên cạnh vùng tần số GHz, MPA hoạt động trong các vùng tần số THz cũng được quan tâm nghiên cứu ngày càng mạnh mẽ cho nhiều ứng dụng thực tiễn như cảm biến khí [20,21], nâng cao hiệu suất quang học trong các ứng dụng của bộ phát nhiệt hồng ngoại, hình ảnh, bộ tách sóng, các thiết bị nhiệt điện tử ... [22-24].

Nghiên cứu về vật liệu biến hóa nói chung và vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ nói riêng đã được triển khai tại Viện Khoa học vật liệu từ năm 2009 và đã thu được nhiều kết quả khoa học quan trọng. Các kết quả này đã được công bố trên các tạp chí quốc tế, các tạp chí chuyên ngành trong nước và các hội thảo khoa học uy tín [25-29]. Đồng thời trong khoảng thời gian triển khai nghiên cứu, nhiều đề tài, luận án về MMs đã được thực hiện. Năm 2015, TS. Đỗ Thành Việt đã thực hiện luận án Tiến sĩ, tối ưu hóa cấu trúc và nâng cao hiệu suất hấp thụ của vật liệu bằng cách mở rộng dải tần hấp thụ trong vùng vi sóng (2-20 GHz) [30]. Cũng trong năm 2015, luận án nghiên cứu về MMs lai hóa có chiết suất âm ở vùng GHz đã được TS. Nguyễn Thị Hiền hoàn thành và bảo vệ thành công [31]. Tiếp theo đó, năm 2017, TS. Phạm Thị Trang đã hoàn thành luận án nghiên cứu mở rộng dải tần hoạt động của vật liệu và vật liệu có tính đối xứng cao, hấp thụ đẳng hướng sóng điện từ [32]. Nguyên lý, cơ chế của MPA hoạt động với băng tần rộng trong vùng tần số GHz đã được thực hiện bởi TS. Đinh Hồng Tiếp [33]. Năm 2018, TS. Đặng Hồng Lưu đã thực hiện luận án về MPA hoạt động trong vùng tần số THz, tạo tiền đề cho những nghiên cứu tiếp theo về MPA hoạt động trong vùng tần số cao [34]. Gần đây nhất, năm 2022, TS. Trần Văn Huỳnh đã hoàn thành luận án tiến sĩ nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ đẳng hướng của MMs trên cơ sở kết hợp với Graphene [35]. Bên cạnh việc triển khai nghiên cứu thành công tại Viện Khoa học vật liệu, hướng nghiên cứu về MMs còn được mở rộng triển khai tại nhiều nhóm nghiên cứu khác trong nước, ví dụ như nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Trần Mạnh Cường, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội; nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Nguyễn Thị Quỳnh Hoa, Trường Đại học Vinh; nhóm nghiên cứu của TS. Lê Minh Thùy, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội; nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Lê Đắc Tuyên, Đại học Mỏ địa chất; nhóm nghiên cứu của TS. Lê Văn Quỳnh, VinUni. Các hướng nghiên cứu chính được thực hiện bao gồm tối ưu hóa cấu trúc cộng hưởng theo hướng đơn giản, dễ chế tạo; cải tiến/mở rộng vùng tần

số hoạt động của vật liệu nhằm thu được MPA đa đỉnh hoặc dải rộng; điều khiển chủ động đặc tính hấp thụ của vật liệu bằng các tác động ngoại vi ...

Với bài toán cải tiến/mở rộng băng tần hoạt động của MPA, các nghiên cứu đã đề xuất phương pháp để mở rộng băng tần của MPA, điển hình như thiết kế các MPA có cấu trúc đa lớp bao gồm nhiều cấu trúc cộng hưởng được xếp chồng lên nhau; sử dụng cấu trúc đơn lớp với siêu ô cơ sở bao gồm các cấu trúc cộng hưởng có kích thước/hình dạng khác nhau (sắp xếp đồng phẳng) [36,37]; tích hợp các linh kiện như điện trở, đi ốt, tụ điện [38,39]... Các MPA được thiết kế theo các phương pháp này có sự tương tác giữa các cấu trúc thường phức tạp, quá trình thực nghiệm gặp nhiều khó khăn. Đồng thời chúng có kích thước ô cơ sở và khối lượng lớn, nên sẽ xuất hiện một số hạn chế ứng dụng trong trường hợp yêu cầu vật liệu MPA kích thước nhỏ và nhẹ. Để khắc phục hạn chế này, MPA băng tần kép hoặc đa băng tần dựa trên cộng hưởng bậc cao đã được đề xuất và nghiên cứu tích cực về lý thuyết và thực nghiệm. Vật liệu MPA hấp thụ băng tần kép dựa trên cộng hưởng từ bậc cao đã được quan sát thấy trong một số cấu trúc cộng hưởng khác nhau như dạng đĩa tròn bị cắt [40], vòng cộng hưởng hình tròn [41] và cặp dây bị cắt (CWP) [32,42]. MPA cộng hưởng bậc cao hấp thụ đa đỉnh có tiềm năng ứng dụng trong bộ lọc tần số, thu năng lượng. Đặc biệt mode cộng hưởng bậc cao thường nhạy với điều kiện môi trường hơn so với mode cơ bản nên có thể ứng dụng làm tăng độ nhạy của cảm biến. Bên cạnh việc hỗ trợ để có được đặc tính đa băng tần, cộng hưởng bậc cao còn tạo ra MPA hoạt động ở thang tần số cao hơn, điều này có thể cho phép chế tạo MPA hoạt động trong vùng quang học, đây là giải pháp hiệu quả để thay thế cho các kỹ thuật chế tạo phức tạp và đắt tiền hiện nay. Cộng hưởng bậc cao trong MPA đã được quan sát thấy và khảo sát. Tuy nhiên, vấn đề cơ chế của cộng hưởng bậc cao, khả năng hoạt động ổn định/điều khiển chủ động của cộng hưởng bậc cao vẫn cần được nghiên cứu và làm rõ.

Bên cạnh yêu cầu mở rộng băng tần hoạt động, nghiên cứu chế tạo và đặc trưng điện từ của MPA có tính năng đàn hồi đang được quan tâm và nghiên cứu mạnh mẽ trong thời gian gần đây [43-46]. Phần lớn MPA truyền thống được chế tạo từ các vật liệu có dạng phẳng và rắn nên khó thay đổi hình dạng sau khi đã gia công. Điều này làm cho chúng khó có thể bao phủ hoặc tích hợp lên vật thể thực tế (thường có các bề mặt cong phức tạp). Đặc biệt, do không đàn hồi, hầu hết các MPA này cũng hạn chế về các bậc tự do trong việc điều khiển/đảm bảo hiệu suất hấp thụ cao dưới sự phân cực của sóng điện từ. Do đó, việc nghiên cứu trang bị cho MPA có tính năng linh hoạt/đàn hồi nhằm tăng cường khả năng ứng dụng của vật liệu này trong thực tế, đặc biệt là trong lĩnh vực quân sự là một trong những yêu cầu cấp thiết hiện nay. Tuy

nhiên, đặc trưng điện từ của các MPA có tính năng đàn hồi vẫn còn nhiều vấn đề cần nghiên cứu làm rõ, đặc biệt là tương tác giữa các ô cơ sở và cộng hưởng bậc cao ở trạng thái bị bẻ cong. Do đó, luận án sẽ giải quyết bài toán thiết kế các MPA đa đỉnh, có tính năng đàn hồi, với độ hấp thụ cao được duy trì tốt ở cả hai trạng thái phẳng và uốn cong, sử dụng cộng hưởng bậc cao của cấu trúc cộng hưởng.

Mặc dù MPA có cộng hưởng bậc cao và MPA có tính năng đàn hồi đã được quan tâm nghiên cứu bởi các nhóm nghiên cứu trong và ngoài nước, nhưng vẫn còn một số vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu và làm rõ, bao gồm:

- i) Cơ chế của cộng hưởng bậc cao.
- ii) Khả năng hoạt động ổn định/ điều khiển của cộng hưởng bậc cao.
- iii) Đặc trưng của cộng hưởng bậc cao trong MPA đàn hồi, ở các trạng thái đàn hồi khác nhau.

Với các ưu điểm của cộng hưởng bậc cao được bàn luận ở trên, luận án tập trung làm rõ cơ chế của cộng hưởng bậc cao trong MPA, hướng tới thiết kế, chế tạo MPA có cộng hưởng bậc cao hoạt động ổn định hoặc có khả năng điều khiển chủ động và khảo sát hiệu ứng cộng hưởng bậc cao trong MPA đàn hồi. Đây là một trong những hướng nghiên cứu quan trọng trong quá trình hiện thực hóa các tiềm năng ứng dụng của MPA.

Mục tiêu nghiên cứu của luận án:

- Làm rõ cơ chế hoạt động của các MPA có hiệu ứng cộng hưởng bậc cao và có tính năng đàn hồi.
- Thiết kế, chế tạo thành công các MPA đa băng tần sử dụng hiệu ứng cộng hưởng từ bậc cao và MPA đàn hồi hoạt động trong vùng tần số thấp (từ 0,1 đến 12 GHz).
- Áp dụng các mô hình tối ưu để thiết kế MPA cộng hưởng bậc cao có tính năng đàn hồi hoạt động ở vùng tần số THz.

Đối tượng nghiên cứu của luận án: Đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa cộng hưởng bậc cao, có tính năng đàn hồi.

Phương pháp nghiên cứu của luận án: Các kết quả của luận án nhận được bằng việc kết hợp chặt chẽ các phương pháp nghiên cứu bao gồm mô phỏng, mô hình tính toán lý thuyết, thực nghiệm chế tạo mẫu và đo đạc đặc trưng điện từ của mẫu vật liệu chế tạo được.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án: Luận án trình bày tổng quan các vấn đề liên quan đến MPA có cộng hưởng bậc cao và có tính năng đàn hồi bao gồm: lý thuyết cộng hưởng bậc cao, cơ chế hấp thụ sóng điện từ và các đặc tính điện từ của một số cấu trúc MPA có hiệu ứng cộng hưởng bậc cao. Đặc biệt, nội dung của luận

án đã trình bày các kết quả khoa học mới quan trọng của nghiên cứu sinh và tập thể nhóm nghiên cứu về MPA có hiệu ứng cộng hưởng bậc cao và có tính năng đàn hồi. Các kết quả khoa học này được phân tích, so sánh với các kết quả nghiên cứu có liên quan của các nhóm nghiên cứu khác, và được công bố trên các tạp chí chuyên ngành chất lượng tốt, có phản biện. Kết quả nghiên cứu của luận án có thể góp phần mở rộng tiềm năng ứng dụng của MMs trong nhiều lĩnh vực như quân sự quốc phòng, y tế và dân sự, ... Ngoài ra, luận án là tài liệu tham khảo hữu ích cho nghiên cứu sinh và học viên cao học nghiên cứu về MMs nói chung và MPA nói riêng.

Những đóng góp mới của luận án: Luận án đã tập trung giải quyết các vấn đề về vật liệu MPA có hiệu ứng cộng hưởng bậc cao và tính năng đàn hồi, bao gồm:

i) Luận án đã làm rõ cơ chế hoạt động của các MPA có hiệu ứng cộng hưởng bậc cao và MPA có tính năng đàn hồi.

ii) Luận án đã thiết kế, chế tạo thành công một số H-MPA đa băng tần sử dụng hiệu ứng cộng hưởng từ bậc lẻ (bậc ba và bậc năm) hoạt động trong các băng tần khác nhau, từ băng tần VHF (0,03 – 0,30 GHz) đến băng tần S (2,0 – 4,0 GHz) với độ hấp thụ trên 90%. Thiết kế và chế tạo thành công một số cấu trúc H-MPA đàn hồi hoạt động trong băng tần C (4,0 – 8,0 GHz) và X (8,0 – 12,0 GHz) có hiệu ứng cộng hưởng từ bậc hai, khi cấu trúc ở trạng thái uốn cong.

iii) Luận án đã mở rộng nghiên cứu một số cấu trúc H-MPA hoạt động trên vùng tần số cao hơn (THz) để làm rõ sự phụ thuộc phổ hấp thụ vào trạng thái đàn hồi. Khi vật liệu ở trạng thái phẳng, có hai đỉnh hấp thụ: đỉnh cơ bản tại 34,9 THz, độ hấp thụ 96% và đỉnh bậc ba tại 97,2 THz, độ hấp thụ 99,2%. Khi uốn cong với bán kính uốn 5 μm , xuất hiện đỉnh cộng hưởng bậc hai tại 54,5 THz với độ hấp thụ khoảng 80%.

Cấu trúc của luận án: Ngoài phần Mở đầu, Kết luận và Tài liệu tham khảo, Luận án được chia thành 4 chương như sau:

Chương 1: Tổng quan về vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ cộng hưởng bậc cao và đàn hồi

Chương 2: Phương pháp nghiên cứu

Chương 3: Đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa cộng hưởng từ bậc lẻ.

Chương 4: Đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa cộng hưởng từ bậc chẵn có tính năng đàn hồi.

Chương 1. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU BIẾN HÓA HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CỘNG HƯỞNG BẬC CAO VÀ ĐÀN HỒI

Với mục đích làm rõ lý do chọn đề tài và mục đích nghiên cứu của luận án, chương 1 trình bày tổng quan về vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ cộng hưởng bậc cao và đàn hồi. Cụ thể, nội dung của chương 1 tập trung trình bày một số hướng nghiên cứu về vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ đang được quan tâm nghiên cứu hiện nay, lý thuyết cộng hưởng bậc cao, đặc trưng điện từ của một số MPA có cộng hưởng bậc cao và một số MPA có tính năng đàn hồi. Từ đó một số tồn tại liên quan đến cộng hưởng bậc cao trong MPA và MPA đàn hồi được làm rõ, đồng thời có thể lựa chọn được vật liệu điện môi phù hợp để tiến đến thiết kế, chế tạo MPA cộng hưởng bậc cao và có tính năng đàn hồi.

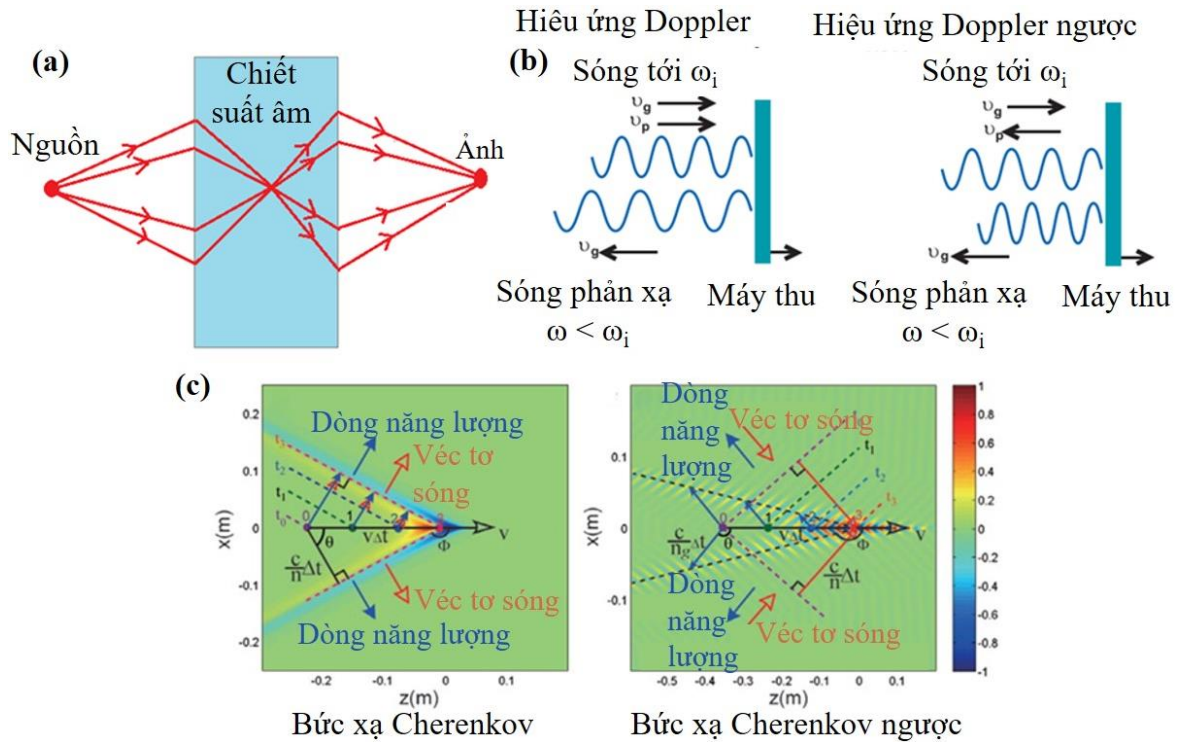
1.1. Tổng quan về vật liệu biến hóa hấp thụ mạnh sóng điện từ (MPA)

1.1.1. Lịch sử hình thành và phát triển của MPA

Cho đến nay, việc kiểm soát, điều khiển ánh sáng, điện và nhiệt đã được phát triển và trở thành nền tảng của nhiều cải tiến trong công nghệ điện và điện tử. Công nghệ truyền thông không dây, laser và máy tính đều đạt được bằng cách thay đổi cách ánh sáng và các dạng năng lượng khác hoạt động, cũng như điều khiển chúng một cách có kiểm soát. Ở cấp độ nano, để kiểm soát, điều khiển ánh sáng và nhiệt, các kỹ thuật chế tạo cấu trúc nano hoàn thiện đã được phát triển trong hai thập kỷ qua và đã đạt được một loạt kết quả mang tính đột phá [47,48]. Tinh thể quang tử nhân tạo và công nghệ nano là những lĩnh vực chính mà những kỹ thuật này đã được áp dụng thành công. Song song với kết quả đó, ngành khoa học vật liệu mới đã được hình thành và phát triển mạnh mẽ có tên gọi là vật liệu biến hóa hay siêu vật liệu điện từ (Metamaterials-MMs).

MMs được định nghĩa là vật liệu có cấu trúc nhân tạo, được tạo bởi các ô cơ sở là các cấu trúc cộng hưởng điện từ, được sắp xếp tuần hoàn hoặc không tuần hoàn tùy theo hiệu ứng mong đợi. Khác với tinh thể quang tử, kích thước ô cơ sở của MMs nhỏ hơn nhiều lần bước sóng hoạt động của vật liệu. Bên cạnh đó, tính chất điện từ của MMs không chỉ phụ thuộc vào thành phần hóa học mà còn phụ thuộc vào các thông số hình học và cách sắp xếp của cấu trúc cộng hưởng. Do đó, bằng cách thay đổi hình dạng, kích thước của cấu trúc cộng hưởng hoặc quy luật sắp xếp của các ô cơ sở một cách thích hợp, có thể thu được MMs với các tính chất điện từ mong muốn, đặc biệt là các đặc tính điện từ mới lạ, không tìm thấy trong các vật liệu tự nhiên như

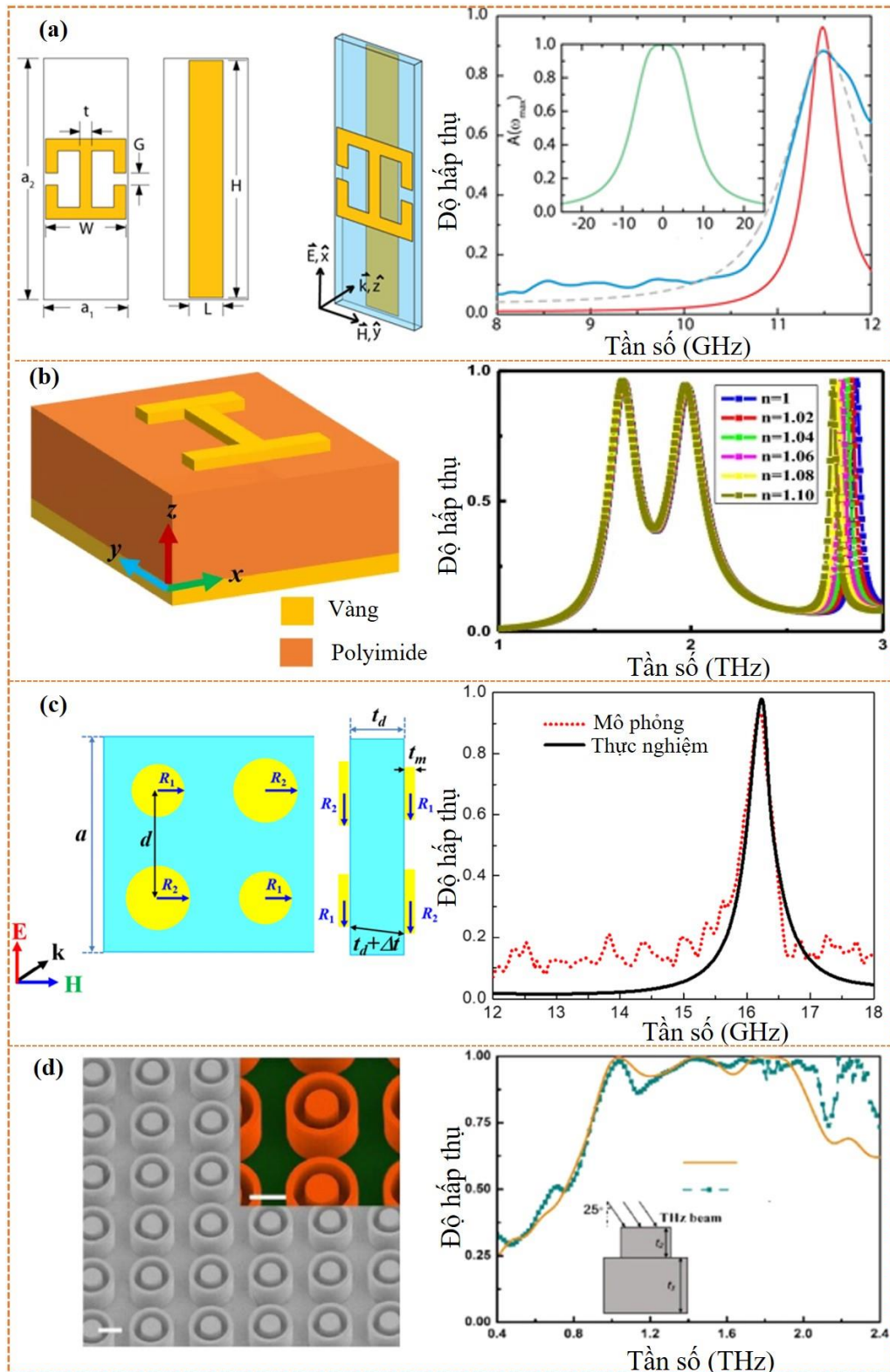
chiết suất âm [3], nghịch đảo hiệu ứng Doppler [5], hiệu ứng Cherenkov ngược [49,50]... (Hình 1.1).



Hình 1.1. Các hiện tượng trực quan đối với siêu vật liệu: (a) định luật khúc xạ Snell ngược [3], (b) hiệu ứng Doppler ngược [5] và (c) bức xạ Cherenkov ngược [49].

MMs có chiết suất âm lần đầu tiên được đề xuất bằng nghiên cứu lý thuyết bởi Veselago, nhà khoa học người Nga, vào năm 1968, trong đó giải thích rằng có thể tồn tại vật liệu có độ điện thẩm và độ từ thẩm đồng thời có giá trị âm trong cùng một khoảng tần số [51]. Tuy nhiên, tại thời điểm đó, nghiên cứu của ông đã không thu hút được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học vì chưa có nghiên cứu thực nghiệm hoặc vật liệu tự nhiên nào chứng minh được sự tồn tại của tính chất này. Đến năm 1996, một vật liệu nhân tạo có cấu trúc bao gồm lưới dây kim loại được Pendry và cộng sự chứng minh là có độ điện thẩm âm [52]. Đồng thời, nhóm nghiên cứu này cũng đề xuất một vật liệu có độ từ thẩm âm với cấu trúc bao gồm các vòng cộng hưởng có rãnh (SRR) sắp xếp tuần hoàn [53]. Sau đó, năm 2000, MMs có chiết suất âm đã được chứng minh bằng thực nghiệm lần đầu tiên bởi Smith và cộng sự [54]. Vật liệu này được cấu tạo từ lưới dây kim loại và cấu trúc SRR (hai cấu trúc do nhóm nghiên cứu của Pendry đề xuất trước đó) được sắp xếp một cách thích hợp. Từ khi được chứng minh bằng thực nghiệm, một loạt các ứng dụng quan trọng của vật liệu MMs đã được đề xuất như siêu thấu kính [55-57], cảm biến [58,59], bộ lọc tần số [10,12,60] ... Với các tiềm năng ứng dụng to lớn này, vật liệu biến hóa ngày càng được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu với nhiều hướng khác nhau bao gồm

ngiên cứu lý thuyết, thực nghiệm và ứng dụng. Gần đây, một hướng nghiên cứu quan trọng của MMs thu hút được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học, đó là vật liệu biến hóa hấp thụ mạnh sóng điện từ - MPA, với độ hấp thụ đạt trên 90%.



Hình 1.2. Cấu trúc và phổ hấp thụ của (a) MPA đầu tiên được đề xuất [9], (b) MPA có cấu trúc cộng hưởng dạng chữ I [61], (c) MPA đẳng hướng hai chiều [62], (d) MPA điện môi [63].

MPA được đề xuất lần đầu tiên bởi Landy vào năm 2008 với thiết kế gồm ba lớp: trên cùng là các cấu trúc cộng hưởng bao gồm hai SRR được làm từ kim loại nối với nhau, dưới cùng là một lớp kim loại liên tục và ở giữa là điện môi làm từ FR-4 [Hình 1.2(a)] [9]. Khi tương tác với sóng điện từ, cộng hưởng điện được tạo ra bởi vòng cộng hưởng kim loại, trong khi đó cộng hưởng từ được tạo ra bởi sự kết hợp giữa hai thanh kim loại song song: thanh kim loại ở giữa của cấu trúc cộng hưởng ở mặt trên và một thanh kim loại ở mặt dưới của tấm điện môi. Với thiết kế như vậy, tương tác điện - từ có thể được điều chỉnh một cách độc lập bằng cách thay đổi kích thước của thanh kim loại ở mặt dưới, hoặc thay đổi khoảng cách giữa thanh kim loại với cấu trúc cộng hưởng điện thông qua việc thay đổi độ dày lớp điện môi. Việc thay đổi này không làm ảnh hưởng đến cấu trúc cộng hưởng điện ở mặt trên, do đó có thể tách rời độ điện thẩm (ϵ) và độ từ thẩm (μ), điều khiển từng cộng hưởng một cách độc lập. Kết quả là có thể điều chỉnh tần số cộng hưởng điện và cộng hưởng từ để thỏa mãn điều kiện phối hợp trở kháng ($\epsilon = \mu$), nhằm triệt tiêu thành phần phản xạ. Trong mô phỏng, độ dày lớp điện môi được tối ưu là 0,65 mm và kết quả cho thấy độ phản xạ đạt cực tiểu (0,01%) tại tần số $\omega_0 = 11,65$ GHz, độ truyền qua đạt cực tiểu tại lân cận ω_0 . Độ hấp thụ được tính bởi $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$, với $R(\omega)$ và $T(\omega)$ lần lượt là độ phản xạ và độ truyền qua. Từ đó tính được độ hấp thụ đạt giá trị khoảng 99% tại ω_0 . MPA đề xuất đã được chế tạo trên tấm điện môi FR-4. Để đạt được độ hấp thụ cao, ba tấm FR-4 có độ dày 0,2 mm đã được ghép lại với nhau bởi một lớp keo dày 0,06 mm. Kết quả là khoảng cách giữa hai cấu trúc cộng hưởng tại mặt trước và mặt sau lúc này tăng lên 0,72 mm. Kết quả thực nghiệm và mô phỏng cho trường hợp này được biểu diễn trên Hình 1.2(a). Cả phổ hấp thụ mô phỏng và thực nghiệm đều có một đỉnh hấp thụ tại 11,5 GHz, tuy nhiên độ hấp thụ mô phỏng đạt 96% trong khi độ hấp thụ thực nghiệm chỉ đạt 88%. MPA này thể hiện phổ hấp thụ dải hẹp với độ rộng tương đối (FBW) là 4%.

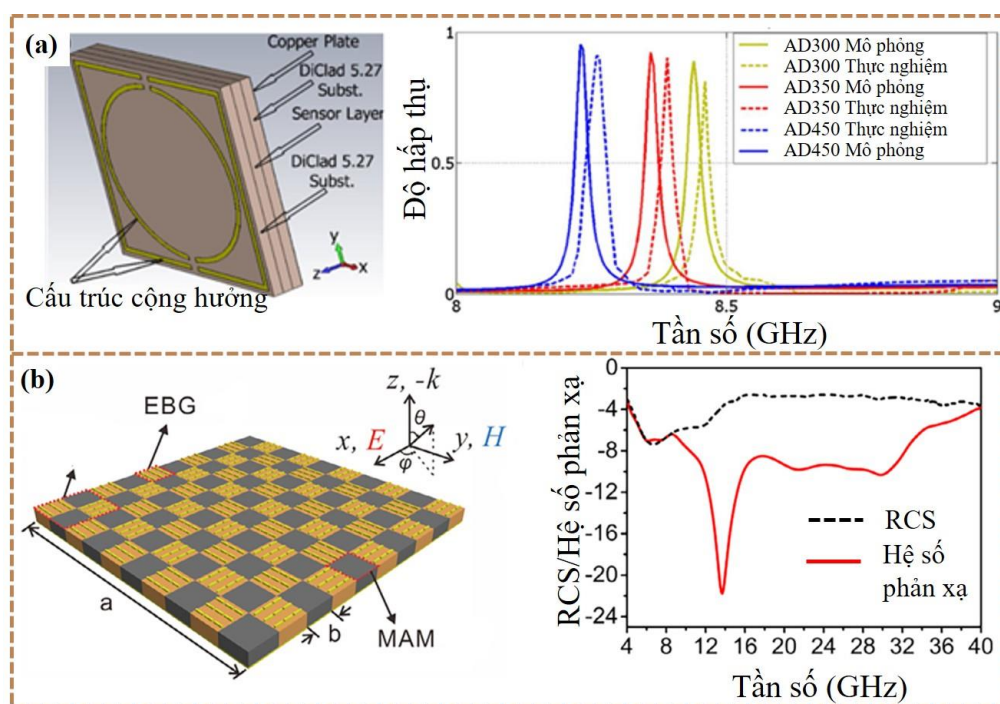
Sau khi MPA đầu tiên được đề xuất và chứng minh bằng thực nghiệm bởi Landy và cộng sự, nghiên cứu về vật liệu hấp thụ sóng điện từ dựa trên MMs được quan tâm và phát triển mạnh mẽ với nhiều hướng nghiên cứu khác nhau. Cấu trúc cộng hưởng của MMs được cải tiến theo hướng đơn giản, dễ chế tạo đồng thời có những đặc trưng điện từ mong muốn. Từ cấu trúc của Landy, MPA đã được cải tiến gồm ba lớp, lớp trên cùng được cấu tạo bởi các cấu trúc cộng hưởng kim loại sắp xếp tuần hoàn với một chu kỳ xác định, ở giữa và dưới cùng lần lượt là lớp điện môi và lớp kim loại liên tục. Sau đó, các cấu trúc cộng hưởng đã được thiết kế với nhiều hình dạng khác nhau như dạng đĩa tròn [11,41,64], vòng cộng hưởng có rãnh [43,65], vòng cộng hưởng kín [37,66], cấu trúc dạng thanh [67,68], ... Lớp kim loại liên tục ở dưới

có tác dụng triệt tiêu phần sóng điện từ truyền ra khỏi vật liệu, tuy nhiên sự có mặt của lớp kim loại này làm cho MPA chỉ có thể hấp thụ sóng điện từ theo một hướng từ trên xuống dưới mà không thể hấp thụ sóng điện từ theo chiều ngược lại. Do đó, các MPA có cấu trúc đẳng hướng có thể hấp thụ sóng điện từ theo cả hai chiều đã được nghiên cứu [62]. Trong các cấu trúc này, cả mặt trên và mặt dưới của MPA đều bao gồm các cấu trúc cộng hưởng bằng kim loại [Hình 1.2(c)]. Các cấu trúc này cũng được tối ưu nhằm thu được hiệu suất hấp thụ cao khi sóng điện từ truyền tới theo cả hai chiều.

Mặc dù MPA có cấu trúc kim loại - điện môi - kim loại được chứng minh là cho hiệu suất hấp thụ cao, có khả năng điều chỉnh tính chất hấp thụ linh hoạt, nhưng nó cũng gặp phải một số hạn chế do sự tồn tại của cấu trúc kim loại, chẳng hạn như tổn thất Ohmic cao, độ dẫn nhiệt cao và điểm nóng chảy thấp [69]. Do đó, các MPA có cấu trúc hoàn toàn điện môi đã được đề xuất [63,70] [Hình 1.2(d)]. MPA hoàn toàn điện môi được làm từ các điện môi có độ ổn định nhiệt độ tốt, giảm tỏa nhiệt Joule, có tiềm năng ứng dụng trong lĩnh vực thu năng lượng, hình ảnh và cảm biến. Hướng nghiên cứu thứ hai được kể đến là cải tiến băng tần hoạt động của MPA từ hấp thụ một băng tần, dải hẹp đến hấp thụ nhiều băng tần và hấp thụ băng tần rộng. Các phương pháp hiệu quả để đạt được hấp thụ đa băng tần hoặc băng tần rộng bao gồm sắp xếp các cấu trúc cộng hưởng đồng phẳng hoặc thiết kế các MPA có cấu trúc dạng đa lớp, hoặc tích hợp các linh kiện như điện trở, tụ điện, điốt vào vật liệu ...

Bên cạnh các hướng nghiên cứu kể trên, việc thay đổi vùng tần số hoạt động của MPA đã được quan tâm nghiên cứu, từ tần số GHz đến các vùng tần số thấp hơn như MHz và vùng tần số cao hơn như THz, vùng hồng ngoại và quang học. Trong những năm gần đây, các MPA trong dải tần THz, hồng ngoại và quang học đã thu hút được nhiều sự quan tâm nghiên cứu do tiềm năng ứng dụng mạnh mẽ của nó trong cảm biến, phát hiện, bộ tách sóng quang và hình ảnh. Hình 1.2(d) minh họa cấu trúc MPA dải rộng trong vùng THz. Vật liệu này có cấu trúc cộng hưởng gồm các vòng và các đĩa hình trụ làm bằng điện môi. Kết quả nghiên cứu cho thấy MPA đề xuất đạt được độ hấp thụ hơn 90% trong phạm vi từ 0,95 đến 2,0 THz. Các đỉnh hấp thụ ở 1,03, 1,45 và 1,77 THz có độ hấp thụ gần bằng 100%. Các kết quả nghiên cứu chứng tỏ rằng MPA này có tiềm năng ứng dụng cho cảm biến phát hiện sự hiện diện của thuốc trừ sâu dạng vết trong phân tích hấp phụ [63]. Nhóm nghiên cứu của Y. Zhou và cộng sự đã tối ưu MPA băng tần siêu rộng hoạt động trong dải bước sóng từ vùng hồng ngoại bước sóng dài đến bước sóng rất dài (8–30 μm) [22]. Đầu tiên, dựa trên cấu trúc ba lớp Ti/Ge/Ti, nhóm nghiên cứu đã nhận được MPA băng thông rộng từ 8 đến 12 μm . Sau đó, dựa trên cấu trúc Ti/Ge/Si₃N₄/Ti, sử dụng tương tác cộng hưởng

plasmon bề mặt và sự hấp thụ nội tại của vật liệu tổn hao Si₃N₄, MPA này đạt độ hấp thụ gần 95% trong khoảng từ 8 đến 14 μm (kết quả thực nghiệm: 78% từ 6,5 đến 13,5 μm). Để mở rộng băng tần hấp thụ, nhóm nghiên cứu đã đề xuất thêm hai cấu trúc Ti/Si/SiO₂/Ti có thể hấp thụ 92% và 87% trong dải quang phổ 14–30 μm và 8–30 μm tương ứng. Nghiên cứu này đã thiết lập cách tiếp cận mới, có hệ thống để thiết kế các MPA có khả năng hấp thụ băng thông rộng và mở đường cho việc nâng cao hiệu suất quang học trong các ứng dụng của bộ phát nhiệt hồng ngoại, hình ảnh và bộ tách sóng quang [22].



Hình 1.3. Cấu trúc MPA được đề xuất cho các ứng dụng (a) cảm biến [73], (b) RCS [77].

Với các ưu điểm như kích thước nhỏ gọn, hiệu suất hấp thụ cao và có thể điều chỉnh một cách linh hoạt, MPA được đánh giá cao cho nhiều ứng dụng thực tế như cảm biến [71-74], giảm tiết diện phản xạ của ra-đa [75-77]... M. Bakir và cộng sự đã đề xuất một MPA có thể hoạt động ở vùng vi sóng và rất hữu ích trong các ứng dụng cảm biến, bao gồm cảm biến áp suất, nhiệt độ và độ ẩm [73]. MPA này có cấu trúc cộng hưởng được thiết kế gồm hai vòng cộng hưởng có rãnh dạng hình tròn và hình vuông được sắp xếp lồng vào nhau. Các vòng cộng hưởng được làm bằng kim loại đồng đặt lên trên một lớp điện môi làm từ DiClad 5.27 có độ dày 1,6 mm, hằng số điện môi 2,50 và tổn hao điện môi là 0,0002. Giữa hai lớp điện môi là lớp vật liệu cảm biến [Hình 1.3(a)]. Tính chất điện từ của cấu trúc đề xuất khi thay đổi vật liệu ở lớp cảm biến được khảo sát cả bằng thực nghiệm và mô phỏng. Độ dày của lớp cảm

biến là 1,6 mm, ba vật liệu khác nhau là Arlon AD300, Arlon AD350 và Arlon AD450 được sử dụng. Các kết quả thực nghiệm và mô phỏng được trình bày trong Hình 1.3 (a). Tần số cộng hưởng lần lượt là 8,44, 8,36, 8,23 GHz cho AD300, AD350 và AD450. Khi sử dụng vật liệu loại AD450 trong lớp cảm biến, độ hấp thụ có giá trị lớn nhất là 97%. Hằng số điện môi của AD300, AD350 và AD450 lần lượt là 3,0, 3,5, 4,5. Có thể thấy khi hằng số điện môi của vật liệu được sử dụng trong lớp cảm biến tăng từ 3,0 đến 3,5 thì đỉnh cộng hưởng sẽ bị dịch chuyển về phía tần số thấp. Tổng độ dịch chuyển tần số cộng hưởng là khoảng 210 MHz. Như vậy, MPA đề xuất có tính chất hấp thụ nhạy với sự thay đổi của hằng số điện môi, cho thấy tiềm năng ứng dụng trong cảm biến của vật liệu này.

Trong nhiều ứng dụng quân sự, chẳng hạn như giảm tiết diện phản xạ ra-đa (Radar cross section - RCS), thiết bị che giấu và máy dò cảm biến, vật liệu hấp thụ mạnh sóng điện từ là một ứng cử viên tiềm năng. Tuy nhiên, hầu hết các kỹ thuật (chẳng hạn như cấu trúc hấp thụ hình nêm và hình chóp, hấp thụ đa cộng hưởng) đều có hạn chế về kích thước lớn của thiết bị khi hoạt động ở tần số thấp, băng thông và hiệu suất hấp thụ. Vì vậy, W. Li và cộng sự [77] đã thiết kế và chế tạo một MPA ứng dụng cho giảm tiết diện phản xạ của ra-đa [Hình 1.3(b)]. Các kết quả nghiên cứu cho thấy, cấu trúc đề xuất có độ giảm tiết diện phản xạ ra-đa tới 6dB trong băng tần rộng 5-34 GHz với độ dày của cấu trúc là 2 mm.

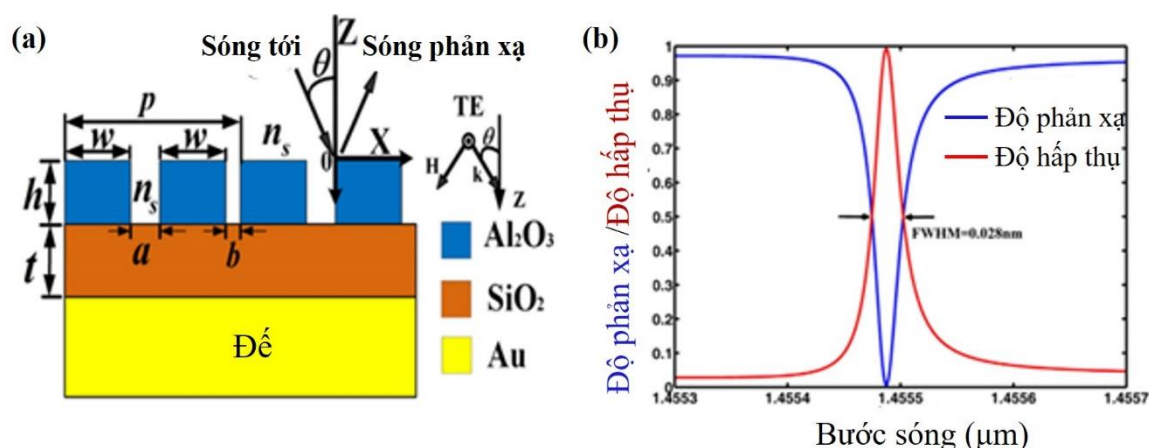
1.1.2. Phân loại MPA

Dựa trên băng tần hoạt động của MPA, chúng có thể được phân loại thành MPA đơn đỉnh, MPA đa đỉnh và MPA băng tần rộng. Tùy theo mục đích ứng dụng mà các MPA này được thiết kế để có thể thu được băng tần hấp thụ thích hợp.

* *MPA đơn đỉnh*

Thông thường, MPA được thiết kế có mặt trên là các cấu trúc cộng hưởng kim loại nhằm kích thích cộng hưởng điện từ, nên MPA thường thể hiện đặc tính hấp thụ dải hẹp hoặc hấp thụ đơn đỉnh. Như trình bày ở trên, MPA do Landy và cộng sự đề xuất có một đỉnh hấp thụ hẹp, với FBW khoảng 4%. Với tiềm năng ứng dụng trong cảm biến, phát xạ dải hẹp, bộ lọc tần số ... các MPA băng tần hẹp đã được nghiên cứu rộng rãi trong các vùng tần số khác nhau như vùng ánh sáng nhìn thấy, vùng hồng ngoại và cả vùng tần số vi sóng. B. Chen và cộng sự đã đề xuất một MPA hấp thụ trong băng tần L (tần số từ 1,0 đến 2,0 GHz). Cấu trúc thể hiện đỉnh hấp thụ hẹp tại tần số 1,21 GHz, độ hấp thụ đạt gần như tuyệt đối và FBW chỉ bằng 1,65%. Độ hấp

thụ cao cùng với đỉnh hấp thụ hẹp làm cho cấu trúc đề xuất trở thành một ứng cử viên tiềm năng trong ứng dụng cho ra-đa và vệ tinh [78].



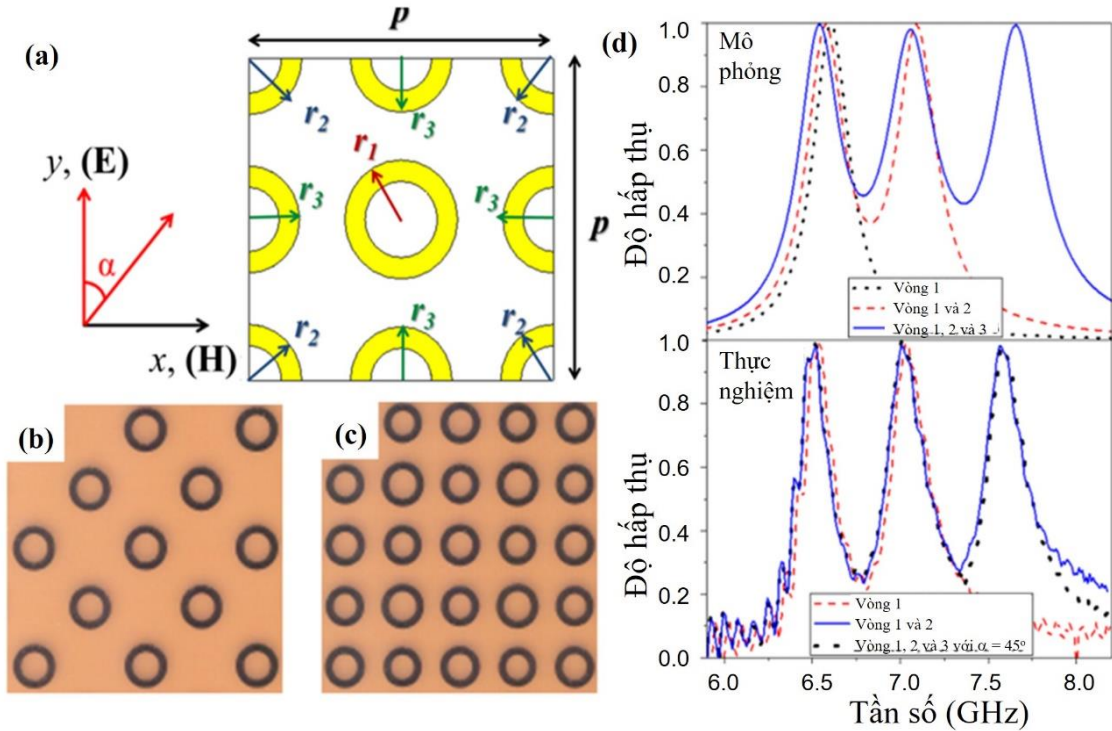
Hình 1.4. (a) Cấu trúc vật liệu MPA hấp thụ siêu hẹp; (b) Phổ hấp thụ/phản xạ của vật liệu [79].

Bên cạnh cấu trúc dạng ba lớp, kim loại – điện môi – kim loại truyền thống, MPA hấp thụ băng tần siêu hẹp có thể nhận được từ cấu hình điện môi - điện môi - kim loại [79], trong đó vật liệu được thiết kế với một dãy các cấu trúc điện môi sắp xếp tuần hoàn ở mặt trên của lớp điện môi liên tục, và dưới cùng là lớp kim loại liên tục, tương tự như cấu trúc của các MPA thông thường. Kết quả cho thấy, vật liệu có băng tần hấp thụ siêu hẹp với độ rộng ở nửa cực đại (FWHM) khoảng 0,028nm và hệ số phẩm chất lớn hơn 50000 ở vùng hồng ngoại gần (Hình 1.4).

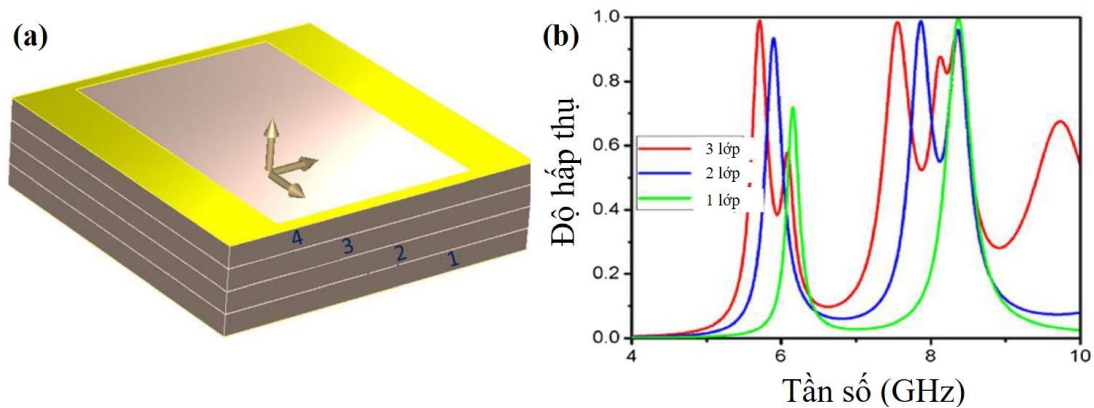
* MPA đa đỉnh

Bên cạnh MPA đơn đỉnh, MPA đa đỉnh cũng được quan tâm nghiên cứu. Một trong những phương pháp phổ biến để đạt được MPA đa đỉnh đó là sắp xếp các cấu trúc cộng hưởng khác nhau trong cùng một ô cơ sở (sắp xếp đồng phẳng). Nhóm nghiên cứu của J. W. Park và cộng sự đã đề xuất một MPA đa dải tần hoạt động trong vùng GHz [37]. Ô cơ sở của MPA này bao gồm các vòng cộng hưởng kim loại, hình tròn có kích thước khác nhau được sắp xếp theo quy luật nhất định, ở giữa là lớp điện môi, và mặt dưới là tấm loại liên tục để triệt tiêu thành phần truyền qua của sóng điện từ khỏi cấu trúc [Hình 1.5(a)-(c)]. Kết quả mô phỏng cho thấy nếu ô cơ sở chỉ gồm các vòng cộng hưởng có cùng bán kính ngoài r_1 , thì vật liệu có một đỉnh hấp thụ tại khoảng 6,6 GHz. Khi thêm vào ô cơ sở các vòng cộng hưởng có bán kính ngoài là r_2 khác r_1 , đồng thời giữ nguyên kích thước và vị trí của vòng cộng hưởng ban đầu, vật liệu có thêm một đỉnh hấp thụ mới tại khoảng 7,1 GHz. Lúc này, cấu trúc trở thành MPA hai đỉnh hấp thụ. Tiếp tục sắp xếp thêm các vòng cộng hưởng có bán kính ngoài r_3 trong khi vẫn giữ nguyên hai vòng cộng hưởng r_1 và r_2 , vật liệu cho ba đỉnh hấp thụ tại 6,5 GHz (99%), 7,0 GHz (98%) và 7,6 GHz (99%) trong mô phỏng và tại các

tần số 6,51 GHz (98%), 7,0 GHz (98%) và 7,61 GHz (98%) trong thực nghiệm. Lúc này, vật liệu trở thành MPA đa đỉnh [Hình 1.5(d)].



Hình 1.5. (a) Minh họa ô cơ sở của MPA đa dải tần hoạt động trong vùng GHz, mẫu MPA chế tạo với 2 (b) và 3 (c) vòng cộng hưởng kích thước khác nhau, (d) phổ hấp thụ của mẫu MPA [37].

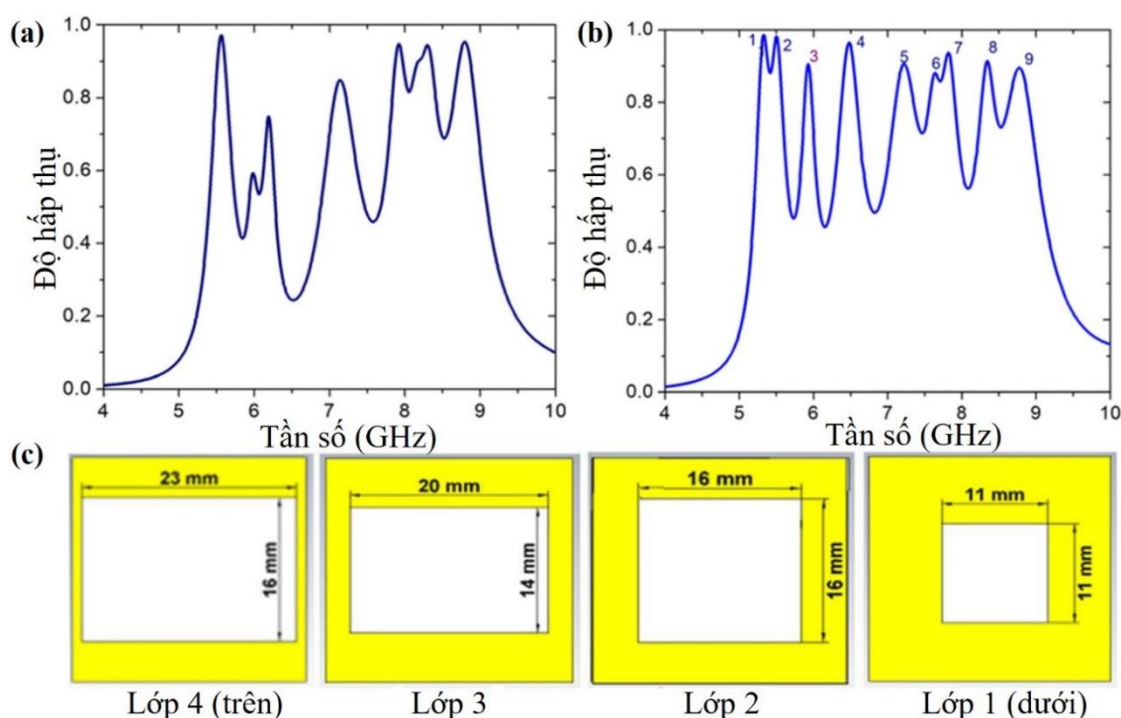


Hình 1.6. (a) MPA có cấu trúc đa lớp (b) phổ hấp thụ của MPA đề xuất khi số lớp thay đổi [80].

Bên cạnh phương pháp sắp xếp các cấu trúc cộng hưởng có kích thước khác nhau đồng phẳng trong cùng một ô cơ sở, MPA đa đỉnh có thể đạt được bằng cách xếp chồng các cấu trúc cộng hưởng lên nhau tạo thành cấu trúc dạng đa lớp. Trong tài liệu [80], C. M. Tran và cộng sự đã thiết kế một MPA đa đỉnh có cấu trúc đa lớp, trong đó mỗi lớp bao gồm một tấm đồng được khoét rỗng đặt trên một lớp điện môi liên tục [Hình 1.6(a)]. Khi vật liệu chỉ có một lớp, kết quả mô phỏng cho thấy vật liệu

có hai đỉnh hấp thụ tại 6,15 GHz (độ hấp thụ 72,3%) và 8,38 GHz (độ hấp thụ 100%). Khi vật liệu có cấu trúc hai lớp, phổ hấp thụ có ba đỉnh hấp thụ tại các tần số 5,89 GHz, 7,87 GHz và 8,37 GHz với độ hấp thụ lần lượt là 93,3%, 98,6% và 95,8%. Khi xếp ba lớp cấu trúc cộng hưởng chồng lên nhau, phổ hấp thụ cho sáu đỉnh hấp thụ [Hình 1.6(b)].

So với cấu trúc một lớp, khi tăng số lớp cấu trúc lên, số lượng đỉnh cộng hưởng cũng tăng lên. Khi ô cơ sở gồm bốn lớp chồng lên nhau (cấu hình bốn lớp), trong khoảng tần số từ 5 đến 9 GHz xuất hiện sáu đỉnh hấp thụ rõ ràng. Tuy nhiên, ở tần số 6,5 GHz, cường độ hấp thụ vẫn yếu [Hình 1.7(a)]. Để tăng số lượng đỉnh hấp thụ đồng thời cải thiện độ hấp thụ, kích thước của các cấu trúc cộng hưởng đã được điều chỉnh và tối ưu [Hình 1.7(c)]. Kết quả là số đỉnh hấp thụ được tăng lên chín đỉnh với độ hấp thụ trên 85% [Hình 1.7(b)].



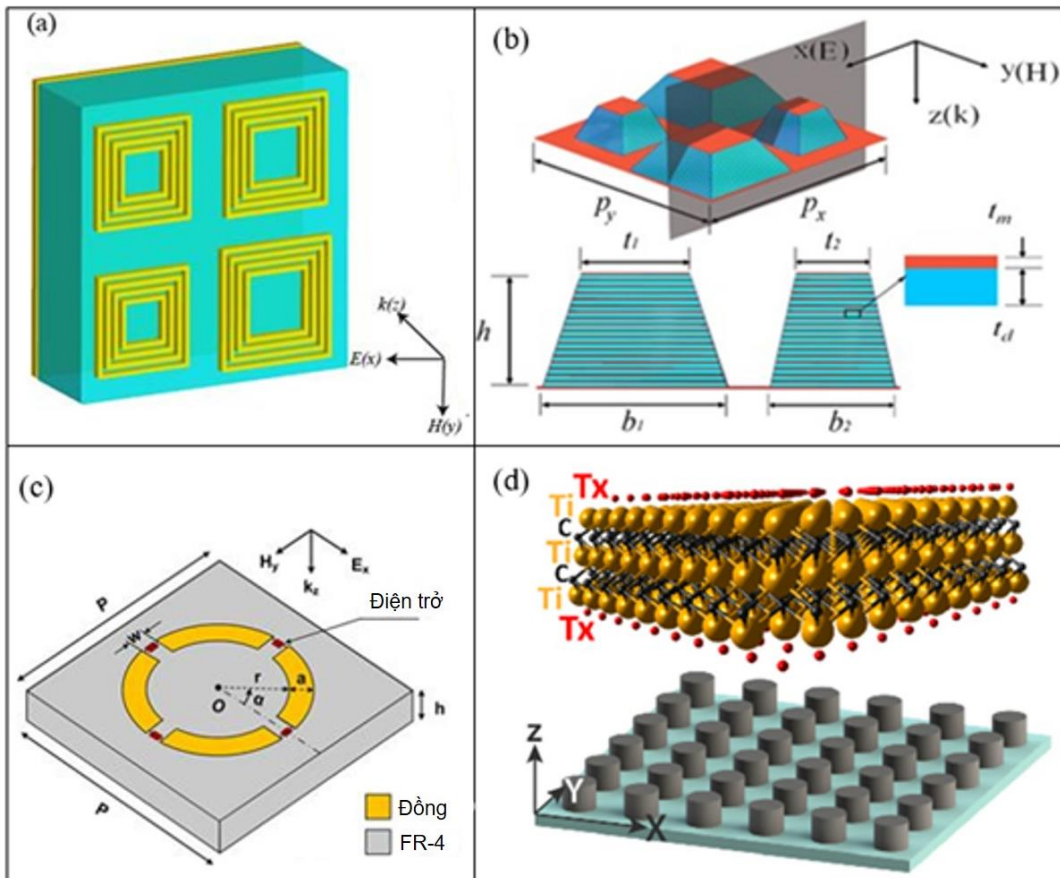
Hình 1.7. Phổ hấp thụ mô phỏng của MPA có cấu trúc gồm (a) 4 lớp cộng hưởng giống nhau, (b) 4 lớp cộng hưởng có kích thước khác nhau, (c) kích thước của 4 cấu trúc cộng hưởng [80].

Ngoài hai phương pháp kể trên, MPA đa đỉnh có thể đạt được dựa trên hiệu ứng cộng hưởng bậc cao, trong đó cấu trúc cộng hưởng có hình dạng và kích thước được thiết kế một cách thích hợp [41,42]. MPA đa đỉnh dựa trên cộng hưởng bậc cao có các ưu điểm là i) tạo được hiệu ứng đa băng tần mà vẫn giữ được ưu điểm kích thước nhỏ gọn, ii) tạo ra MPA hoạt động ở thang tần số cao hơn, điều này có thể cho phép chế tạo MPA hoạt động trong vùng tần số cao, đây là giải pháp hiệu quả để thay thế cho các kỹ thuật chế tạo phức tạp và đắt tiền hiện nay, iii) đỉnh cộng hưởng bậc

cao thường nhạy với các điều kiện môi trường nên có thể ứng dụng làm tăng độ nhạy của cảm biến.

*** MPA băng tần rộng**

Ngược lại với sự hấp thụ đơn đỉnh và đa đỉnh dải hẹp, trong nhiều ứng dụng, chẳng hạn như thu năng lượng mặt trời, phát hiện quang, ... yêu cầu vật liệu phải có đặc tính hấp thụ dải rộng. Có bốn phương pháp chính để tạo ra hấp thụ băng tần rộng như minh họa trong Hình 1.8. Phương pháp thứ nhất có thể kể đến là sắp xếp đồng phẳng các cấu trúc cộng hưởng [81,82]. Trong cách thiết kế này, mỗi cấu trúc có một tần số cộng hưởng nên khi chúng được sắp xếp trong cùng một ô cơ sở sẽ dẫn đến sự xuất hiện của nhiều đỉnh hấp thụ. Nếu được thiết kế phù hợp, các đỉnh cộng hưởng này sẽ có một phần chồng lên nhau tạo thành hấp thụ băng tần rộng. Tuy nhiên, vẫn còn nhiều vấn đề liên quan đến thiết kế tối ưu để đạt được hiệu suất tốt nhất của MPA băng tần rộng được thiết kế theo phương pháp này. Cụ thể, khi các cấu trúc cộng hưởng sắp xếp gần nhau chúng sẽ tương tác với nhau, dẫn đến sự thay đổi tần số cộng hưởng, đồng thời độ hấp thụ sẽ giảm dần do sự lai hóa giữa cộng hưởng plasmon bề mặt và cộng hưởng từ [83].



Hình 1.8. Một số MPA hấp thụ băng tần rộng: (a) cấu trúc cộng hưởng được sắp xếp đồng phẳng [81]; (b) các cấu trúc cộng hưởng xếp chồng lên nhau [84]; (c) sử dụng điện trở [39]; (d) sử dụng các vật liệu nano plasmonic [85].

Phương pháp thứ hai là sắp xếp các cấu trúc cộng hưởng chồng lên nhau (MPA có cấu trúc đa lớp) [84]. Tương tự như sắp xếp đồng phẳng, việc xếp chồng các cấu trúc cộng hưởng lên nhau cũng nhằm mục đích kết hợp các đỉnh cộng hưởng riêng biệt lại với nhau để mở rộng băng tần của MPA. Phương pháp thứ ba là sử dụng các phần tử ngoại vi như điện trở, tụ điện [39]. Việc tích hợp các phần tử này vào cấu trúc sẽ giúp kết nối các chế độ cộng hưởng khác nhau và tiêu thụ năng lượng điện từ - làm giảm hệ số phẩm chất của cấu trúc từ đó mở rộng băng tần của MPA. Thứ tư là sử dụng các vật liệu plasmonic [85], trong đó lớp trên cùng được thay thế bằng vật liệu nanocomposit plasmonic siêu mỏng (độ dày khoảng 20 nm), được làm từ các hạt nano kim loại phân tán ngẫu nhiên trong lớp chất nền polymer (hoặc nói chung là điện môi). Trong vật liệu này, điều kiện phối hợp trở kháng được thỏa mãn, dẫn đến thành phần phản xạ bị triệt tiêu, đồng thời xảy ra sự phản xạ ánh sáng nhiều lần giữa các lớp cũng như hấp thụ ánh sáng từ các hạt kim loại nhỏ. MPA băng tần rộng dựa trên vật liệu nanocomposit đã được báo cáo cho các vùng tần số từ vùng tử ngoại đến vùng khả kiến và hồng ngoại gần [86-88].

1.1.3. Cơ chế hấp thụ sóng điện từ của MPA trong vùng tần số GHz

* Lý thuyết phối hợp trở kháng

Thông thường, khi sóng điện từ lan truyền đến bề mặt của vật liệu, một phần năng lượng của chúng bị phản xạ ngược trở lại môi trường tới, một phần năng lượng bị truyền ra khỏi vật liệu và một phần bị vật liệu hấp thụ. Phần năng lượng bị hấp thụ được biểu diễn bởi độ hấp thụ $A(\omega)$, có thể tính toán bởi biểu thức:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega), \quad (1.1)$$

trong đó, $R(\omega)$ biểu diễn độ phản xạ và $T(\omega)$ biểu diễn độ truyền qua. Từ đó thấy rằng, để cường độ hấp thụ đạt 100% thì cả độ phản xạ và độ truyền qua phải đồng thời bị triệt tiêu. Các MPA thường được thiết kế với lớp kim loại liên tục ở mặt dưới có độ dày nhỏ hơn nhiều lần “skindepth” của sóng điện từ trong kim loại, nên có thể ngăn chặn sóng điện từ truyền qua. Do đó, độ truyền qua bị triệt tiêu $T(\omega) = 0$ và $A(\omega) = 1 - T(\omega)$.

Theo công thức phản xạ Fresnel, trong trường hợp sóng tới vuông góc, độ phản xạ được tính bởi:

$$R(\omega) = \left| \frac{\sqrt{\mu_r} - \sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{\mu_r} + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2 \quad (1.2)$$

với μ_r là độ từ thẩm và ε_r là độ điện thẩm của vật liệu. Giả sử Z là trở kháng hiệu dụng của vật liệu, và Z_0 là trở kháng của môi trường, ta có $Z = \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{\mu_r}}$ và $Z_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}$, với ε_0 và μ_0 lần lượt là độ điện thẩm và độ từ thẩm của môi trường. Mối liên hệ giữa độ phản xạ và trở kháng được biểu diễn bởi biểu thức:

$$R(\omega) = \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2. \quad (1.3)$$

Phương trình trên cho thấy rằng để có $R(\omega) = 0$ thì cần có $Z = Z_0$ hay $\mu_r = \varepsilon_r$, nghĩa là sự phối hợp trở kháng phải được thỏa mãn. Kết quả là toàn bộ sóng điện từ truyền vào bên trong MPA. Tại đây, chúng sẽ bị giam giữ và tiêu tán. Gọi P_d là phần năng lượng được tiêu tán trong lớp điện môi và P_m là phần năng lượng được tiêu tán trong các phần cấu trúc kim loại của vật liệu, ta có [89]:

$$P_d = \pi \varepsilon f \tan \delta \iiint_{V_d} |E|^2 dV \quad (1.4)$$

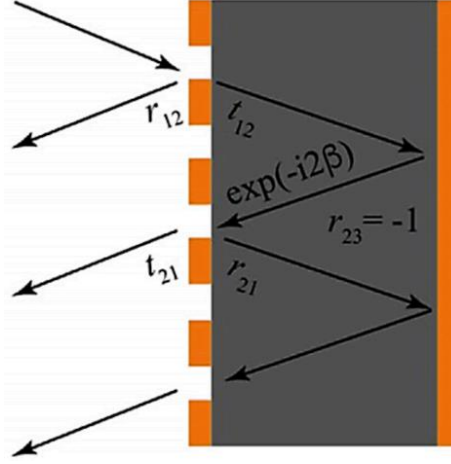
$$P_m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \mu f}{\sigma}} \iint_{S_m} |H|^2 dS, \quad (1.5)$$

trong đó V_d là thể tích của lớp điện môi, ε và δ lần lượt là hằng số điện môi và độ tổn hao điện môi, S_m là diện tích bề mặt cấu trúc kim loại, μ và σ lần lượt là độ từ thẩm và độ dẫn điện của kim loại, E và H lần lượt là điện trường và từ trường của sóng điện từ tới. Khi cộng hưởng điện và cộng hưởng từ được kích thích, MPA trở thành môi trường có độ tổn hao lớn, bao gồm tổn hao điện môi và tổn hao Ohmic. Tổn hao điện môi được hiểu là sự tiêu tán năng lượng xảy ra bên trong môi trường tẩm điện môi và được đặc trưng bởi hệ số tổn hao $\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$. Tổn hao Ohmic xảy ra tại phần kim loại, giống như tiêu tán năng lượng trên điện trở của mạch cộng hưởng LC [9]. Trong vùng tần số từ vài THz trở xuống, điện trở của các kim loại rất nhỏ nên năng lượng tiêu tán được phân bố chủ yếu trong lớp điện môi [90]. Trong trường hợp các MPA hoạt động trong vùng tần số cao (từ vùng hồng ngoại trở lên), năng lượng hấp thụ đồng thời bị tiêu tán chủ yếu trong phần cấu trúc làm bằng kim loại dưới dạng dưới dạng tổn hao Ohmic [91].

* Lý thuyết giao thoa triệt tiêu

Một MPA có thể được coi là một hệ tương tác trong đó cộng hưởng từ được kích thích tạo ra các dòng điện đối song, và cộng hưởng điện được kích thích hình thành nên các dòng điện song song tại hai lớp kim loại. Tuy nhiên, vai trò của lớp cấu trúc cộng hưởng kim loại và mặt phẳng mặt kim loại liên tục có thể được xem xét

một cách độc lập [92]. Lớp phía trước với các cấu trúc kim loại nhất định có chức năng như một bề mặt phản xạ một phần, có thể được sử dụng để thay đổi hệ số phản xạ và truyền qua. Mặt khác, mặt phẳng kim loại liên tục có độ dẫn điện cao hoạt động như một mặt phản xạ hoàn toàn, tạo ra độ trễ pha 180° cho sóng điện từ phản xạ trên nó.



Hình 1.9. Mô hình phản xạ và giao thoa của MPA [93].

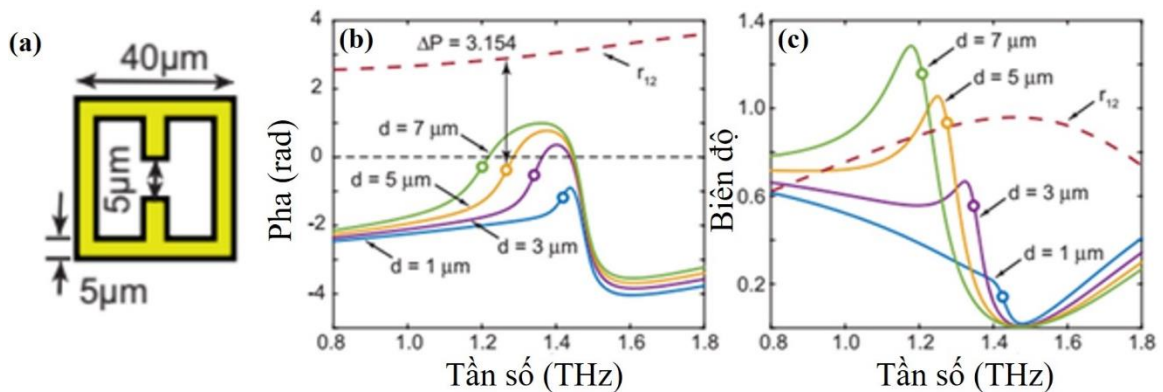
Như được minh họa trong Hình 1.9, khi sóng điện từ truyền đến mặt kim loại tuần hoàn, nó bị phản xạ một phần trở lại không khí với hệ số phản xạ là $\tilde{R}_{12}(\omega) = R_{12}(\omega)e^{i\phi_{12}(\omega)}$ và một phần truyền qua vào lớp điện môi với hệ số truyền qua là $\tilde{T}_{12}(\omega) = T_{12}(\omega)e^{i\theta_{12}(\omega)}$. Sóng truyền qua sẽ truyền đi cho đến khi chạm tới mặt phẳng kim loại ở phía sau. Hệ số lan truyền phức bên trong chất điện môi được biểu diễn bởi $\tilde{\gamma} = \gamma_1 + i\gamma_2 = \sqrt{\epsilon_d}k_0d$, với k_0 là số sóng của không gian tự do, d là chiều dày của lớp điện môi, γ_1 biểu diễn pha lan truyền (propagation phase) và γ_2 biểu diễn độ hấp thụ của điện môi. Khi sóng truyền tới mặt kim loại phía sau, nó sẽ bị phản xạ toàn phần với hệ số phản xạ là -1 và bị trễ pha, sau đó truyền ngược trở lại mặt phân cách kim loại phía trước. Tại đây, một lần nữa xảy ra hiện tượng phản xạ và truyền qua một phần với hệ số phản xạ và hệ số truyền qua tương ứng là $\tilde{R}_{21}(\omega) = R_{21}(\omega)e^{i\phi_{21}(\omega)}$ và $\tilde{T}_{21}(\omega) = T_{21}(\omega)e^{i\theta_{21}(\omega)}$. Cần lưu ý rằng quá trình phản xạ và truyền qua được lặp đi lặp lại bên trong lớp điện môi và phần năng lượng truyền ra khỏi vật liệu ở phía trước của MPA là sự tổng hợp của tất cả phản xạ thành phần [92]:

$$\tilde{R}(\omega) = \tilde{R}_{12}(\omega) - \frac{\tilde{T}_{12}(\omega)\tilde{T}_{21}(\omega)e^{2i\tilde{\gamma}}}{1 + \tilde{R}_{21}(\omega)e^{2i\tilde{\gamma}}}, \quad (1.6)$$

trong đó, số hạng thứ nhất của vế phải là độ phản xạ trực tiếp từ lớp cấu trúc kim loại tuần hoàn, số hạng thứ hai là tổng hợp của các phản xạ bậc cao. Nếu biết hệ số phản xạ toàn phần \tilde{R} , có thể thu được độ hấp thụ $A(\omega) = 1 - |\tilde{R}(\omega)|^2$.

Lý thuyết giao thoa có thể giải thích các đặc điểm quan sát được trong các MPA có lớp kim loại liên tục ở mặt sau. Trong phương trình (1.6), hệ số phản xạ toàn phần liên quan trực tiếp đến độ dày của lớp điện môi, vì nó chi phối biên độ và pha của phản xạ thứ cấp. Khi lớp điện môi có độ dày tới hạn, phản xạ thứ cấp và phản xạ đầu tiên ngược pha và cùng biên độ thì hiện tượng giao thoa triệt tiêu xuất hiện, dẫn đến sự hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ.

Để tìm hiểu rõ hơn cơ chế hấp thụ của MPA dựa trên lý thuyết giao thoa triệt tiêu, MPA có cấu trúc cộng hưởng dạng vòng dây bị cắt như mô tả trên Hình 1.10 (a) được xem xét [94]. Pha và biên độ của phản xạ đầu tiên và phản xạ thứ cấp đối với các giá trị khác nhau của độ dày lớp điện môi được biểu diễn trong Hình 1.10 (b) và 1.10 (c). Từ Hình 1.10 (b) có thể thấy rõ ràng là độ lệch pha giữa phản xạ thứ nhất và phản xạ thứ cấp tiến gần tới π ở tần số hấp thụ (được đánh dấu bằng các vòng tròn). Khi độ dày của lớp điện môi đạt giá trị tới hạn $d = 5 \mu\text{m}$, độ lệch pha gần như chính xác là π , thỏa mãn yêu cầu để có sự hấp thụ tuyệt đối. Hơn nữa, khi độ dày của lớp điện môi tăng lên, biên độ của phản xạ thứ cấp [Hình 1.10 (c)] tăng dần và lớn hơn biên độ của lần phản xạ đầu tiên. Như mong đợi, khi biên độ của phản xạ đầu tiên và phản xạ thứ cấp bằng nhau [Hình 1.10 (c)] và độ lệch pha là π , thì xảy ra hấp thụ tuyệt đối.



Hình 1.10. (a) Cấu trúc ô cơ sở của MPA trong vùng THz, (b) và (c) lần lượt biểu diễn pha và biên độ của phản xạ đầu tiên (đường đứt nét) và thứ cấp (đường liền nét) với các độ dày lớp điện môi khác nhau. Vị trí đỉnh hấp thụ được đánh dấu bằng các vòng tròn [94].

1.2. Lý thuyết cộng hưởng bậc cao của MPA

Các đặc tính đặc biệt của MMs có được là do tương tác mạnh giữa trường điện từ của sóng tới với cấu trúc cộng hưởng điện-từ. Trong đó, cộng hưởng điện được hình thành do tương tác giữa thành phần điện trường của sóng điện từ với thành phần kim loại của MMs. Dưới tác dụng của điện trường ngoài, dòng điện cảm ứng được

tạo ra trên bề mặt của cấu trúc cộng hưởng kim loại. Các dòng điện này dao động cùng chiều với nhau và tại tần số cộng hưởng, cường độ hiệu dụng của chúng đạt giá trị lớn nhất. Lúc này, độ điện thẩm hiệu dụng của MMs đạt giá trị âm tại vùng tần số bên dưới tần số cộng hưởng [52]. Với trường hợp cộng hưởng điện cơ bản, dòng điện cảm ứng tạo ra một lưỡng cực điện.

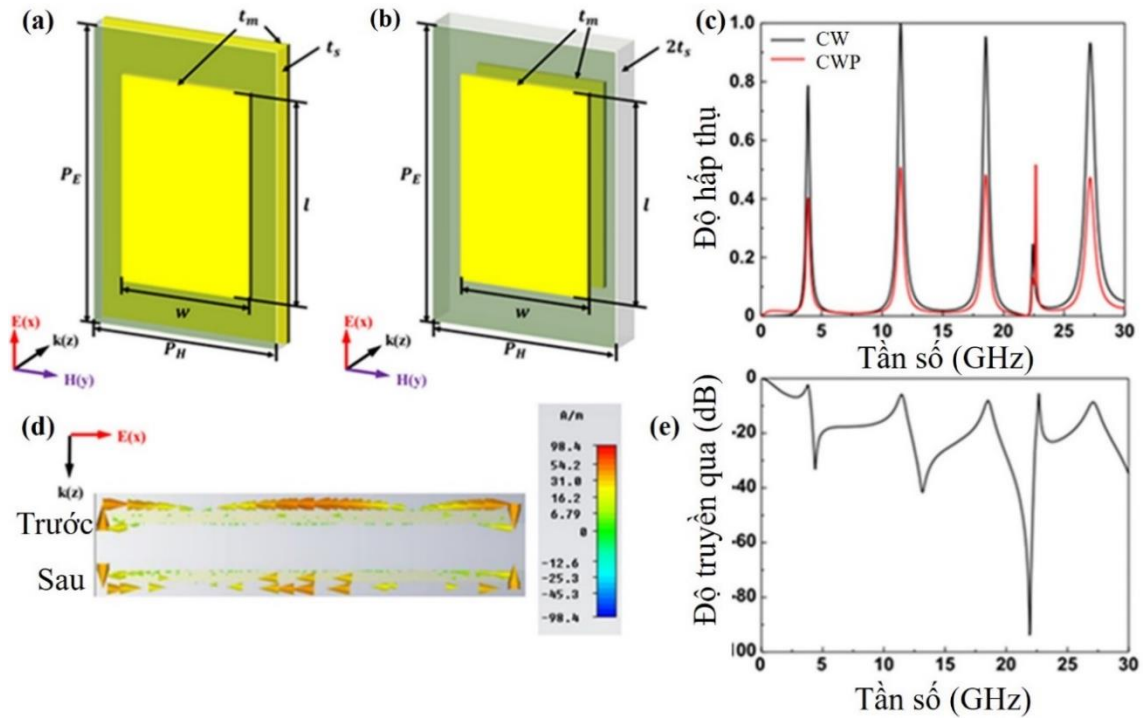
Bên cạnh cộng hưởng điện, khi thành phần từ trường của sóng điện từ tương tác mạnh với vật liệu sẽ hình thành các dòng điện cảm ứng ngược chiều trong các cấu trúc kim loại của vật liệu. Các dòng điện cảm ứng này có cường độ hiệu dụng phụ thuộc vào tần số của sóng điện từ. Khi xảy ra hiện tượng cộng hưởng từ, cường độ hiệu dụng của dòng điện cảm ứng đạt giá trị cực đại. Giá trị tần số tương ứng là tần số cộng hưởng từ, tại vùng lân cận tần số này, độ từ thẩm hiệu dụng của MMs đạt giá trị âm. Khác với các vật liệu thông thường, độ từ thẩm âm có thể đạt được đối với vật liệu biến hóa, khi có cộng hưởng từ, các dòng điện tròn được kích thích để tạo ra mô men lưỡng cực từ [53]. Ở các mode cộng hưởng bậc cao, dòng điện cảm ứng sẽ dao động dưới dạng tứ cực hoặc đa cực, tùy thuộc vào bậc cộng hưởng.

Hiệu ứng cộng hưởng điện và cộng hưởng từ được quan sát thấy trong một số MMs, điển hình là cấu trúc CWP gồm hai đoạn dây kim loại đặt đối xứng nhau qua một lớp điện môi. Cơ chế hấp thụ và các đặc tính của cộng hưởng từ bậc lẻ có thể được làm sáng tỏ thông qua lý thuyết mạch tương đương cho cộng hưởng bậc cao (DEC - Differential Equivalent-Circuit). Trong lý thuyết này, MPA được chia thành N miền nhỏ và mỗi miền này được mô hình bằng các mạch LC tương ứng. Nghiệm của phương trình mạch điện tương đương khi $N \rightarrow \infty$ sẽ giúp mô tả các đặc trưng của cộng hưởng điện từ bậc cao [42].

1.2.1. Đặc trưng điện từ của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ có cộng hưởng bậc cao (H-MPA)

Để làm rõ lý thuyết DEC, chúng ta có thể xét cấu trúc CWP, đây là một cấu trúc điển hình của MPA có cộng hưởng bậc cao. Xét trường hợp đơn giản, các cạnh của dây kim loại song song với các véc tơ điện trường và từ trường của sóng điện từ tới. Cấu trúc CWP có lớp điện môi dày t_s và lớp kim loại dày $t_m = 0,035$ mm. Các dây bị cắt (cut wire - CW) có chiều dài l và chiều rộng w , nằm trên mặt phẳng $\mathbf{E} - \mathbf{H}$, được sắp xếp theo chu kỳ P_E dọc theo trục của véc tơ cường độ điện trường \mathbf{E} , và P_H dọc theo trục của véc tơ cường độ từ trường \mathbf{H} . Để thuận tiện, khoảng cách giữa các thanh CW theo trục \mathbf{E} được xác định là $g_E = P_E - l$, tỉ lệ giữa khoảng cách g_E với chiều dài thanh là $k_E = g_E/l$. Trong cấu trúc đang xét, đồng có độ dẫn điện là $5,8 \times 10^7$ S/m được lựa chọn để làm các thanh kim loại, điện môi được chọn là FR-4 có hằng

số điện môi tương đối và độ tổn hao lần lượt là 4,3 và 0,025. Giá trị của các tham số cấu trúc là $l = 17, w = 3, P_E = 18,7, P_H = 3,3$ và $t_s = 1$ mm [42].



Hình 1.11. (a) Cấu trúc CW và (b) CWP, (c) phổ hấp thụ mô phỏng của cấu trúc CW và CWP, (d) phân bố dòng điện bề mặt ở đỉnh thứ tư và (e) phổ truyền qua của vật liệu hấp thụ CWP [42].

Bằng cách lấy đối xứng CW qua lớp điện môi liên tục sẽ nhận được cấu trúc CWP. Mạch điện LC tương đương được xây dựng cho cấu trúc CWP này. Đặc trưng hấp thụ của cấu trúc CW và CWP được khảo sát qua mô phỏng, trong đó điều kiện biên tuần hoàn được thiết lập dọc theo các cạnh của ô cơ sở (trục x và trục y) trong mặt phẳng $\mathbf{E} - \mathbf{H}$, và mở theo hướng \mathbf{k} . Sóng điện từ phân cực ngang TE tới theo phương vuông góc với bề mặt cấu trúc [Hình 1.11 (a) và (b)]. Hình 1.11 (c) biểu diễn kết quả mô phỏng phổ hấp thụ của hai cấu trúc CW và CWP được thiết kế hoạt động trong dải tần số từ 4 đến 30 GHz. Có thể thấy rằng, cấu trúc CW có năm đỉnh hấp thụ tại 3,87 GHz (78,63%), 11,52 GHz (99,99%), 18,54 GHz (95,37%), 22,41 GHz (24,55%) và 27,15 GHz (93,23%). Cấu trúc CWP cũng cho thấy năm đỉnh hấp thụ tại 3,87 GHz (40,31%), 11,52 GHz (50,81%), 18,54 GHz (48,23%), 22,65 GHz (51,59%) và 27,15 GHz (47,34%). Các kết quả này cho thấy cấu trúc CW và CWP có các đỉnh hấp thụ tại các tần số gần trùng nhau, tuy nhiên độ hấp thụ không giống nhau.

Bản chất của các đỉnh hấp thụ được xác định qua phân bố dòng điện bề mặt. Đỉnh thứ tư không có nguồn gốc từ cộng hưởng điện từ, trong khi bốn đỉnh còn lại

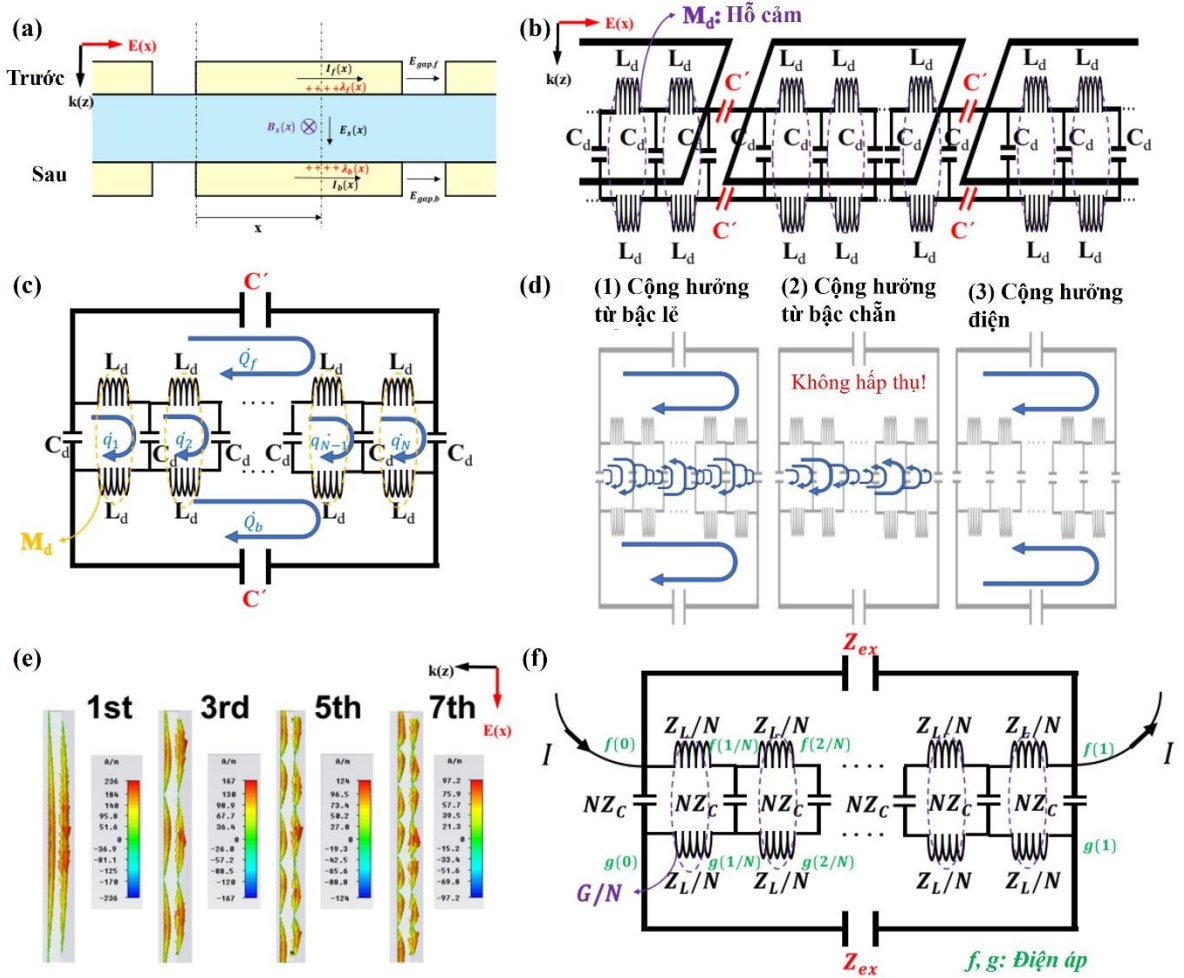
được hình thành từ cộng hưởng từ cơ bản, thứ ba, thứ năm và thứ bảy. Đỉnh thứ tư được cho là sự cộng hưởng do dòng điện bề mặt phân bố ở phần mặt trên, bên ngoài của thanh CW (sau đây, được đặt tên là "cộng hưởng điện trên"). Sự phân bố này đã được xác minh bằng hình ảnh mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt của đỉnh này đối với cấu trúc CWP, với độ dày lớp kim loại được tăng lên 0,5 mm để phân biệt dòng điện bên ngoài và bên trong [Hình 1.11 (d)] [42].

1.2.2. Lý thuyết mạch tương đương cho cộng hưởng bậc cao

Trong lý thuyết DEC, CWP được chia thành nhiều phần nhỏ và mỗi phần đó được mô hình hóa bằng một mạch điện LC thành phần. Ở đây, chỉ xem xét các trường hợp có sự phân bố điện tích đồng nhất và không có dòng điện theo trục \mathbf{H} . Hình 1.12 (a) biểu diễn mật độ dòng điện tích k_f, k_b , dòng điện I_f, I_b , điện trường E_s tại lớp điện môi và $E_{g,f}, E_{g,b}$ tại các rãnh, từ trường B_s tại lớp điện môi nhận được bằng cách sử dụng lý thuyết DEC (f kí hiệu CW mặt trước, b kí hiệu cho CW ở phía sau). Điện tích và dòng điện biến thiên dọc theo trục \mathbf{E} , và chỉ cắt cấu trúc theo phương vuông góc với mặt phẳng $\mathbf{E} - \mathbf{k}$, như trong Hình 1.12 (b). Mạch điện được đơn giản hóa bằng cách nối các mối nối tuần hoàn như trong Hình 1.12 (c). L_d là phần tử điện cảm vô cùng nhỏ của CW, C_d là phần tử điện dung vô cùng nhỏ giữa hai CW ở hai mặt trước và sau của cấu trúc CWP, M_d là hồ cảm vô cùng nhỏ giữa CWP với dòng điện đối song và C' là phần tử điện dung giữa các cạnh của các ô cơ sở liền kề. Thanh CW có chiều dài l được cắt thành N phần, mỗi phần có chiều dài là l/N . Do đó, ta có $L_d = l/N$, $C_d = C/N$ và $M_d = M/N$, với L, C và M là điện cảm, điện dung và hồ cảm khi không chia nhỏ thành CW. Như trong Hình 1.12 (c), dòng điện được phân bố trong mỗi vòng là \dot{Q}_f, \dot{Q}_b trong mạch $L_d C'$ và $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_N$ trong mạch $L_d C_d$. Nghiệm của mạch tương đương có dạng như phương trình (1.7), trong đó A biểu diễn điện tích tại tụ điện C_d và A_f, A_b biểu diễn điện tích trên tụ điện C [42]:

$$\begin{cases} q_k = [A \sin(k\phi - \delta) + \frac{A_f + A_b}{2}] e^{i\omega t}, 0 \leq k \leq N + 1 \\ Q_f = A_f e^{i\omega t}, Q_b = A_b e^{i\omega t} \end{cases} \quad (1.7)$$

trong đó, $\delta = \sin^{-1} \frac{A_f + A_b}{2A}$.



Hình 1.12. (a) Sơ đồ các thông số vật lý của MPA dạng CWP, (b) mạch LC tương đương của cấu trúc CWP không có tổn hao Ohmic và điện môi, (c) mạch LC tương đương đơn giản hóa, và (d) các nghiệm của mạch, (e) phân bố dòng điện bề mặt cảm ứng theo thứ tự cộng hưởng thứ nhất, thứ ba, thứ năm và thứ bảy, (f) mạch LC tương đương với tổn hao điện môi và Ohmic để tính trở kháng hiệu dụng [42].

Dựa trên định luật Kirchhoff, nghiệm của mạch điện khi $N \rightarrow \infty$ (đồng thời $\phi \rightarrow 0$) tương ứng với ba mode cộng hưởng: (1) các cộng hưởng từ bậc lẻ, (2) các cộng hưởng từ bậc chẵn, (3) các cộng hưởng điện [Hình 1.12 (d)]. Chỉ có cộng hưởng từ bậc lẻ và cộng hưởng điện mới cho phép hấp thụ sóng điện từ.

Với nghiệm thứ n , x_n , của $\cot x = \frac{2C'}{C}x$, $N\phi = 2x_n$ và $A_f = A_b = (-1)^{n+1} A \cos x_n$ được thỏa mãn, cộng hưởng từ bậc $2n - 1$ (cộng hưởng bậc lẻ) có [42]:

$$\left\{ \begin{aligned} f_{2n-1}^0 &= \frac{x_n}{\pi \sqrt{2(L+M)C}} \\ q(x) &= (-1)^n A e^{i\omega t} \left\{ \cos \left[x_n \left(2 \frac{x}{l} - 1 \right) \right] - \cos x_n \right\}, \\ Q_f = Q_b &= (-1)^{n+1} A e^{i\omega t} \cos x_n \end{aligned} \right. \quad (1.8)$$

trong đó f_{2n-1}^0 là tần số cộng hưởng.

Bằng cách sử dụng phương trình (1.8), dòng điện tại mỗi CW trong cấu trúc CWP được biểu diễn dưới dạng hàm Sin như phương trình (1.9) [42], cho thấy dòng điện tại hai CW ngược chiều nhau. Điều này phù hợp tốt với kết quả mô phỏng dòng điện cảm ứng trong cấu trúc CW ở các tần số 3,87; 11,52; 18,54 và 27,15 GHz được thể hiện trong Hình 1.12(e).

$$I_f = -I_b = (-1)^n i \omega A e^{i\omega t} \cos[x_n (2 \frac{x}{l} - 1)]. \quad (1.9)$$

Hơn nữa, sử dụng biểu thức gần đúng cho $L+M$, C , C' và x_n , chúng ta có thể nhận được biểu thức gần đúng cho tần số cộng hưởng từ bậc $(2n-1)$, f_{2n-1} như phương trình (1.10) dưới đây. Khi $l, w \gg 2t_s$, bằng việc phân tích năng lượng trong trường hợp dòng điện bề mặt đối song, có cùng biên độ chạy trên hai tấm kim loại cách nhau một khoảng $2t_s$ ta có thể nhận được $L+M \approx \mu \frac{lt_s}{w}$ và $C \approx \varepsilon \frac{lw}{2t_s}$. Khi $t_m \ll g_E \ll w$,

điện dung giữa hai thanh kim loại song song là $C' \approx k_1 \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon}{2} \frac{w}{\ln\left(\frac{g_E}{t_m}\right) + k_2}$, trong đó k_1

phụ thuộc vào hình dạng phân bố điện tích, k_2 là hệ số hiệu chỉnh độ rộng hiệu dụng của phân bố điện tích. Thêm vào đó, với giá trị $(2n-1)C'/C$ nhỏ, $x_n \approx \frac{2n-1}{2} \pi \left(1 - \frac{2C'}{C}\right)$.

Dựa trên các phép tính gần đúng này, ta nhận được phương trình (1.10) [42], trong đó $n_r \approx \sqrt{\varepsilon_r}$ là chiết suất môi trường, c_0 là tốc độ truyền sóng điện từ trong chân không.

$$f_{2n-1} \approx (2n-1) \frac{c_0}{2n_r l} \left(1 - \frac{2C'}{C}\right), \quad (1.10)$$

trong đó

$$\frac{C'}{C} \approx k_1 \frac{1 + \varepsilon_r}{\varepsilon_r} \frac{t_s / l}{\ln(k_E l / t_m) + k_2}. \quad (1.11)$$

Đối với cộng hưởng điện, các thông số vật lý được xác định như trong phương trình (1.12), và các dòng điện trên bề mặt các thanh CW là song song với nhau, như thể hiện trong phương trình (1.13). f_e^0 là tần số cộng hưởng điện. Cũng có thể lưu ý rằng, như mong đợi từ tài liệu [95], các giá trị độ tự cảm hiệu dụng khác nhau của $L+M$ và $L-M$ lần lượt có ảnh hưởng tới cộng hưởng từ và cộng hưởng điện [42]:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_e^0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{2(L-M)C}} \\ q(x) = 0 \\ Q_f = -Q_b = A_f e^{i\omega t} \end{array} \right. \quad (1.12)$$

$$I_f = I_b = -i\omega A_f e^{i\omega t} \quad (1.13)$$

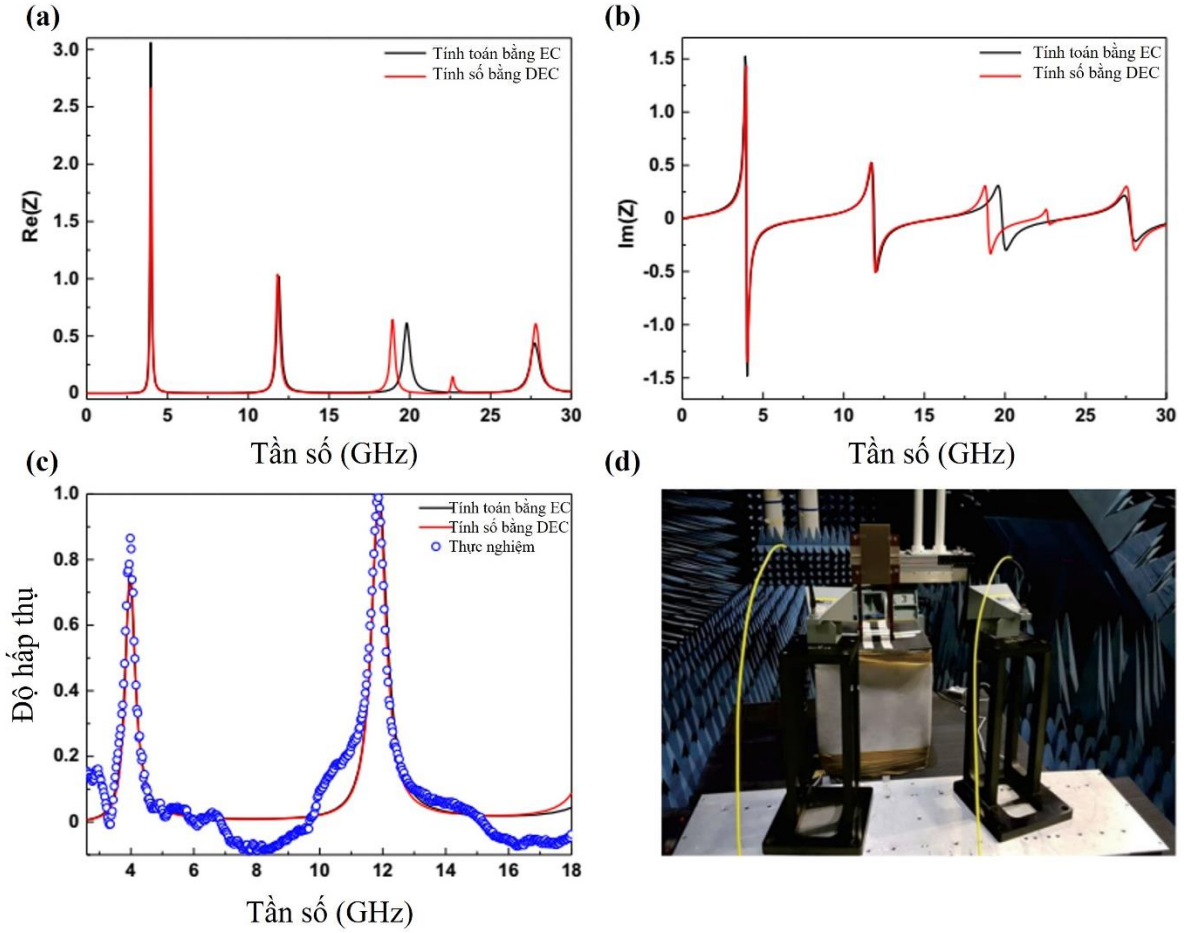
Tiếp theo, bằng cách áp dụng lý thuyết DEC cho CWP có tổn hao điện môi và Ohmic, ta có thể tính được trở kháng hiệu dụng của CWP, Z_{eff} , đồng thời cường độ và độ rộng của các đỉnh hấp thụ, được tạo ra bởi cộng hưởng từ bậc lẻ được phân tích. Với trường hợp MMs không có thành phần truyền qua, hệ số phản xạ được xác định bởi $S_{11} = (Z_{eff} - Z_0)/(Z_{eff} + Z_0)$, tổn hao điện môi và tổn hao Ohmic phải làm cho $Re[Z_{eff}] \neq 0$ để có độ hấp thụ $A(\omega) \neq 0$. Do đó, các phần tử mạch L_d , C_d , C_0 trong Hình 1.12(c) lần lượt được thay thế bằng Z_L/N , NZ_C , Z_{ex} , như trong Hình 1.12(f), với $Z_L = i\omega L + R$, $Z_C = 1/i\omega\tilde{C}$, $Z_{ex} = 1/i\omega\tilde{C}'$ và trở kháng liên quan đến hồ cảm $G = i\omega M$ được đưa vào, trong đó R là điện trở của thanh CW đối với dòng điện song song với trục E , $\tilde{C} = C(1 - i\delta)$ là độ dẫn phức giữa CWP và \tilde{C}' là độ dẫn phức tại khe hở giữa hai CW. \tilde{C}' có thể được viết dưới dạng $\tilde{C}' = C'(1 - i\delta')$, trong đó δ' là tổn hao hiệu dụng của C' , xấp xỉ bằng $\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 1} \delta$. Điện áp tại mỗi vị trí của mỗi thanh CW ở phía trước và phía sau được xác định lần lượt là $f(x)$ và $g(x)$ với $0 \leq x \leq 1$.

Bằng cách giải mạch điện, trở kháng Z_{eff} có thể được suy ra dưới dạng $Z_{eff} = (f(0) - f(1))/I$, được hiển thị trong các phương trình (1.14), (1.15) và (1.16) [42]. Trong biểu thức (1.16), A là một hằng số tùy ý thể hiện "cộng hưởng cô lập – isolated resonance" bên trong tùy ý đối với các cộng hưởng từ bậc chẵn không suy giảm lý tưởng ($e^\phi = 1$). Z_m và Z_e lần lượt là trở kháng liên quan đến cộng hưởng từ và cộng hưởng điện, bởi vì hai yếu tố của Z_{eff} thỏa mãn $Im(Z_m) = 0$ tại f_{2n-1}^0 và f_{2n}^0 , và $Im(Z_e) = 0$ tại f_e^0 khi $R \approx 0$ và $\delta, \delta' \approx 0$.

$$\phi = \sqrt{\frac{2(Z_L + G)}{Z_C}}, \quad Z_m = \frac{e^{\phi-1}}{\frac{1}{Z_L + G} - \frac{\phi(e^{\phi+1}) + e^{\phi-1}}{2} + \frac{1}{Z_{ex}}}, \quad Z_e^{-1} = \frac{1}{Z_L - G} + \frac{1}{Z_{ex}}, \quad Z_{eff} = \frac{1}{2}(Z_m + Z_e), \quad (1.14)$$

$$\text{Khi } e^\phi \neq 1, \quad \left\{ \begin{array}{l} f(x) = \frac{1}{2}(-Z_m(e^{\phi x} - e^{\phi(1-x)}) - Z_{ex}x) \\ g(x) = \frac{1}{2}(Z_m(e^{\phi x} - e^{\phi(1-x)}) - Z_{ex}x) \end{array} \right. \quad (1.15)$$

$$\text{Khi } e^{\phi} = 1, \begin{cases} f(x) = -A \cos \frac{\phi}{i} x + \frac{I}{4} \left(-\frac{Z_L+G}{\phi} i \sin \frac{\phi}{i} x - 2Z_e x \right) \\ g(x) = A \cos \frac{\phi}{i} x + \frac{I}{4} \left(\frac{Z_L+G}{\phi} i \sin \frac{\phi}{i} x - 2Z_e x \right) \end{cases}, \quad (1.16)$$



Hình 1.13. (a) Phần thực và (b) phần ảo của trở kháng hiệu dụng, (c) phổ hấp thụ của CWP tính toán bằng phương pháp EC, tính số và đo đạc, (d) thiết lập phép đo độ phản xạ [42].

Trở kháng tương đối hiệu dụng $Z_{eff} = \frac{Z_{eff}}{Z_0}$ đã được xác định bằng tính số và thực nghiệm (Hình 1.13), trong đó trở kháng của chân không là $Z_0 = 376,73 \Omega$. Hình 1.13(a) và (b) thể hiện kết quả tính bằng lý thuyết mạch LC tương đương và tính số cho phần thực và phần ảo của Z_{eff} trong đó dữ liệu số được xác định bởi $Z_{eff} = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}}$. Hình 1.13(c) thể hiện phổ hấp thụ tính số, tính bằng mạch LC tương đương và thực nghiệm. Các tham số sử dụng cho mạch LC tương đương là $L = 1,42 \text{ nH}$, $M = 1,42 \text{ nH}$, $C = 2,76 \text{ pF}$, $C' = 10 \text{ fF}$ và $R = 2,79 \text{ m}\Omega$. Các tham số của điện môi là $\delta = 0,025$; $\epsilon_r = 4,06$ và $\delta' = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r+1} \delta$. Z_{eff} và độ hấp thụ được tính toán dựa trên $S_{11} = \frac{Z_{eff}-1}{Z_{eff}+1}$ với MMs không có thành phần truyền qua. Có thể thấy rằng, kết quả tính toán,

mô phỏng và thực nghiệm có sự phù hợp tốt. Điều này cho thấy lý thuyết DEC hiệu quả và phù hợp khi tính toán phổ hấp thụ cho MPA có hiệu ứng cộng hưởng bậc cao.

1.3. Đặc tính điện từ của một số cấu trúc H-MPA

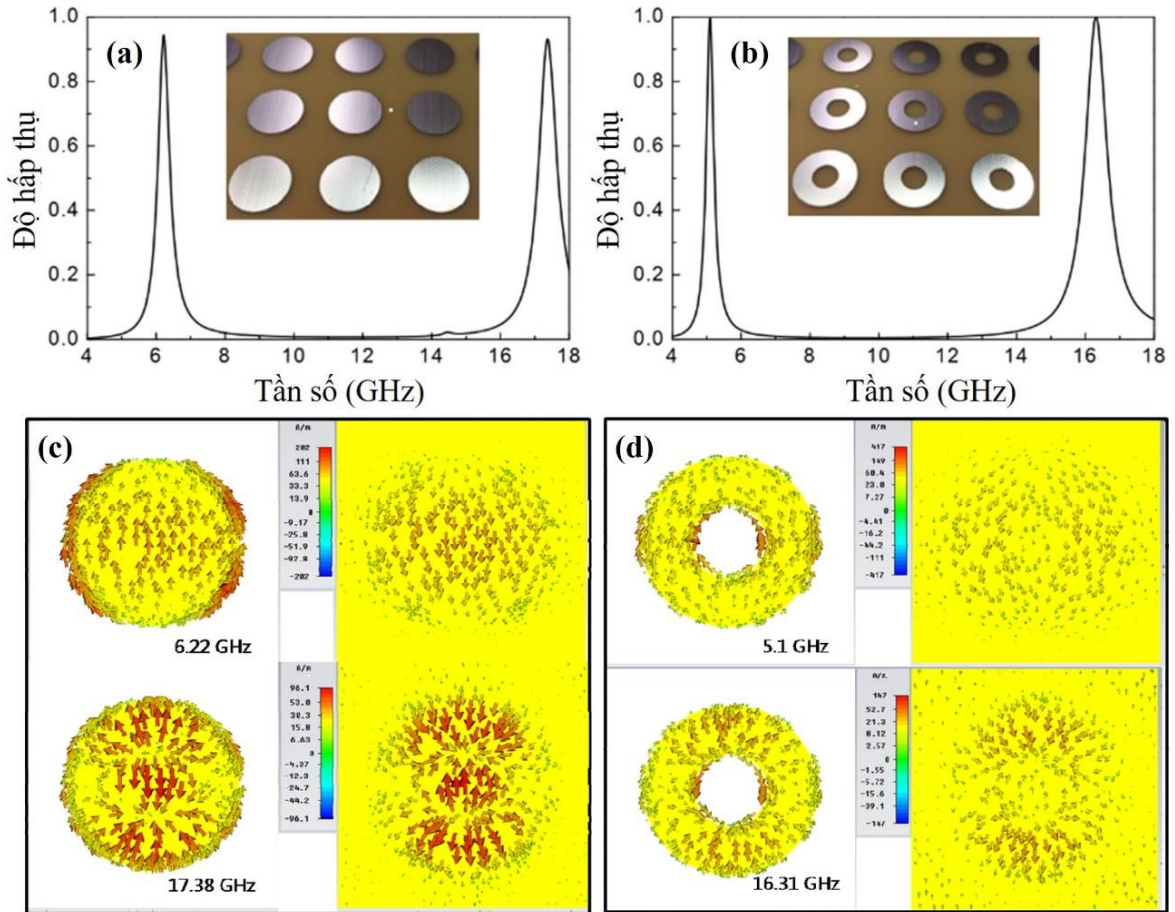
Tần số hấp thụ của MPA có thể được xác định bằng mạch điện tương đương LC với $f = 1/2\pi\sqrt{L_{eff}C_{eff}}$. Thông thường, một cấu trúc cộng hưởng có kích thước và hình dạng xác định sẽ dễ dàng đạt được một đỉnh hấp thụ duy nhất. Tuy nhiên, đã có một số nghiên cứu chứng tỏ rằng, có thể đạt được MPA bằng tần kép hoặc đa băng tần dựa trên cộng hưởng bậc cao khi thiết kế các cấu trúc cộng hưởng thích hợp.

Trong những năm gần đây, MPA hoạt động trong vùng THz đã nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu. Để thu được các MPA hoạt động trong vùng tần số THz, kích thước ô cơ sở của chúng phải nhỏ (cỡ μm), nên việc chế tạo có thể khá khó khăn. Nghiên cứu cho thấy rằng kích thước ô cơ sở của MPA hoạt động dựa trên cộng hưởng bậc cao tăng đáng kể so với trường hợp dựa trên cộng hưởng cơ bản. Điều này có thể hữu ích hơn nữa cho chế tạo với các cấu trúc diện tích lớn trong thực tế.

1.3.1. Cấu trúc đĩa tròn và vòng cộng hưởng hình tròn

Với ưu điểm đơn giản và dễ chế tạo, các H-MPA dựa trên các cấu trúc dạng đĩa tròn hoặc vòng cộng hưởng hình tròn đã được lựa chọn nghiên cứu. Y. J. Yoo và cộng sự đã đề xuất MPA băng tần kép dựa trên cấu trúc dạng đĩa tròn và dạng vòng nhẫn tròn có hiệu ứng cộng hưởng từ bậc cao [41]. Trong cả hai trường hợp, vật liệu đều có hai đỉnh hấp thụ trong dải tần số 4 - 18 GHz [Hình 1.14 (a) và (b)].

MPA dạng đĩa tròn cho hai đỉnh cộng hưởng tại các tần số 6,22 GHz và 17,38 GHz. Từ phân bố dòng điện cảm ứng trên các bề mặt kim loại của cấu trúc có thể xác định được nguồn gốc của các đỉnh hấp thụ. Tại 6,22 GHz, dòng điện tại hai mặt kim loại có chiều ngược nhau, tạo thành một lưỡng cực từ, chứng tỏ cộng hưởng từ cơ bản đã được kích thích. Tại 17,38 GHz, dòng điện được chia thành ba vùng, dòng điện trong hai vùng lân cận có chiều ngược nhau, đồng thời dòng điện tại mặt trên và mặt dưới trong mỗi vùng đó ngược chiều nhau [Hình 1.14(c)]. Như vậy, đỉnh hấp thụ tại 17,38 GHz có nguồn gốc từ cộng hưởng từ bậc ba. MPA có dạng vòng cộng hưởng hình tròn có hai đỉnh hấp thụ riêng biệt tại 5,1 GHz và 16,31 GHz. Tương tự như trên, nguồn gốc của hai đỉnh hấp thụ này cũng được suy ra từ phân bố dòng điện bề mặt, trong đó đỉnh hấp thụ ở 5,1 GHz có nguồn gốc từ cộng hưởng từ cơ bản và đỉnh cộng hưởng ở 16,31 GHz được hình thành do cộng hưởng từ bậc ba [Hình 1.14 (d)].

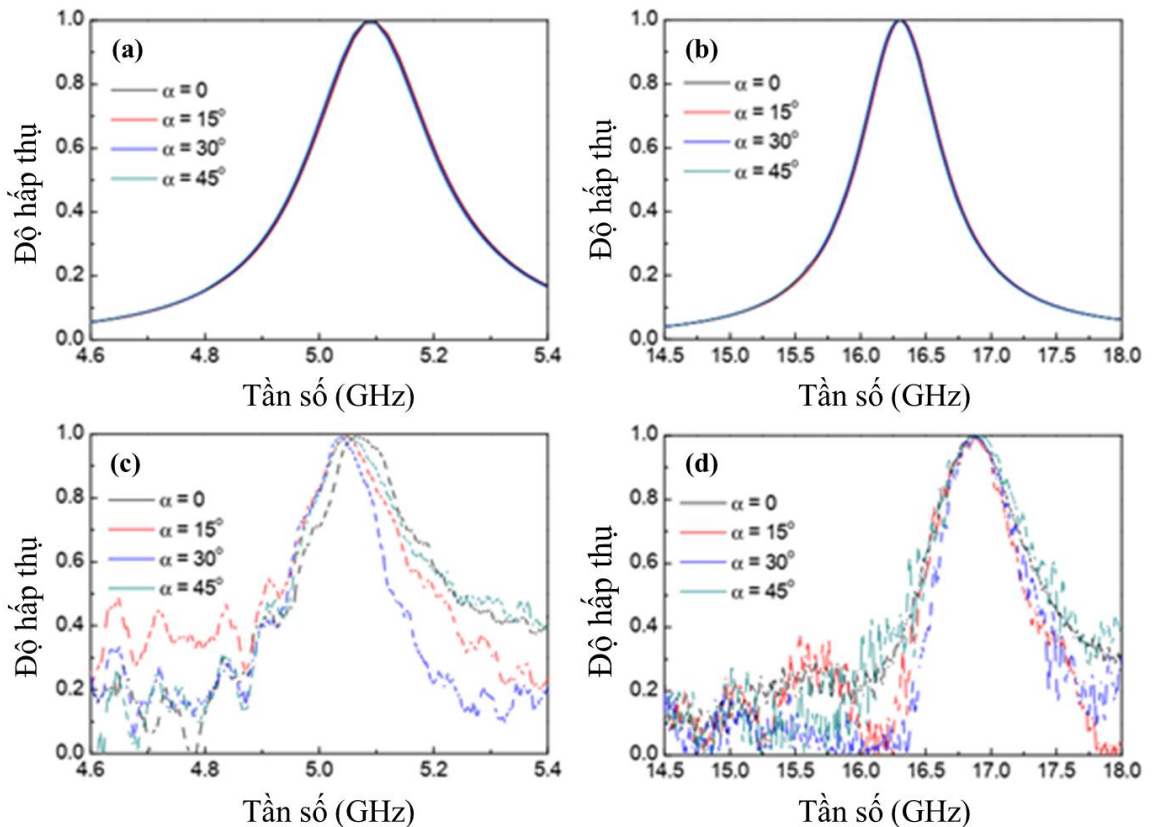


Hình 1.14. Phổ hấp thụ mô phỏng của MPA dạng đĩa tròn (a) và dạng vòng nhẫn tròn (b); c) và (d) phân bố dòng điện bề mặt tại các tần số hấp thụ khác nhau cho hai cấu trúc cộng hưởng tương ứng [41].

Về cường độ hấp thụ, MPA dựa trên cấu trúc dạng đĩa tròn có độ hấp thụ của cả hai đỉnh đều thấp hơn so với cấu trúc dạng vòng cộng hưởng. Do đó, nhóm tác giả đã tối ưu hóa các tham số cấu trúc của đĩa tròn nhằm nâng cao độ hấp thụ của hai đỉnh cộng hưởng này. Hai tham số được tối ưu bao gồm chu kỳ p và bán kính đĩa tròn r . Kết quả thu được giá trị tối ưu của bán kính là $r = 6,5$ mm. Khi giữ nguyên giá trị của bán kính r , nếu chu kỳ p tăng, độ hấp thụ và dòng điện bề mặt của đỉnh tần số thấp sẽ tăng, nếu chu kỳ p giảm, độ hấp thụ và dòng điện bề mặt của đỉnh hấp thụ ở tần số cao sẽ giảm. Hơn nữa, dòng điện bề mặt tập trung đáng kể ở khu vực trung tâm của đĩa đối với đỉnh tần số thấp khi $p = 14$ mm. Dòng điện này giảm khi tăng p và gần như biến mất khi $p = 22$ mm. Điều ngược lại xảy ra với đỉnh tần số cao; mật độ dòng điện được tăng cường đáng kể ở vùng rìa trong của đĩa khi $p = 22$ mm. Dòng điện này giảm khi p giảm và gần như biến mất khi $p = 14$ mm. Như vậy, dòng điện bề mặt gần tâm đĩa có vai trò quan trọng và để đạt được độ hấp thụ gần tuyệt đối cho cả hai đỉnh. Nhóm tác giả đã đi đến kết luận việc loại bỏ phần dòng điện đó là điều

cần thiết. Việc loại bỏ được thực hiện bằng cách khoét bỏ phần tâm đĩa tạo thành cấu trúc vòng cộng hưởng tròn. Kết quả, độ hấp thụ nhận được là lớn hơn 99,6% cho cả hai đỉnh. Điều này phù hợp với nhận xét về vai trò của dòng điện phân bố tại tâm của đĩa tròn đối với cường độ của các đỉnh hấp thụ.

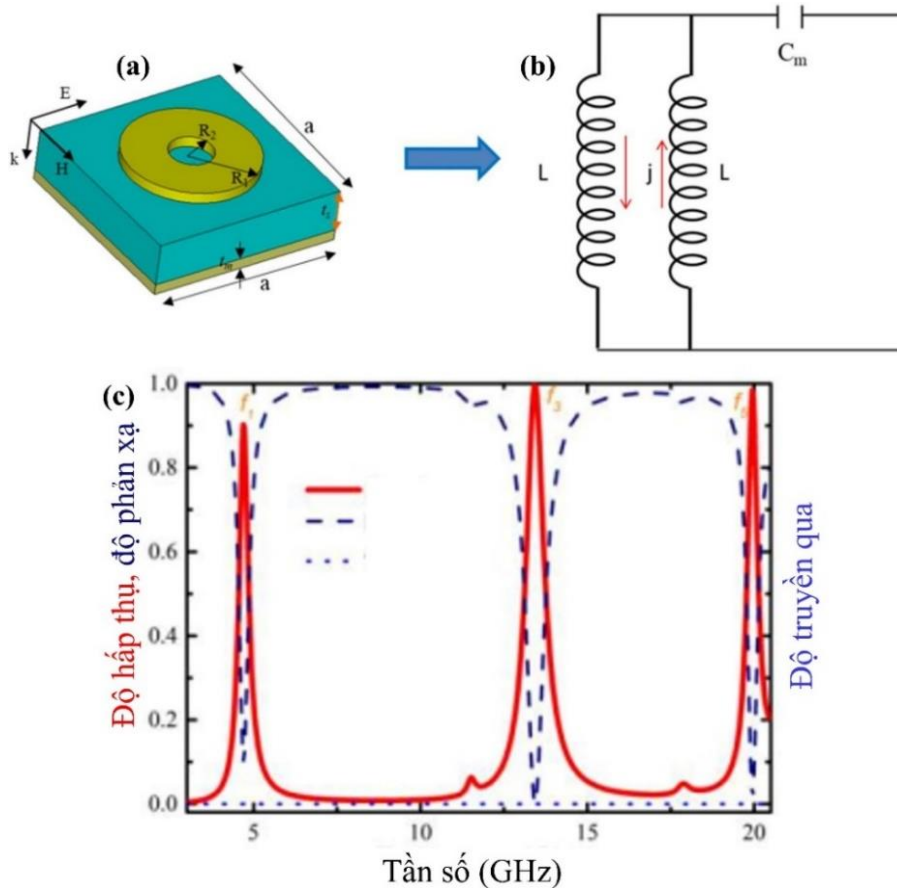
Hình 1.15 trình bày ảnh hưởng của góc phân cực đối với phổ hấp thụ của MPA có cấu trúc vòng cộng hưởng tròn. Kết quả mô phỏng cho thấy khi góc phân cực của sóng điện từ được thay đổi từ 0° đến 45° , cả hai đỉnh hấp thụ (cơ bản và bậc ba) hầu như không bị ảnh hưởng. Do đó có thể nói rằng MPA đề xuất có đặc trưng hấp thụ độc lập với sự phân cực của sóng điện từ. Tuy nhiên, kết quả thực nghiệm cho thấy sự dịch chuyển nhỏ vị trí của đỉnh hấp thụ khi góc phân cực thay đổi. Sự dịch chuyển nhỏ này được giải thích là do khi thực hiện phép đo phổ hấp thụ, góc tới sóng điện từ là 5° mà không phải là 0° như trong mô phỏng.



Hình 1.15. (a), (b) Kết quả mô phỏng và (c), (d) kết quả đo đạc phổ hấp thụ quanh hai vùng cộng hưởng của MPA dạng vòng cộng hưởng kín dưới các góc phân cực khác nhau[41].

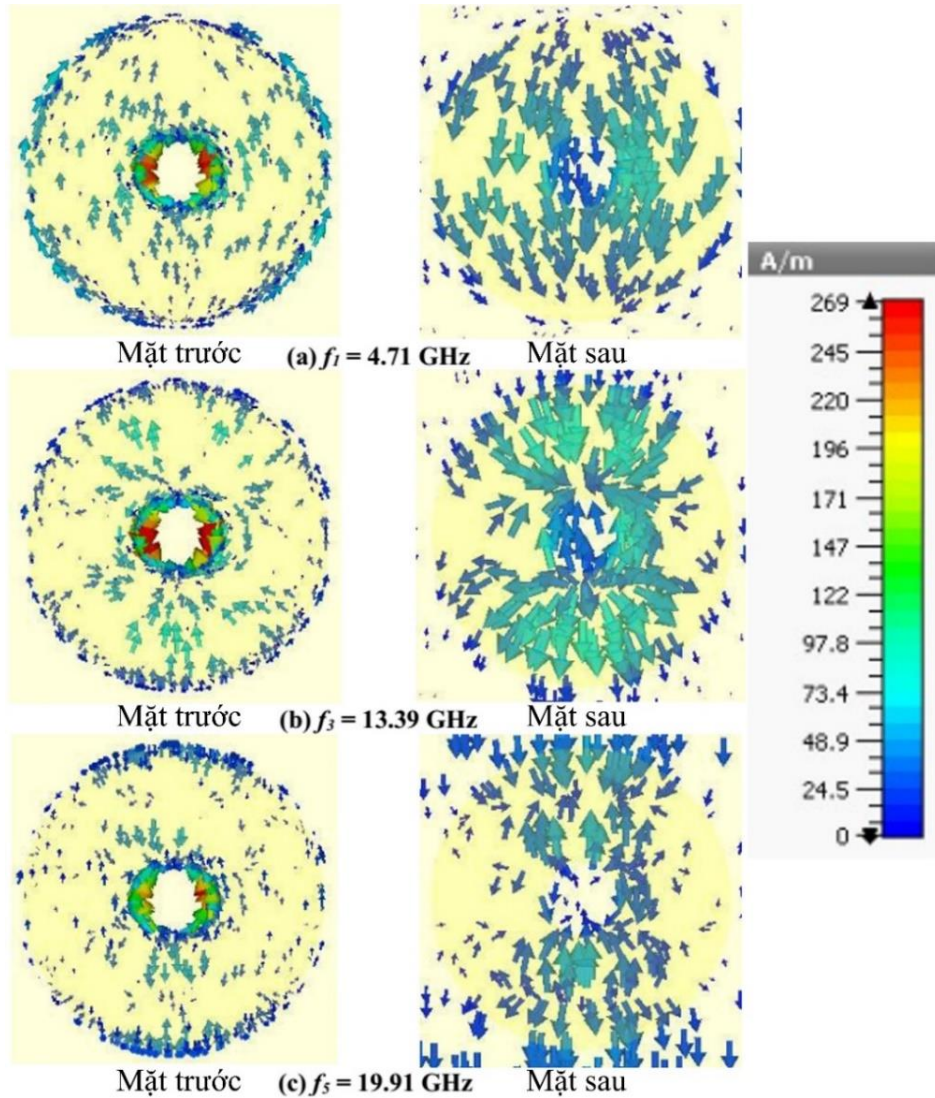
MPA có cấu trúc vòng cộng hưởng cũng được nhóm nghiên cứu của N. T. Hien khảo sát. Kết quả cho thấy khi tối ưu tham số cấu trúc của vòng cộng hưởng hình tròn, có thể thu được MPA đa đỉnh [96]. Trong nghiên cứu này, cấu trúc đề xuất

có cấu tạo gồm ba lớp: lớp các vòng cộng hưởng kín làm từ đồng sắp xếp tuần hoàn với chu kỳ a , được đặt trên lớp điện môi FR-4 có độ dày t_s và dưới cùng là lớp kim loại đồng liên tục (Hình 1.16). Giá trị tối ưu của các tham số này là $a = 18$ mm, $t_s = 0,8$ mm, $R_1 = 8,2$ mm và $R_2 = 2$ mm. Sau khi tối ưu, MPA có ba đỉnh hấp thụ tại 4,71 GHz (90%), 13,39 GHz (100%) và 19,91 GHz (99,33%) [Hình 1.16(c)].

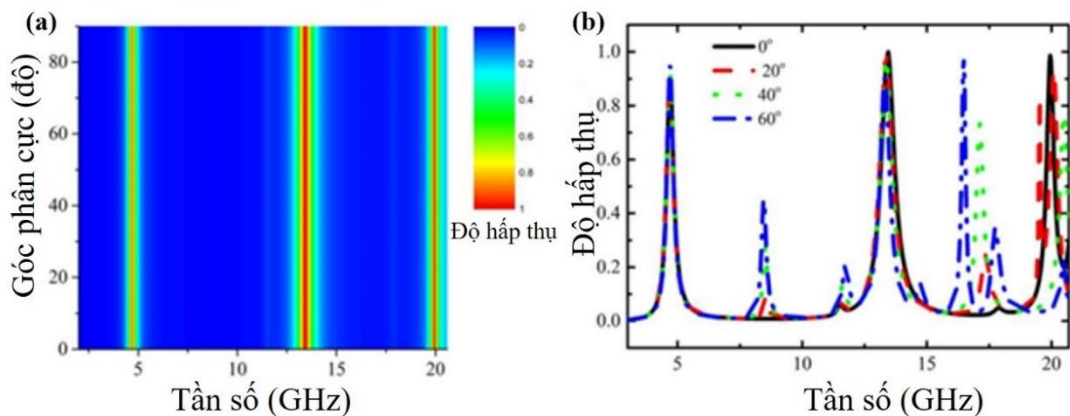


Hình 1.16. (a) Minh họa cấu trúc ô cơ sở của MPA và (b) mô hình mạch LC của nó ở cộng hưởng từ cơ bản, (c) phổ hấp thụ, truyền qua và phản xạ mô phỏng [96].

Nguồn gốc của các đỉnh cộng hưởng trên được làm rõ thông qua phân bố dòng điện trên các bề mặt kim loại của ô cơ sở (Hình 1.17). Có thể thấy rằng tại cả ba tần số $f_1 = 4,71$, $f_3 = 13,39$ và $f_5 = 19,91$ GHz dòng điện bề mặt trên hai lớp kim loại ngược chiều nhau. Điều này có nghĩa là cả ba đỉnh hấp thụ đều có nguồn gốc từ cộng hưởng từ. Ở tần số 4,71 GHz, dòng điện bề mặt có dạng lưỡng cực nên có thể kết luận đây là mode cộng hưởng từ cơ bản. Ở 13,39 GHz [Hình 1.17(b)], dòng điện bề mặt chủ yếu nằm ở tâm của cấu trúc cộng hưởng và được chia thành ba vùng, tạo thành ba dòng điện tròn, chứng tỏ cộng hưởng từ bậc ba đã được kích thích tại tần số này, tạo thành đỉnh hấp thụ f_3 . Tương tự như vậy, tại tần số 19,91 GHz, năm vòng dòng điện tròn được tạo ra, xác nhận rằng cộng hưởng từ bậc năm đã được kích thích.



Hình 1.17. Minh họa phân bố dòng điện bề mặt của MPA ở các tần số cộng hưởng khác nhau [96].



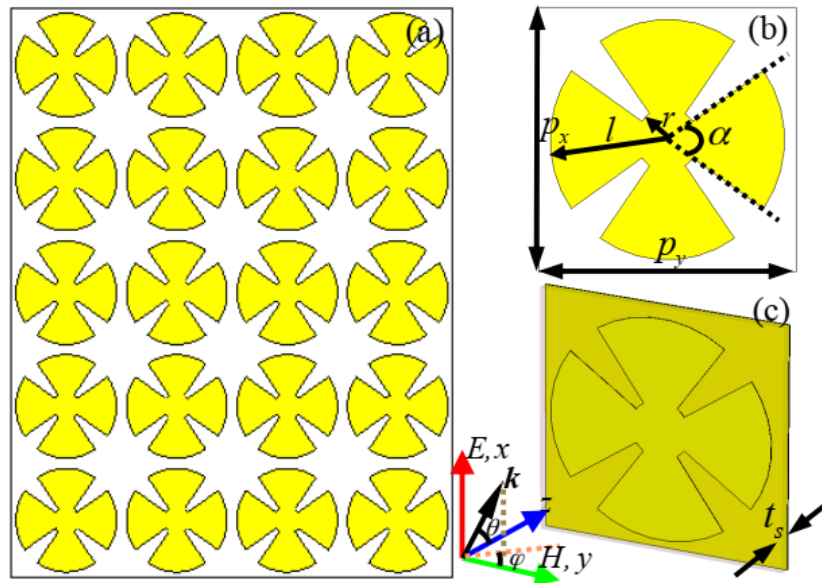
Hình 1.18. Phổ hấp thụ phụ thuộc (a) góc phân cực và (b) góc tới [96].

Đặc trưng hấp thụ độc lập đối với sự phân cực của sóng điện từ được xác nhận trong Hình 1.18 (a). Khi góc phân cực tăng từ 0 lên 90°, cường độ hấp thụ tại f_1 , f_3 và f_5 không thay đổi. Ngoài ra, ảnh hưởng của góc tới đến độ hấp thụ cũng được thể hiện trong Hình 1.18(b). Có thể thấy rằng phổ hấp thụ ít phụ thuộc vào góc tới đối với các

góc tới nhỏ (trong khoảng từ 0° đến 20°). Độ hấp thụ của các đỉnh f_1 và f_3 không thay đổi khi góc tới tăng từ 0° lên 40° . Tuy nhiên, đỉnh hấp thụ tại f_5 có cường độ thay đổi đáng kể khi góc tới tăng lên, đồng thời có xuất hiện một số đỉnh hấp thụ mới. Các đỉnh hấp thụ mới xuất hiện là do việc tăng góc tới sẽ làm thay đổi trở kháng hiệu dụng của MPA và tạo ra sự bất đối xứng.

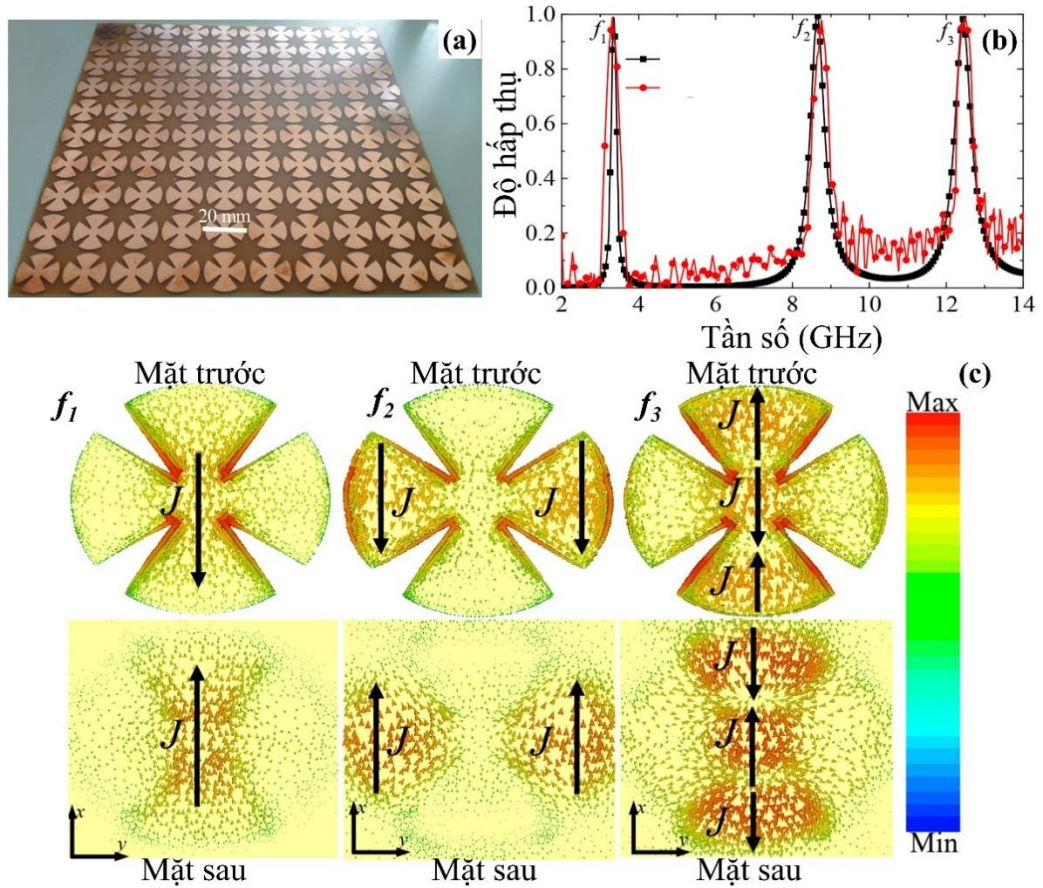
1.3.2. Cấu trúc đĩa tròn bị cắt

Cấu trúc cộng hưởng dạng đĩa tròn bị cắt cũng có thể cho hiệu ứng cộng hưởng bậc cao và tạo ra hấp thụ đa đỉnh [40]. Cấu trúc ô cơ sở của MPA đề xuất được mô tả trên Hình 1.19. Để thấy rằng MPA đề xuất có cấu trúc ba lớp: hai lớp kim loại được làm từ đồng được xen kẽ bởi lớp điện môi FR-4. Ở mặt trước của MPA gồm có các đĩa tròn kim loại bị cắt, với giá trị tối ưu của các tham số hình học là $p_x = p_y = 20$ mm, $t_s = 0,8$ mm, $r = 2,4$ mm, $l = 9$ mm, và $\alpha = 70^\circ$.

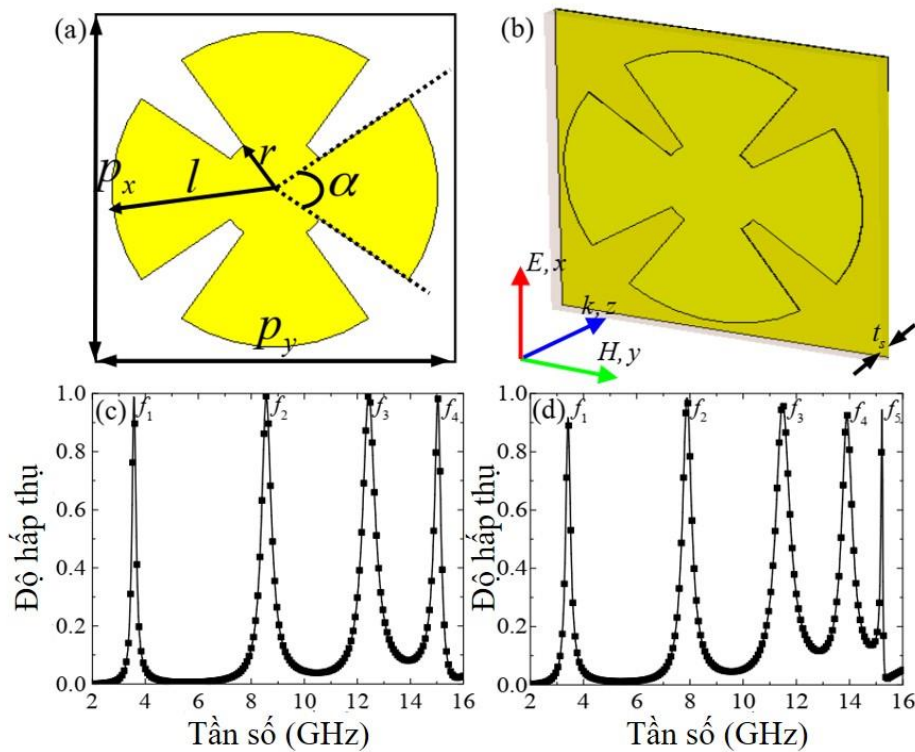


Hình 1.19. Cấu trúc MPA được đề xuất [40].

MPA được đề xuất có ba đỉnh hấp thụ [Hình 1.20 (b)]. Phân bố dòng điện bề mặt tại các tần số hấp thụ được trình bày trên Hình 1.20 (c) cho thấy, tại đỉnh hấp thụ thứ nhất và thứ hai, dòng điện cảm ứng tại hai mặt kim loại của cấu trúc có chiều ngược nhau. Tại đỉnh hấp thụ thứ nhất, dòng điện cảm ứng tập trung tại khu vực trung tâm của cấu trúc cộng hưởng, tại đỉnh hấp thụ thứ hai dòng điện cảm ứng tập trung tại hai bên rìa của cấu trúc cộng hưởng. Điều này xác nhận rằng hai đỉnh hấp thụ này có nguồn gốc từ cộng hưởng từ cơ bản. Tại đỉnh hấp thụ thứ ba, dòng điện cảm ứng được chia thành ba vùng, trong đó dòng điện trong hai vùng lân cận ngược chiều nhau, đồng thời dòng điện tại mặt trên và mặt dưới của mỗi vùng có chiều ngược nhau, điều này cho thấy đỉnh hấp thụ này có nguồn gốc từ cộng hưởng từ bậc ba.

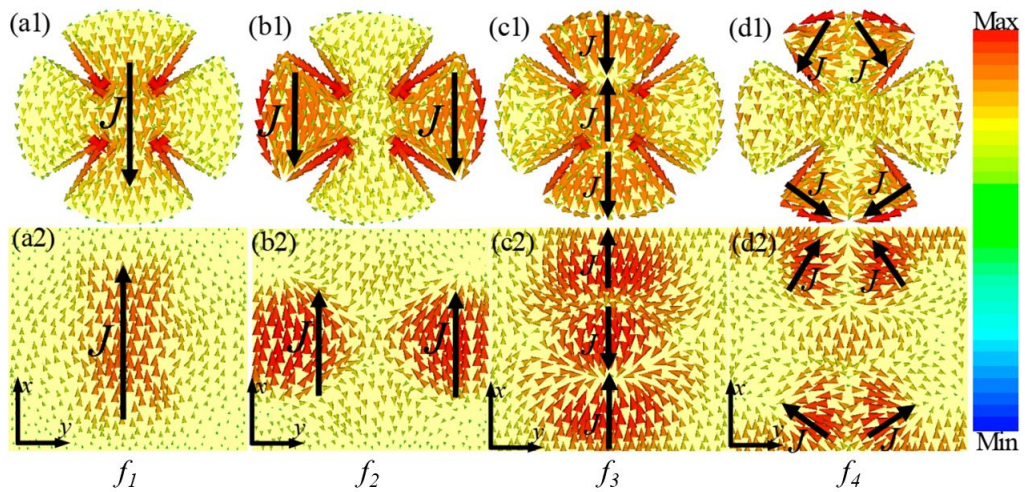


Hình 1.20. (a) Mẫu MPA chế tạo được, (b) phổ hấp thụ của MPA đề xuất, (c) phân bố dòng điện bề mặt tại các đỉnh hấp thụ của MPA [40].

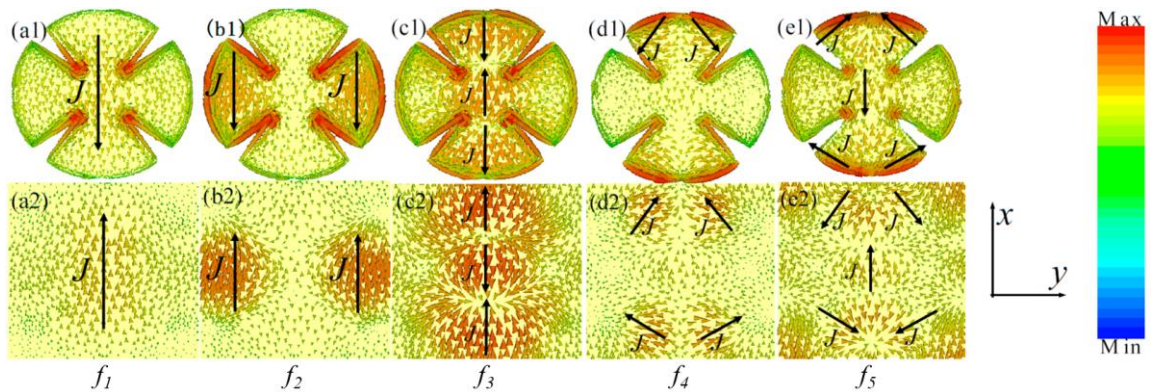


Hình 1.21. Cấu trúc ô cơ sở của MPA (a) và (b), phổ hấp thụ của MPA với các tham số hình học khác nhau (c) và (d) [40].

Số lượng các đỉnh hấp thụ của MPA được đề xuất có thể điều chỉnh được bằng cách thay đổi các thông số hình học thích hợp của cấu trúc ô cơ sở [Hình 1.21 (a) và (b)]. Khi các tham số hình học được chọn là $t_s = 1 \text{ mm}$, $r = 3 \text{ mm}$, $l = 9,3 \text{ mm}$, và $\alpha = 70^\circ$, MPA có bốn đỉnh hấp thụ như mô tả trên Hình 1.21 (c). Khi các tham số hình học được chọn là $t_s = 1,3 \text{ mm}$, $r = 3,5 \text{ mm}$, $l = 9,6 \text{ mm}$, và $\alpha = 75^\circ$, MPA có năm đỉnh hấp thụ [Hình 1.21 (d)]. Phân bố dòng điện bề mặt tại các đỉnh hấp thụ của MPA được mô tả trên Hình 1.22 và Hình 1.23. Có thể thấy rằng, đỉnh hấp thụ đầu tiên, ở tần số thấp nhất tương ứng với cộng hưởng từ cơ bản, còn các đỉnh hấp thụ ở phía tần số cao hơn tương ứng với các cộng hưởng từ bậc cao.



Hình 1.22. Phân bố dòng điện bề mặt tại các tần số hấp thụ của MPA cho trường hợp phổ hấp thụ có 4 đỉnh [40].



Hình 1.23. Phân bố dòng điện bề mặt tại các tần số hấp thụ của MPA cho trường hợp phổ hấp thụ có 5 đỉnh [40].

1.4. Cải tiến hoạt động của MPA dựa trên tính đàn hồi của vật liệu

Ngày nay, việc phát triển các thiết bị linh hoạt ngày càng được quan tâm nghiên cứu do các ứng dụng tiềm năng của chúng trong màn hình, thiết bị điện tử cá nhân, cũng như trong lĩnh vực điều trị y tế [97]. Do đó, để cải tiến hoạt động của MPA, hướng tới việc đa dạng hóa các ứng dụng của chúng trong nhiều lĩnh vực khác

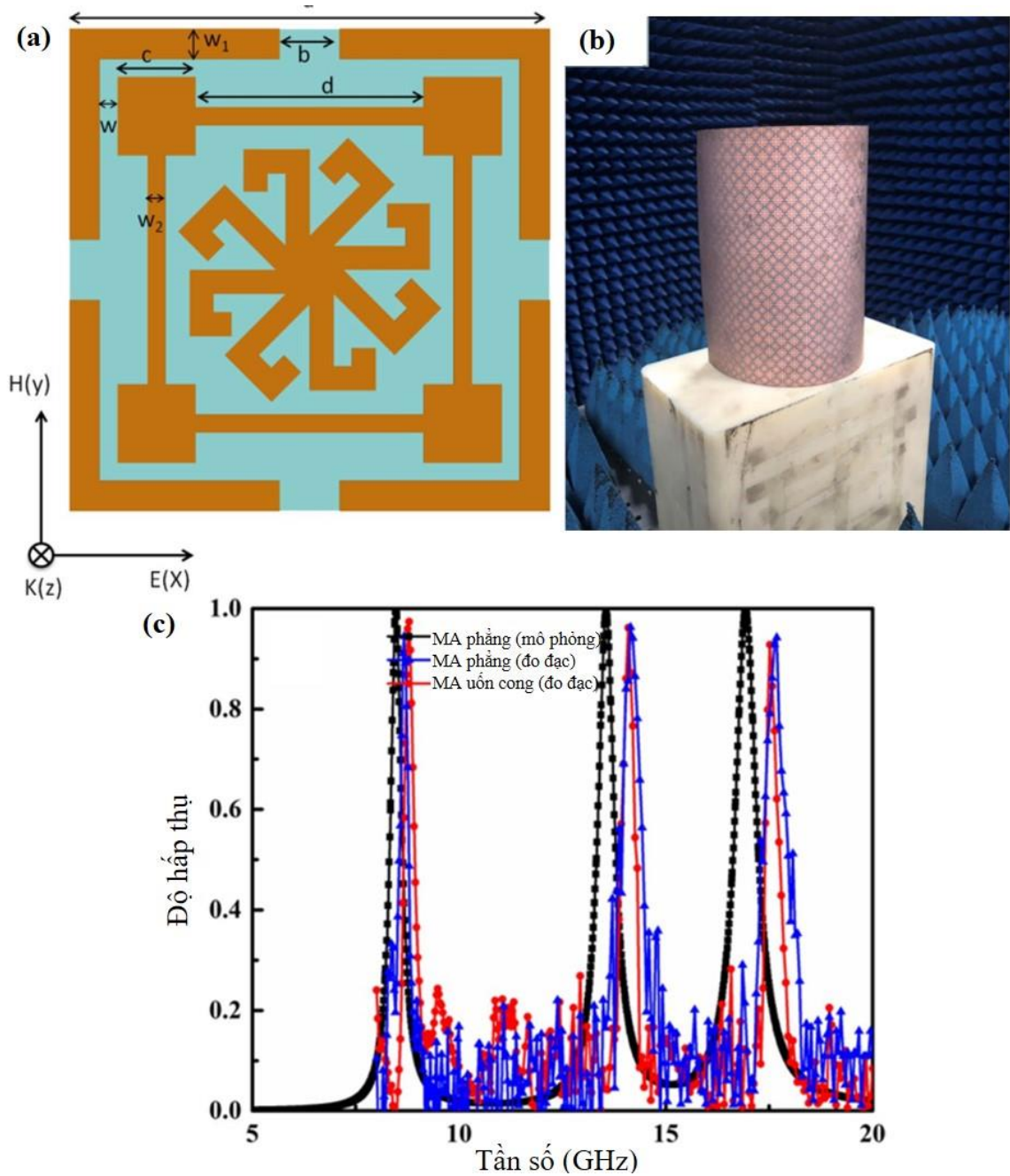
nhau, các thành phần phẳng, rắn của MPA có thể được bằng các vật liệu có tính đàn hồi. Lớp điện môi đàn hồi cung cấp cho MPA khả năng uốn dẻo, giúp chúng có thể phủ lên các bề mặt không phẳng, gồ ghề trong các ứng dụng thực tế. Ngoài ra, MPA đàn hồi có khả năng thay đổi hình dạng, tham số cấu trúc một cách linh hoạt. Từ đó, tần số hoạt động của MPA có thể được điều chỉnh thông qua biến dạng cơ học một cách chủ động mà không cần phải tích hợp bộ truyền động bên ngoài hoặc điện áp phân cực. Bên cạnh đó, các cấu trúc cộng hưởng được chế tạo trên lớp điện môi đàn hồi có độ nhạy cao đối với các tham số cấu trúc, cho phép cảm nhận được những thay đổi nhỏ về kích thước một cách dễ dàng. Do vậy, khả năng điều khiển đặc tính điện từ của MPA bằng tác động cơ học đã được nghiên cứu cho các ứng dụng khác nhau như cảm biến, ăng-ten, công nghệ tàng hình, ra-đa ... [44,45,98-100].

1.4.1. MPA đàn hồi dựa trên lớp điện môi Polyimide

Polyimide là loại hợp chất polyme được tổng hợp bằng cách polyme hóa một dianhydrit thơm và một diamine thơm. Một số tính chất vật lý của Polyimide (DuPont™ Kapton® Type 100 HN Film, 25 μm) được trình bày trong Bảng 1.1. Trong khoảng nhiệt độ từ -196 đến 300°C, tính chất vật lý của Polyimide duy trì tốt. Bên cạnh khả năng chịu nhiệt tốt, Polyimide có độ bền cơ học cao, có khả năng cách điện và kháng hóa chất tốt nên nó được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, trong đó có pin mặt trời, mạch in dẻo. Gần đây, Polyimide đã được sử dụng rộng rãi trong việc chế tạo các MPA có tính năng đàn hồi (trở lại trạng thái phẳng sau khi ngừng tác động uốn cong), mở rộng tiềm năng ứng dụng của MPA trong thực tế [46,101].

Bảng 1.1. Tính chất vật lý của *Polyimide* (DuPont™ Kapton® Type 100 HN Film, 25 μm)

Tính chất vật lý	Đơn vị	23°C	200°C	Phương pháp đo
Độ bền kéo	MPa	231	139	ASTM D-882-91, Method A ^a
Ứng suất để tạo ra độ giãn dài 5%	MPa	90	61	ASTM D-882-91
Độ dẫn dài khi đứt (Ultimate Elongation)	%	72	83	ASTM D-882-91
Mô đun kéo	GPa	2,5	2,0	ASTM D-882-91
Độ bền gập (MIT)	Cycles	285000		ASTM D-2176-89
Khối lượng riêng	g/cm^3	1,42		ASTM D-1505-90

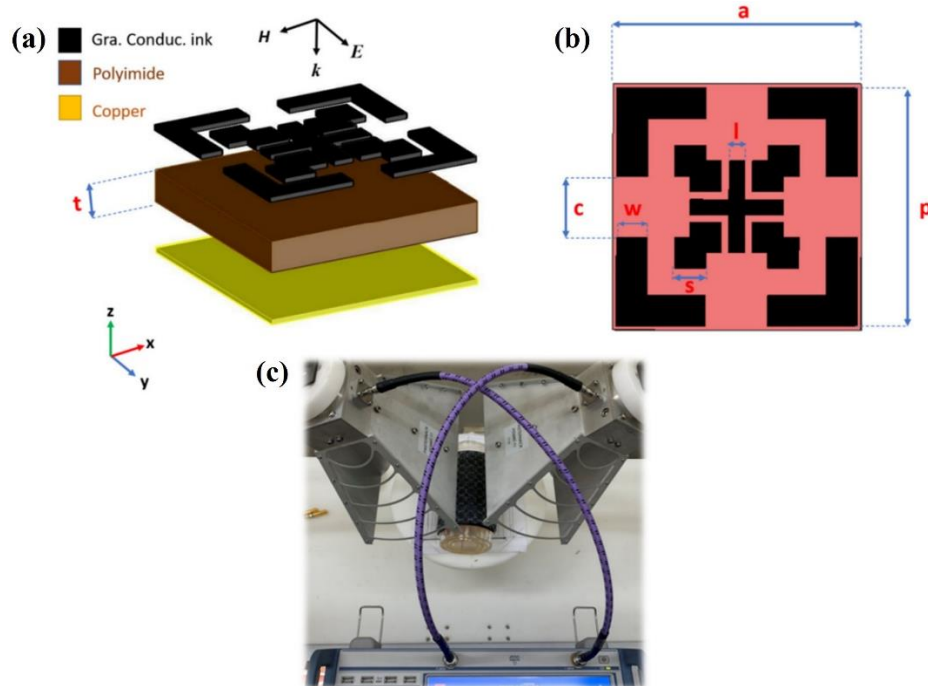


Hình 1.24. (a) Ô cơ sở của MPA dựa trên điện môi Polyimide, (b) MPA được uốn cong, (c) phổ hấp thụ khi ở trạng thái phẳng và uốn cong [102].

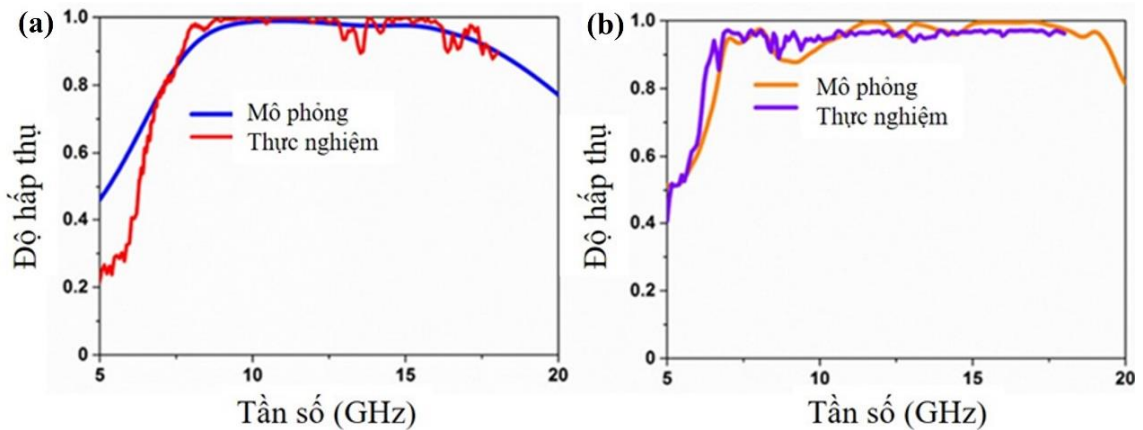
Hình 1.24 mô tả mẫu MPA sử dụng điện môi là Polyimide có khả năng uốn cong tốt [102]. Như được minh họa trên Hình 1.24 (b), MPA được uốn cong và gắn vào một hình trụ có bán kính 8 cm. Kết quả cho thấy phổ hấp thụ của vật liệu vẫn được duy trì tốt khi ở trạng thái uốn cong với độ hấp thụ của các đỉnh trước và sau khi uốn cong thay đổi rất ít [Hình 1.24(c)]. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong việc ứng dụng vật liệu trong các trường hợp bề mặt không phẳng.

Polyimide có tính tương thích cao với các loại mực in dẫn điện, do đó nó được sử dụng trong MPA có lớp kim loại được thay thế bởi mực in dẫn điện graphene

[101]. MPA này có cấu trúc bao gồm: một lớp mực in graphene dẫn điện có điện trở bề mặt $70 \Omega/\text{sq}$, một lớp điện môi Polyimide ở giữa và một tấm đồng liên tục ở mặt sau (Hình 1.25). Giá trị tối ưu hóa của các tham số kích thước là $a = 16,0$; $p = 15,5$; $c = 4,0$; $w = 2,0$; $l = 1,0$ và $s = 2,0$ mm. Ở dạng phẳng, MPA hấp thụ dải rộng, độ hấp thụ trên 90% trong dải tần từ 7,88 đến 18,01 GHz, cho thấy băng thông tuyệt đối là 10,13 GHz và độ rộng băng tần tỉ đối $FBW = 78,25\%$ [Hình 1.26 (a)]. Hình 1.26 (b) mô tả phổ hấp thụ của MPA khi được uốn cong với bán kính 40 mm. Độ hấp thụ trên 90% trong khoảng từ 6,7 đến 19,8 GHz ($FBW = 98,88\%$). Kết quả thực nghiệm trong trường hợp này cũng phù hợp tốt với kết quả mô phỏng.



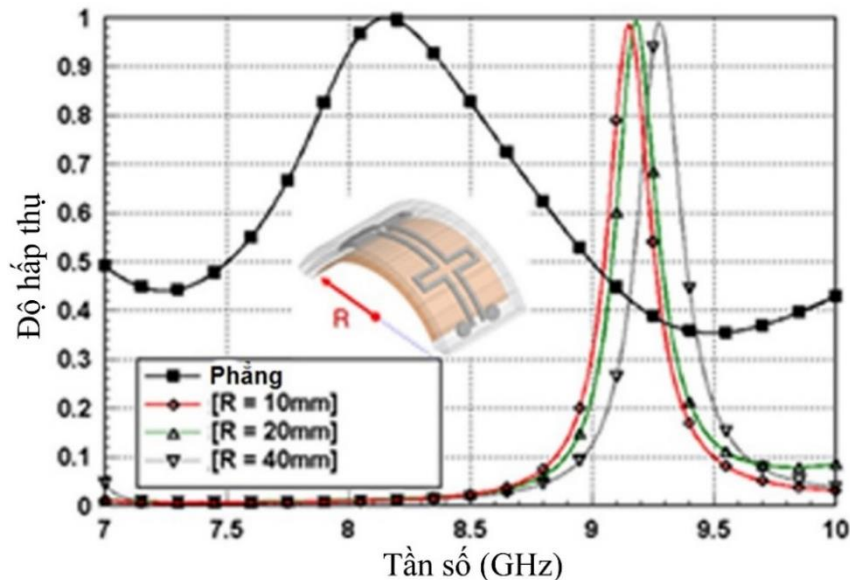
Hình 1.25. (a) Cấu trúc ô cơ sở và (b) mặt trên của cấu trúc MPA, (c) thiết lập phép đo tham số tán xạ của MPA khi được uốn cong [101].



Hình 1.26. Phổ hấp thụ của (a) MPA ở dạng phẳng và (b) MPA được uốn cong với bán kính uốn cong là 40 mm [101].

1.4.2. MPA đàn hồi dựa trên lớp điện môi Polydimethylsiloxane (PDMS)

Polydimethylsiloxane (PDMS) là một polymer có các thuộc tính độc đáo như năng lượng bề mặt thấp, khả năng tương thích sinh học và tính đàn hồi tốt. Nhiệt độ hoạt động bình thường của PDMS nằm trong khoảng - 50 °C đến 200 °C [103]. Là một polymer đàn hồi, PDMS có thể dễ dàng uốn cong và phủ lên các cấu trúc không phẳng. Ngoài ra, PDMS phù hợp với các kỹ thuật chế tạo micro/nano thông thường và tiên tiến như kỹ thuật quang khắc. Các đặc tính như mô đun Young thấp ($7,5 \times 10^{-4}$ GPa) và tổn thất hấp thụ thấp (13 cm^{-1} ở 1 THz) khiến PDMS trở thành chất nền điện môi thích hợp cho MPA đàn hồi, có thể điều khiển được. Bản chất đàn hồi cao của PDMS làm cho nó trở thành một vật liệu khả thi cho MPA điều khiển chủ động thông qua các biến dạng cơ học. Hơn nữa, đặc tính trong suốt trên một phạm vi rộng của phổ điện từ làm cho nó phù hợp cho các ứng dụng băng tần rộng.

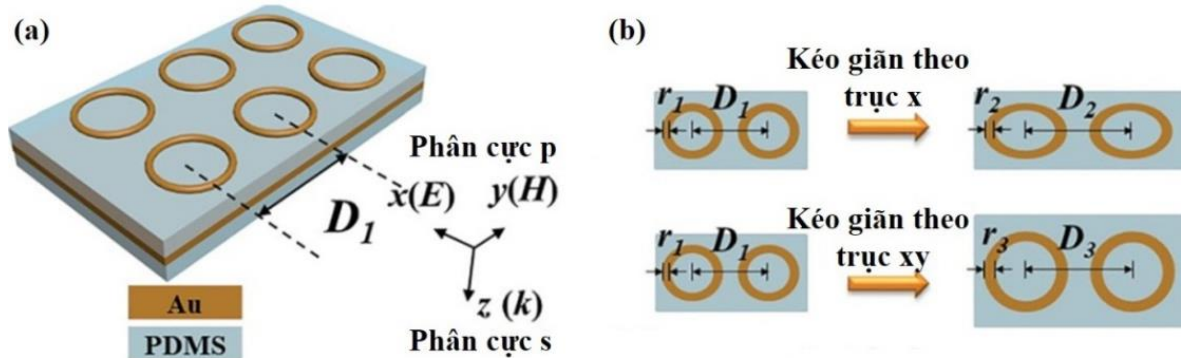


Hình 1.27. Minh họa MPA sử dụng điện môi PDMS và phổ hấp thụ của vật liệu đề xuất khi bị uốn cong [104].

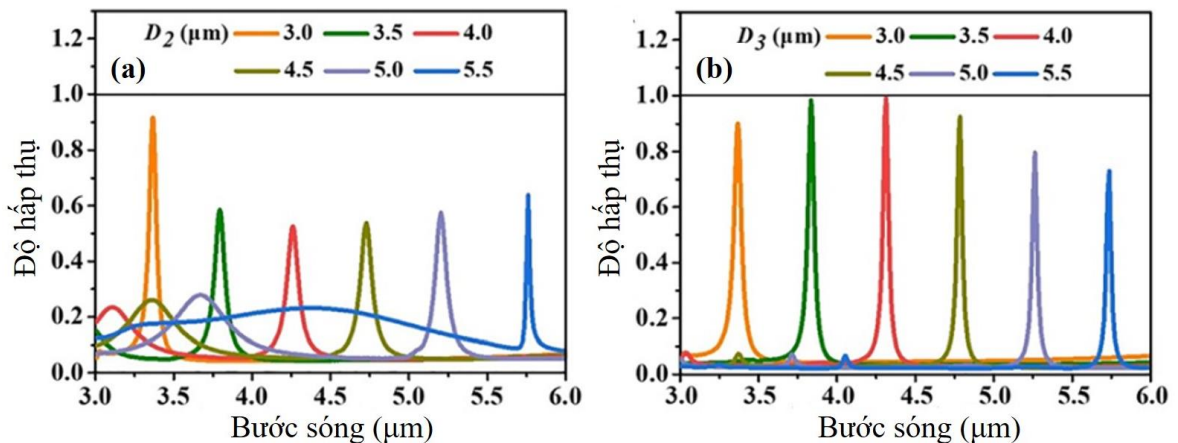
Hình 1.27 mô tả cấu trúc của một MPA đàn hồi hoạt động trong vùng tần số GHz có lớp điện môi được làm từ PDMS. Vì PDMS có khả năng đàn hồi tốt, đặc tính hấp thụ của vật liệu có thể được điều khiển bằng cách thay đổi độ uốn cong. Khi vật liệu ở trạng thái phẳng, nó có đỉnh hấp thụ ở 8,82 GHz với độ hấp thụ xấp xỉ 100%. Khi được uốn cong, độ hấp thụ có sự thay đổi không đáng kể, tuy nhiên đỉnh hấp thụ bị dịch chuyển về phía tần số cao hơn, đồng thời phổ hấp thụ hẹp hơn trường hợp phẳng [104].

Ngoài khả năng uốn cong, PDMS còn có khả năng kéo dãn. Hình 1.28 trình bày cấu trúc hình học của MPA có lớp điện môi làm từ PDMS có khả năng điều khiển bằng tác động kéo dãn cấu trúc theo các trục khác nhau [105]. Vật liệu có cấu trúc gồm các vòng cộng hưởng tròn sắp xếp tuần hoàn với chu kỳ D_1 , độ rộng của vòng

cộng hưởng là r_1 . Các vòng cộng hưởng được làm từ vàng và phủ trên lớp điện môi PDMS. Vật liệu đề xuất có thể được kéo dài theo các hướng khác nhau, dẫn đến sự thay đổi hình dạng và tham số hình học của cấu trúc cộng hưởng, làm thay đổi tần số hoạt động của nó.



Hình 1.28. (a) Minh họa cấu trúc của MPA sử dụng lớp điện môi PDMS có thể điều khiển bằng cách tác dụng lực kéo dài dọc theo hướng trục x và y , (b) minh họa cấu trúc hình học của MPA khi bị kéo giãn theo các trục khác nhau [105].



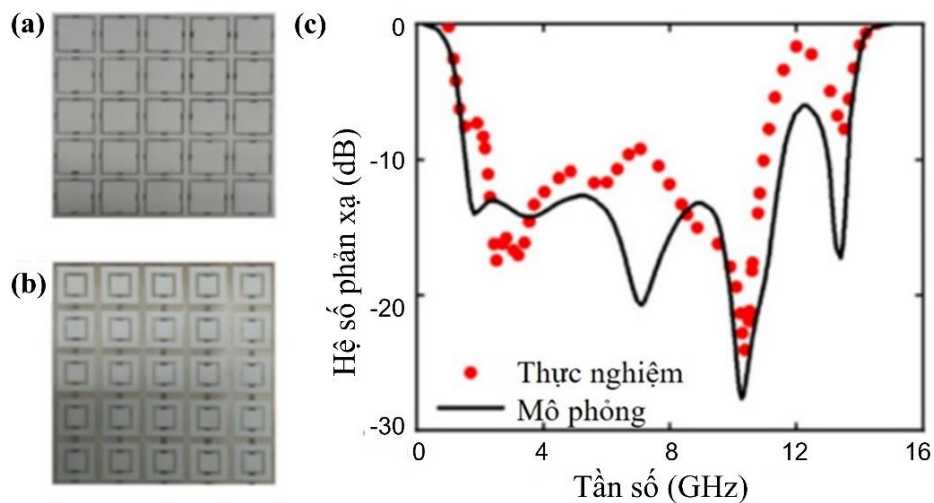
Hình 1.29. Minh họa khả năng điều khiển của MPA sử dụng lớp điện môi PDMS dưới tác dụng của lực kéo dài (a) dọc theo hướng trục x và (b) dọc theo hướng trục xy [105].

Hình 1.29 trình bày tóm tắt các kết quả mô phỏng về mối quan hệ giữa vị trí đỉnh cộng hưởng với các giá trị D_1 , r_1 thay đổi thành D_2 , r_2 và D_3 , r_3 dưới tác dụng kéo giãn theo các hướng khác nhau. Hình 1.29(a) chỉ ra rằng đỉnh hấp thụ dịch chuyển sang bước sóng dài hơn khi kéo dài vật liệu dọc theo trục x , tức là tăng chu kỳ sắp xếp cấu trúc cộng hưởng (D_2). Phạm vi điều chỉnh của vị trí cộng hưởng là $2,37 \mu\text{m}$ ứng với D_2 thay đổi từ $3,0 \mu\text{m}$ đến $5,5 \mu\text{m}$. Khi vật liệu bị kéo dài dọc theo trục xy , độ hấp thụ tăng lên khi chu kỳ D_3 tăng từ $3,0 \mu\text{m}$ đến $4,0 \mu\text{m}$, nếu tiếp tục kéo giãn làm D_3 tiếp tục tăng lên thì độ hấp thụ lại giảm xuống. Có thể thấy rõ ràng rằng hầu hết sóng điện từ tới được hấp thụ hoàn toàn trong vật liệu khi nó được kéo dài theo

trục xy với $D_3 = 4 \mu\text{m}$ ở bước sóng $4,3 \mu\text{m}$. Ngoài ra, khi kéo giãn cấu trúc theo trục xy thì vị trí đỉnh hấp thụ cũng dịch chuyển một lượng là $2,37 \mu\text{m}$ tương ứng với chu kỳ D_3 thay đổi từ $3,0 \mu\text{m}$ đến $5,5 \mu\text{m}$. Những kết quả này chứng tỏ rằng MPA đề xuất sở hữu khả năng điều chỉnh một cách chủ động mở ra tiềm năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như cảm biến hồng ngoại, máy đo biến dạng, cảm biến áp suất, v.v.

1.4.3. MPA đàn hồi có lớp điện môi làm từ giấy

Giấy là một trong những vật liệu được sử dụng rộng rãi trong đời sống hàng ngày, có thể sản xuất hàng loạt, có khả năng tái chế và phân hủy sinh học. Hơn nữa, giấy có thể dễ dàng được gấp hoặc uốn thành các hình dạng hình học khác nhau, đáp ứng các thiết kế đa dạng cho nhiều ứng dụng trong thực tiễn. Với những tính chất đó, giấy là một loại điện môi lý tưởng cho việc chế tạo MPA linh hoạt, mỏng và nhẹ, có các đặc tính điện từ có thể điều khiển được. Ngoài ra, quá trình chế tạo MPA có lớp điện môi bằng giấy không cần xử lý hóa học nên có giá thành rẻ hơn và thân thiện với môi trường hơn so với các MPA truyền thống được chế tạo dựa trên công nghệ bảng mạch in (PCB). Gần đây, các MPA có lớp điện môi làm từ giấy đã được đề xuất [106-109].

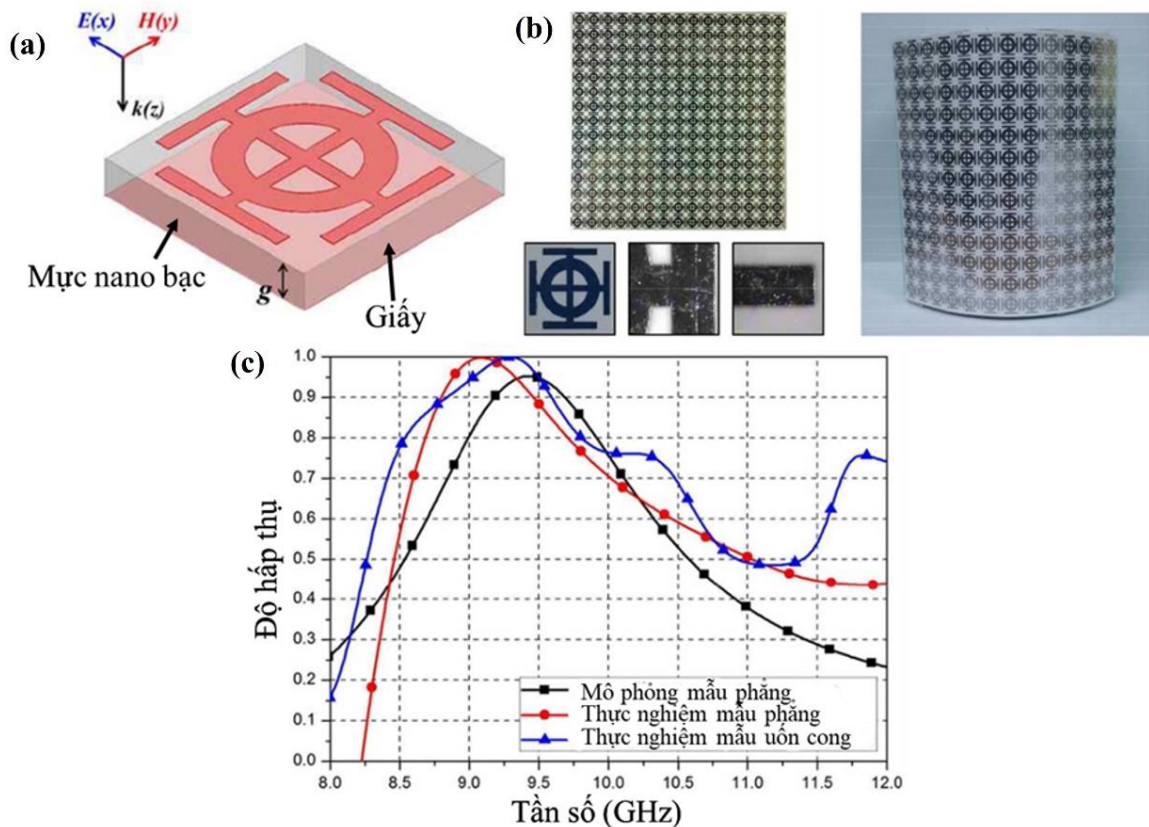


Hình 1.30. (a) Lớp trên và (b) lớp dưới của MPA có lớp điện môi làm từ giấy, (c) phổ phản xạ thực nghiệm với và mô phỏng của vật liệu [106].

Hình 1.30 (a) và (b) minh họa MPA đàn hồi, hấp thụ băng tần rộng [106]. Vật liệu này bao gồm một dãy các vòng cộng hưởng hình vuông được sắp xếp tuần hoàn in trên nền chất điện môi làm từ giấy. Ở vị trí giữa cạnh của mỗi hình vuông có một điện trở. Các cấu trúc cộng hưởng này được làm từ mực dẫn điện và in trực tiếp lên giấy. Các kết quả thực nghiệm và mô phỏng về độ phản xạ dưới sóng tới vuông góc được thể hiện trong Hình 1.30 (c). Có thể thấy rằng mẫu chế tạo đạt được độ hấp thụ

90% trong khoảng từ 2,1 GHz đến 10,5 GHz với FBW là 113% trong khi tổng khối lượng của nó chỉ là 58,3 g.

Mẫu vật liệu MPA trình bày trong Hình 1.31 có lớp điện môi làm từ giấy và lớp cộng hưởng kim loại phía trên được làm từ mực in nano bạc. Ở trạng thái phẳng, vật liệu có đỉnh hấp thụ tại 9,09 GHz (độ hấp thụ 99%) (thực nghiệm). Vì có lớp điện môi làm từ giấy, nhẹ và đàn hồi tốt, khi được uốn cong vật liệu vẫn duy trì tốt đặc tính hấp thụ, độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần số từ 8,84 GHz đến 9,58 GHz [109].



Hình 1.31. (a) Cấu trúc ô cơ sở của MPA có lớp điện môi làm từ giấy, (b) vật liệu chế tạo được ở trạng thái phẳng (bên trái) và uốn cong (bên phải), (c) phổ hấp thụ của vật liệu [109].

1.5. Kết luận chương 1

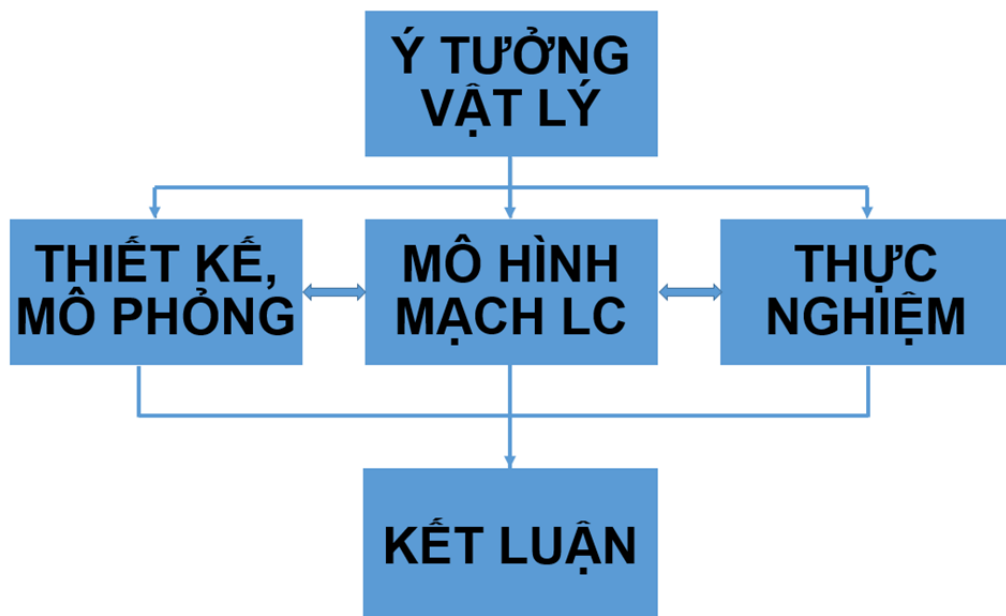
Để đạt được MPA đa dải tần cho một số ứng dụng trong thực tế, có thể sử dụng phương pháp sắp xếp đồng phẳng hoặc xếp chồng các cấu trúc cộng hưởng. Tuy nhiên, hai phương pháp này có hạn chế là sẽ làm tăng kích thước và khối lượng của cấu trúc. Do đó MPA đa băng tần dựa trên cộng hưởng bậc cao đã được quan tâm nghiên cứu với một số cấu trúc điển hình như cấu trúc CW, CWP, vòng cộng hưởng, đĩa tròn, hay đĩa tròn bị cắt ... Ngoài ra, từ kết quả khảo sát hiệu ứng cộng hưởng bậc cao bằng lý thuyết mạch tương đương, có thể kết luận rằng hiệu ứng cộng hưởng bậc

cao có thể xuất hiện và có thể kiểm soát được bởi các tham số hình học của cấu trúc cộng hưởng. Kết luận này cũng được kiểm chứng bằng thực nghiệm và mô phỏng với cấu trúc CWP và cấu trúc đĩa tròn có cộng hưởng bậc cao được tổng quan ở trên. Tuy nhiên, có thể nhận thấy rằng các H-MPA hiện tại chủ yếu được thiết kế với lớp điện môi làm từ FR-4 có tính đàn hồi kém. Có rất ít các nghiên cứu về H-MPA có lớp điện môi đàn hồi được báo cáo. Đồng thời, đỉnh cộng hưởng bậc cao nhạy với góc tới và các thay đổi của môi trường. Do đó, để mở rộng tiềm năng ứng dụng của H-MPA, một số hướng nghiên cứu tiếp theo cần được thực hiện như tích hợp các đế điện môi đàn hồi vào các H-MPA và tối ưu hóa cấu trúc để vật liệu có thể duy trì đặc tính hấp thụ tốt ngay cả khi sóng điện từ có góc tới lớn.

Xuất phát từ các kết luận trên, luận án tập trung nghiên cứu H-MPA tích hợp lên đế điện môi đàn hồi. Cụ thể, với điều kiện cơ sở vật chất của phòng thí nghiệm, luận án đã sử dụng lớp điện môi Polyimide nhằm cung cấp đặc tính đàn hồi cho vật liệu. Các tính chất điện từ của các H-MPA đàn hồi được khảo sát cho cả hai cấu hình phẳng và uốn cong. Bên cạnh đó, để đạt được mục tiêu thiết kế, chế tạo thành công vật liệu biến hóa hấp thụ đa băng tần, hoạt động trong các vùng tần số thấp và vùng THz, dựa trên các kết quả nghiên cứu đã công bố, luận án đã cải tiến các cấu trúc thông dụng như tấm kim loại hình vuông, vòng cộng hưởng tròn thành các cấu trúc tích hợp tụ điện, vòng cộng hưởng gấp khúc cho cộng hưởng bậc cao trong vùng tần số thấp (băng tần VHF đến băng tần X) và cấu trúc hình ngôi sao (hai hình vuông xoay lệch nhau 45 độ) cho băng tần THz.

Chương 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Với mục tiêu nghiên cứu đặc trưng điện từ của MPA cộng hưởng bậc cao và có tính năng đàn hồi, luận án được thực hiện dựa trên phương pháp nghiên cứu vật liệu biến hóa nói chung, đó là kết hợp các phương pháp tính toán, mô phỏng và thực nghiệm. Do đó, trong luận án này, đặc trưng điện từ của H-MPA được nghiên cứu theo các bước như sau: đầu tiên, dựa trên các kết quả nghiên cứu về H-MPA đã được công bố để đề xuất các ý tưởng vật lý. Xuất phát từ ý tưởng vật lý này, loại vật liệu và cấu trúc hình học của H-MPA được lựa chọn, thiết kế. Sau đó, các đặc trưng phản xạ, truyền qua, pha ... của H-MPA được mô phỏng bằng phần mềm CST. Song song với quá trình mô phỏng các đặc trưng điện từ, mô hình lý thuyết được xây dựng nhằm thu được các kết quả về tham số hiệu dụng của H-MPA. Các kết quả này cho biết sự phụ thuộc của các tham số hiệu dụng vào các tham số cấu trúc của vật liệu, đây là cơ sở quan trọng để tối ưu cấu trúc nhằm thu được các tính chất điện từ mong muốn. Bên cạnh đó, kết quả thu được từ mô hình lý thuyết hoàn toàn độc lập với các kết quả mô phỏng, do đó kết quả thu được từ hai phương pháp này sẽ được so sánh với nhau, tăng tính tin cậy của các kết quả thu được. Sau khi cấu trúc được tối ưu, mẫu vật liệu được chế tạo và tính chất điện từ của nó được đo đạc. Cuối cùng là so sánh kết quả mô phỏng, tính toán lý thuyết và đo đạc thực nghiệm để đánh giá và kết luận về đặc trưng điện từ của mẫu vật liệu đang nghiên cứu.



Hình 2.1. Sơ đồ các bước nghiên cứu H-MPA

2.1. Phương pháp mô phỏng tính chất điện từ của H-MPA đàn hồi

Các đặc trưng điện từ của MMs nói chung và H-MPA nói riêng có thể nhận được sử dụng các phần mềm mô phỏng như Computer Simulation Technology (CST

Mircrowave Studio), Ansys High-frequency Structure Simulator (HFSS) và Comsol. Trong các phần mềm này, mô hình MMs được xây dựng gồm các ô cơ sở. Dựa trên việc giải bài toán tương tác giữa sóng điện từ và vật liệu với các điều kiện biên được thiết lập một cách phù hợp sẽ thu được đặc trưng điện từ của vật liệu. Phần mềm CST đã được Viện Khoa học vật liệu mua bản quyền và khai thác rất hiệu quả từ năm 2014. Đồng thời, độ chính xác và hiệu quả của phương pháp mô phỏng đặc trưng điện từ bằng phần mềm CST đã được chứng minh qua các kết quả nghiên cứu đã công bố của nhóm nghiên cứu trong nước và quốc tế [28,29,110,111]. Do đó, luận án sẽ sử dụng phần mềm CST Microwave Studio để mô phỏng đặc trưng điện từ của H-MPA.

Vì H-MPA là được thiết kế bao gồm các cấu trúc không đồng nhất (kim loại - điện môi - kim loại sắp xếp xen kẽ nhau) có kích thước nhỏ hơn bước sóng hoạt động, do đó có thể sử dụng kỹ thuật tích phân hữu hạn (Finite Integration Technique – FIT) để tìm lời giải cho bài toán tương tác giữa sóng điện từ và H-MPA. Bản chất của kỹ thuật FIT là biến đổi phương trình Maxwell từ không gian liên tục đến không gian rời rạc [112]. Hệ phương trình Maxwell được viết dưới dạng sau:

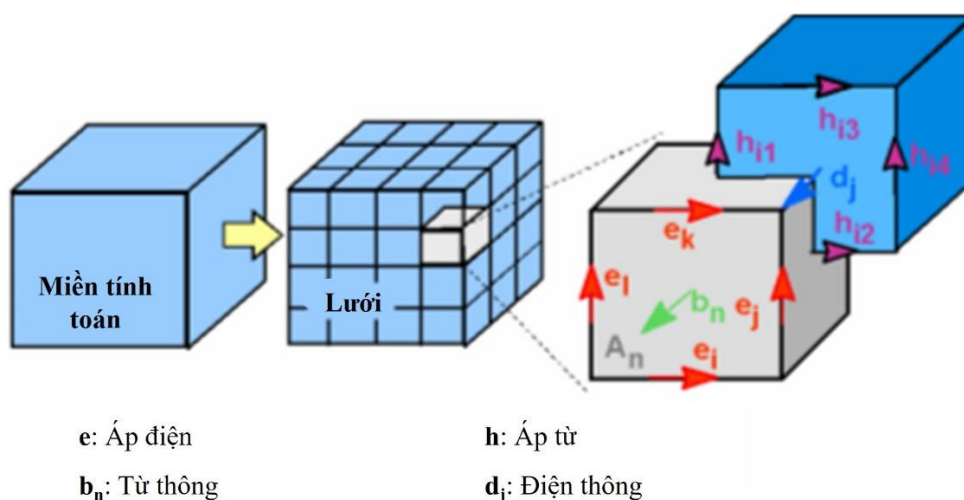
$$\oint_{\partial A} \vec{E} d\vec{S} = - \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{A} \quad (2.1)$$

$$\oint_{\partial V} \vec{D} d\vec{A} = \int_V \rho dV \quad (2.2)$$

$$\oint_{\partial A} \vec{H} d\vec{S} = \int_A \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) d\vec{A} \quad (2.3)$$

$$\oint_{\partial V} \vec{B} d\vec{A} = 0 \quad (2.4)$$

Để giải các phương trình này bằng kỹ thuật FIT, đầu tiên chúng ta cần xác định một miền tính toán hữu hạn có chứa bài toán đang được xem xét. Một hệ thống lưới phù hợp sẽ được thiết lập để chia miền tính toán hữu hạn này thành nhiều phần tử nhỏ hoặc các ô lưới. Có hai hệ thống lưới được thiết lập trực giao với nhau: lưới thứ nhất hay còn gọi là lưới sơ cấp (ta có thể quan sát hệ thống lưới này trong chế độ Mesh view của CST), trong đó áp điện được đặt trên các cạnh của lưới và từ thông được phân bố trên bề mặt của lưới này; lưới thứ hai hay còn gọi là lưới kép với áp từ được đặt trên các cạnh của lưới và điện thông phân bố trên bề mặt của lưới (Hình 2.2). Lúc này, các phương trình Maxwell được xây dựng cho từng ô lưới riêng biệt và kết quả sẽ thu được hệ phương trình lưới Maxwell.



Hình 2.2. Minh họa thiết lập lưới chính và lưới kép trong CST.

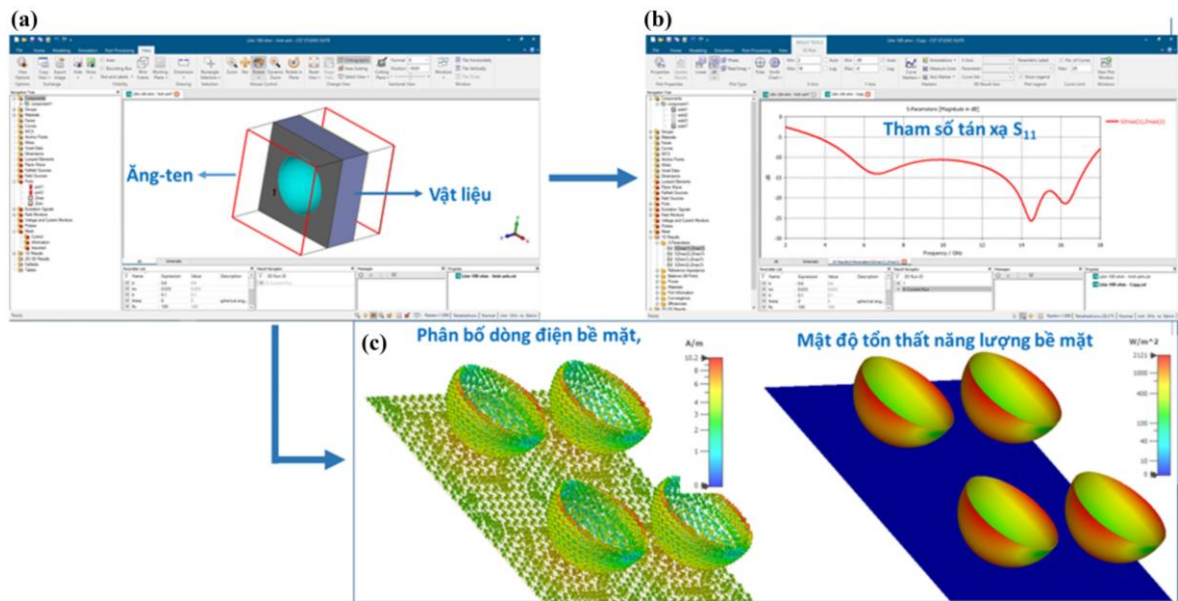
Trong phần mềm mô phỏng CST, hệ phương trình Maxwell có thể được giải theo hai phương pháp chính bao gồm Time Domain Solver, Frequency Domain Solver. Các phương pháp này được xây dựng nhằm tối ưu thời gian tính toán. Phương pháp Time Domain Solver cho phép mô phỏng tính chất của cấu trúc trong dải tần số rộng, phù hợp với hầu hết các cấu trúc, đặc biệt là các cấu trúc có điều kiện biên mở hoặc kích thước lớn. Phương pháp Frequency Domain Solver thích hợp cho việc mô phỏng các cấu trúc trung bình và nhỏ hoặc cấu trúc có băng tần hoạt động hẹp. Ngoài ra nó còn được sử dụng cho các bài toán có các điều kiện biên tuần hoàn hoặc điều kiện biên ô cơ sở. Trong phương pháp Frequency Domain Solver, lưới được chia theo kiểu lục diện (hexahedral) hoặc lưới tứ diện (tetrahedron). Do đó, để nghiên cứu mô phỏng vật liệu H-MPA, luận án sẽ sử dụng phương pháp Frequency Domain Solver.

Quá trình mô phỏng được tiến hành theo các bước sau: đầu tiên là thiết kế ô cơ sở của H-MPA bao gồm lựa chọn vật liệu, hình dạng và kích thước của ô cơ sở. Sau đó khoảng tần số mô phỏng, điều kiện biên và khoảng cách giữa nguồn phát với cấu trúc được thiết lập, trong đó vật liệu cần mô phỏng sẽ được đặt ở khoảng giữa hai ăng-ten phát và thu. Sau khi kết thúc quá trình mô phỏng, kết quả trả về dưới dạng các tham số tán xạ, bao gồm hệ số phản xạ (S_{11}) và hệ số truyền qua (S_{21}). Từ các tham số tán xạ này, độ hấp thụ của vật liệu biến hóa được xác định theo công thức:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2. \quad (2.5)$$

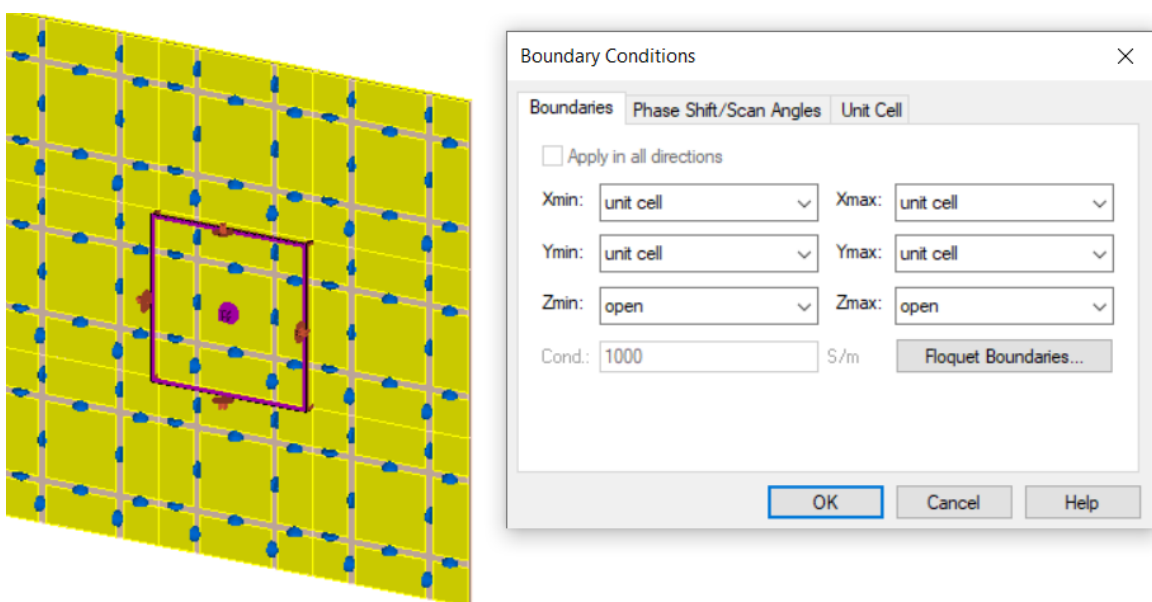
Một ưu điểm khác của phần mềm CST là chúng ta có thể thu được các hiểu biết chi tiết về sự tương tác cũng như tính chất của H-MPA một cách dễ dàng, trong khi những tính chất đó rất khó khảo sát và biểu diễn bằng thực nghiệm, ví dụ như phân bố mật độ năng lượng tiêu tán trong vật liệu biến hóa, phân bố dòng điện bề

mặt, phân bố điện trường và từ trường. Từ các thông tin này, cách thức tương tác của vật liệu với sóng điện từ, bản chất của cộng hưởng có thể được suy ra.

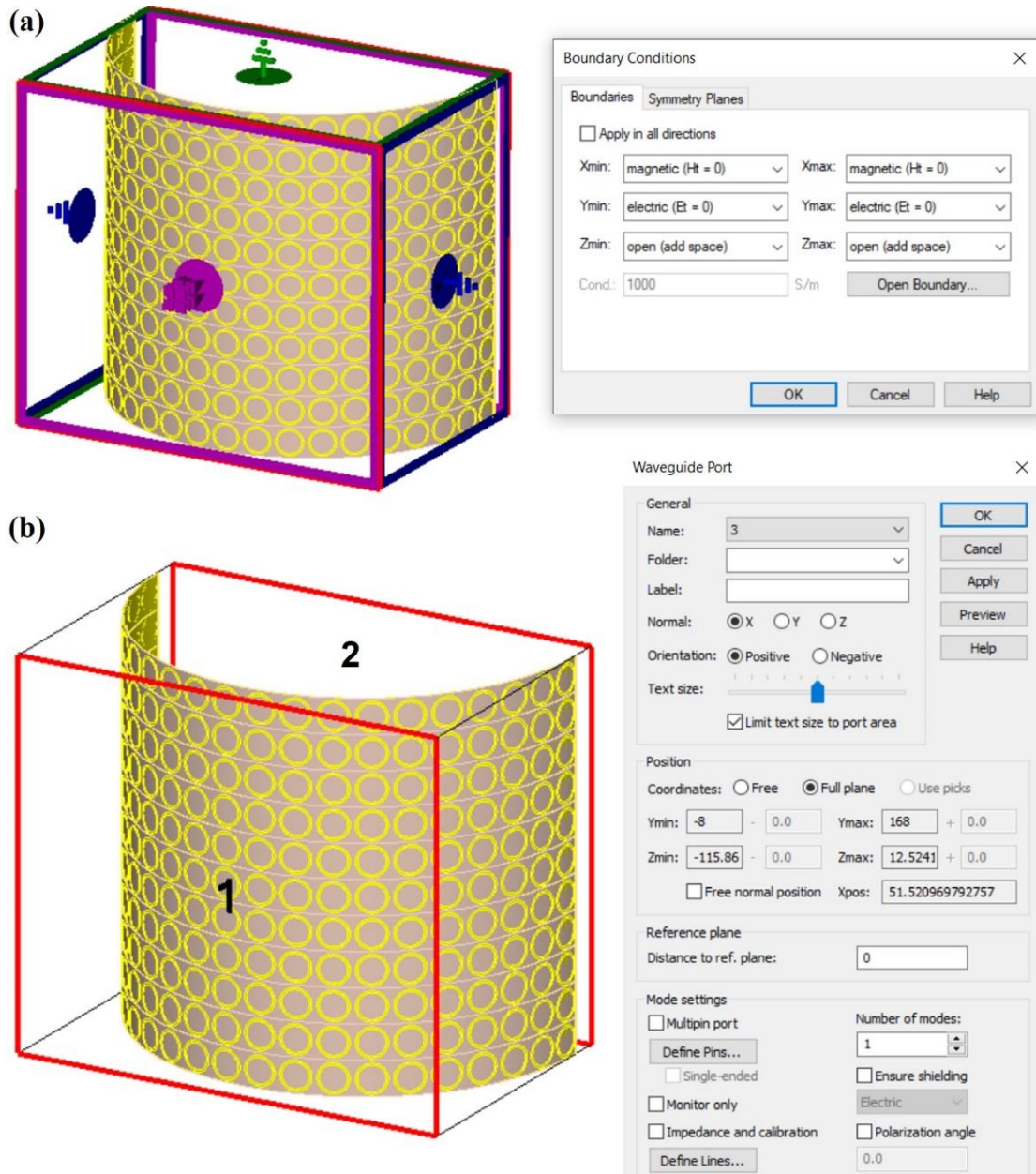


Hình 2.3. (a) Giao diện phần mềm CST, (b) tham số tán xạ và (c) phân bố dòng điện và mật độ năng lượng tổn thất bề mặt thu được sử dụng mô phỏng CST.

Trong luận án này có hai nội dung chính được tiến hành nghiên cứu, đó là đặc trưng điện từ của H-MPA và H-MPA đàn hồi, đánh giá ảnh hưởng của các trạng thái đàn hồi lên tính chất điện từ của vật liệu. Đối với H-MPA có cấu trúc tích hợp hoặc H-MPA đàn hồi ở trạng thái phẳng, chúng tôi mô phỏng tính chất điện từ của vật liệu dựa trên một ô cơ sở. Do đó, điều kiện biên được thiết lập là điều kiện biên cho ô cơ sở (Hình 2.4).



Hình 2.4. Thiết lập điều kiện biên mô phỏng H-MPA ở dạng phẳng.



Hình 2.5. Thiết lập điều kiện biên (a) và nguồn phát, nguồn thu (b) trong mô phỏng H-MPA uốn cong.

Tuy nhiên, khi khảo sát ảnh hưởng của trạng thái đàn hồi lên tính chất điện từ của vật liệu, toàn bộ cấu trúc của vật liệu phải được thiết kế và mô phỏng. Lúc này, điều kiện biên được thiết lập tương ứng với sự phân cực của sóng tới, các nguồn phát, nguồn thu được thiết lập sử dụng chế độ Waveguide Port [Hình 2.5(a)]. Khi xét vật liệu ở trạng thái uốn cong, chúng tôi sử dụng tính năng Bend Tools trong Modeling để uốn cong vật liệu theo dạng hình trụ [Hình 2.5(b)]. Việc thay đổi độ uốn cong của cấu trúc được thực hiện bằng cách thay đổi bán kính của hình trụ. Khác với trường hợp mô phỏng một ô cơ sở, trong trường hợp mô phỏng cấu trúc uốn cong, thiết lập của phần mềm chỉ cho phép mô phỏng trường hợp sóng tới theo phương của trục Oz (góc tới bằng 0°).

2.2. Mô hình tính toán các tham số hiệu dụng của H-MPA

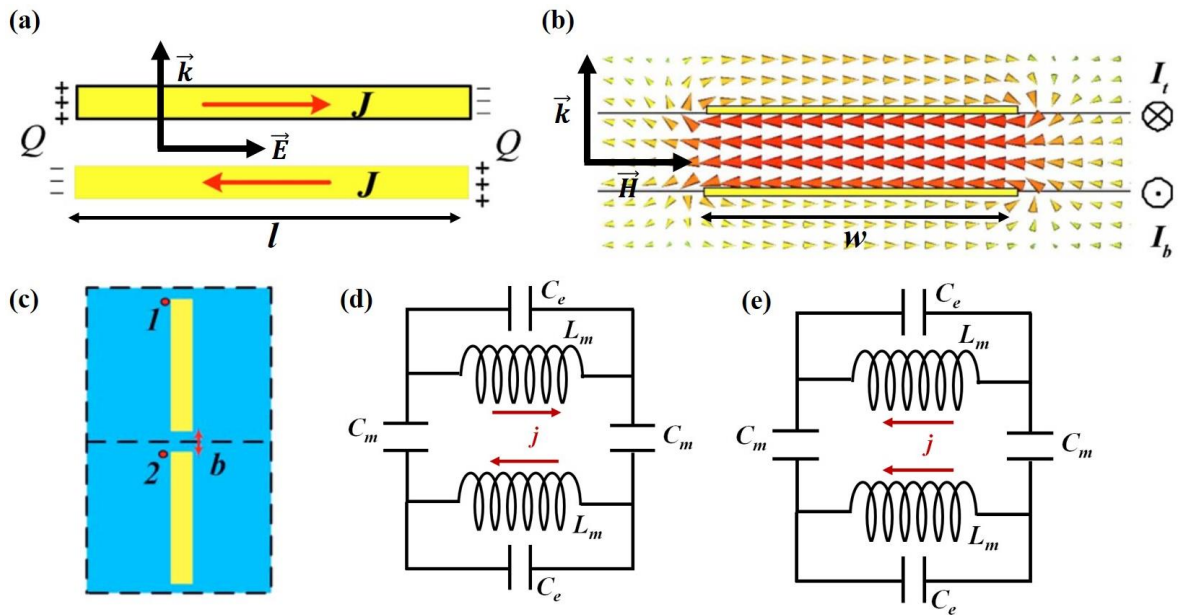
2.2.1. Mô hình mạch điện LC

Các tính chất đặc biệt của MMs xuất hiện là do độ điện thẩm và độ từ thẩm của vật liệu cùng có giá trị âm trong cùng một dải tần số. Trong đó, độ từ thẩm âm là kết quả của sự cộng hưởng mạnh của vật liệu với từ trường ngoài; và độ điện thẩm âm có thể xuất hiện bởi tương tác plasmonic hoặc cộng hưởng (hoặc cả hai) với điện trường bên ngoài. Khi cả độ từ thẩm và độ điện thẩm đều có giá trị âm, chiết suất của vật liệu cũng có giá trị âm, và dẫn đến bộ ba véc tơ \mathbf{k} , \mathbf{E} , \mathbf{H} tuân theo quy tắc tay trái (left-handed traid). Như vậy, dưới tác dụng của sóng điện từ, vật liệu MMs hoạt động như một mạch dao động LC. Từ mạch dao động LC của cấu trúc MMs có thể giúp ta xác định được tần số cộng hưởng điện từ - tần số mà tại đó xuất hiện các tính chất đặc biệt của MMs. Mô hình mạch LC tương đương đã được chứng minh là có hiệu quả trong việc tính toán tần số cộng hưởng cho các MMs có cấu trúc khác nhau như CWP [95], đĩa tròn [113], vòng cộng hưởng tròn [96] ...

Với các H-MPA hoạt động ở vùng tần số GHz, các phần kim loại của vật liệu thường được chế tạo từ đồng dẫn điện tốt, với độ dẫn điện khoảng 10^7 S/m. Do đó, mạch điện tương đương của H-MPA mà luận án nghiên cứu được xây dựng chỉ gồm cuộn dây thuần cảm và tụ điện. Tần số cộng hưởng của mạch LC tương đương này được tính bởi $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$. Độ tự cảm L của cuộn dây và điện dung C của tụ điện được tính toán từ cấu trúc hình học và phân bố năng lượng điện từ. Như vậy, khi tính tần số cộng hưởng từ mạch LC, ta có thể phát hiện ra ảnh hưởng của thông số vật liệu, kích thước của cấu trúc lên tần số cộng hưởng, từ đó có thể điều chỉnh các yếu tố này để đạt được dải tần số hoạt động mong muốn.

* Mô hình mạch LC cho cộng hưởng cơ bản

Mạch LC tương đương tính toán tần số cộng hưởng cơ bản được báo cáo chi tiết bởi Zhou và cộng sự [95], trong đó MMs có cấu trúc CWP. Ô cơ sở của MMs này bao gồm hai thanh kim loại nằm đối xứng nhau qua lớp điện môi, trong đó các kích thước đặc trưng bao gồm độ dài l và độ rộng w của thanh kim loại và độ dày lớp điện môi t_s . Thanh kim loại có độ dày t_m . Trong mô hình mạch LC, các thanh kim loại được mô hình hóa bởi cuộn dây có độ tự cảm hiệu dụng L_m ; hai đầu của hai thanh kim loại nằm trong hai ô cơ sở lân cận (dọc theo phương của điện trường E) tạo thành một tụ điện không khí có điện dung C_e ; hai thanh kim loại nằm ở hai mặt trên và dưới của một ô cơ sở tạo thành tụ điện có điện dung hiệu dụng C_m . Với trường hợp cộng hưởng từ, mạch LC được trình bày trên Hình 2.6 (d) và mạch LC cho trường hợp cộng hưởng điện được minh họa trên Hình 2.6 (e).



Hình 2.6. (a) Minh họa chiều của dòng điện cảm ứng trên hai thanh kim loại và (b) từ trường khi có cộng hưởng từ cơ bản, (c) mặt trên của cấu trúc, (d) mạch LC cho cộng hưởng từ và (e) cộng hưởng điện [95].

Khi xảy ra hiện tượng cộng hưởng từ, độ tự cảm hiệu dụng của cặp dây kim loại được tính từ năng lượng từ trường như sau

$$\phi = \int B dS \quad (2.6)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{w} \quad (2.7)$$

$$\phi = \int B dS = \int_{-(t_s+2t_m)/2}^{(t_s+2t_m)/2} dz \int_{-l/2}^{l/2} \frac{\mu_0 I}{w} dy \quad (2.8)$$

$$L_m = \int_{-(t_s+2t_m)/2}^{(t_s+2t_m)/2} dz \int_{-l/2}^{l/2} \frac{\mu_0}{w} dy \quad (2.9)$$

$$L_m \approx \frac{\mu_0 t_s l}{2w} \quad (2.10)$$

Độ tự cảm tổng cộng của cả mạch là [95]

$$L = 2L_m \approx \frac{\mu_0 t_s l}{w}, \quad (2.11)$$

trong đó μ_0 là độ từ thẩm của chân không, t_s là độ dày của lớp điện môi, l và w lần lượt là độ dài và độ rộng của CW. Điện dung của mỗi tụ C_m có giá trị được xác định bởi:

$$C_m = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w c_1 l}{t_s} \quad (2.12)$$

trong đó, ϵ_0 là độ điện thẩm của chân không và ϵ_r là độ điện thẩm tương đối của điện môi. c_1 là hệ số tỉ lệ, đặc trưng cho sự phân bố của các điện tích trên CW và có giá trị $0,2 \leq c_1 \leq 0,3$. Điện dung C_e được xác định bởi [95]:

$$C_e = \frac{\pi \epsilon_0 w}{\ln(b/t_m)}. \quad (2.13)$$

Từ biểu thức tính trở kháng tương đương của mạch điện [95]:

$$Z = \frac{iL_m \omega}{1 - L_m C_e \omega^2}, \quad (2.14)$$

khi cộng hưởng từ được kích thích, trở kháng có giá trị cực tiểu, do đó [95]:

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{L_m (C_m + C_e)}} \cong \frac{1}{\sqrt{L_m C_m}}. \quad (2.15)$$

Thay các biểu thức tính độ tự cảm và điện dung của tụ điện vào biểu thức (2.15), ta thu được:

$$f_m = \frac{\omega_m}{2\pi} = \frac{1}{\pi \sqrt{2c_1 \epsilon_r}} \frac{c}{l} \quad (2.16)$$

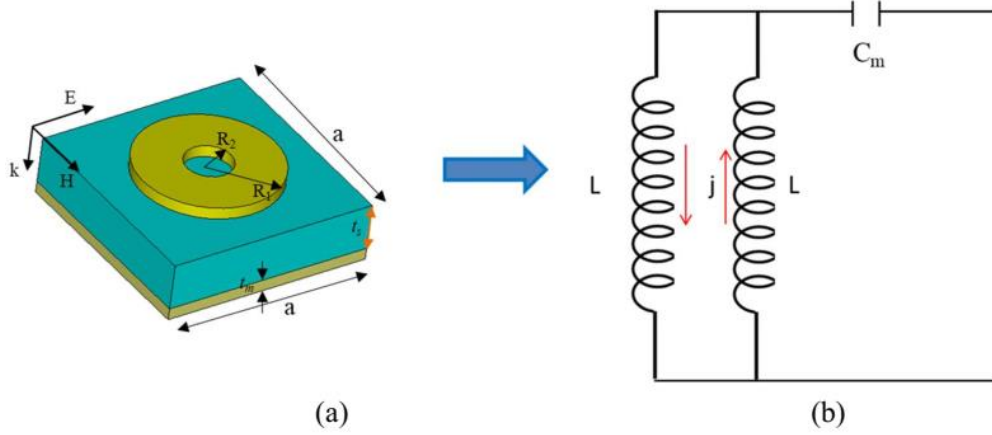
trong đó, c là vận tốc ánh sáng trong chân không. Từ đây suy ra tần số cộng hưởng từ trong trường hợp cấu trúc CWP phụ thuộc vào chiều dài của dây kim loại theo quan hệ tỉ lệ nghịch.

Trong trường hợp có cộng hưởng điện, ta có tần số cộng hưởng là [95]:

$$f_e = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_e L_e}} = \frac{c \sqrt{\ln(b/t_s)}}{2\pi \sqrt{wg(w/l)}}. \quad (2.17)$$

* Mô hình mạch LC cho cộng hưởng bậc cao

Giá trị của tần số cộng hưởng bậc cao cũng được xác định bằng phương pháp mạch LC tương đương. Xét trường hợp H-MPA có cấu trúc dạng vòng cộng hưởng tròn [96]. Cấu trúc của ô cơ sở được đặc trưng bởi kích thước ô cơ sở a , độ dày lớp điện môi t_s , bán kính ngoài R_1 và bán kính trong R_2 của vòng cộng hưởng hình tròn (Hình 2.7). Kết quả mô phỏng cho thấy vật liệu đề xuất có ba đỉnh hấp thụ tại 4,71GHz, 13,39 GHz và 19,91 GHz. Ba đỉnh hấp thụ này có nguồn gốc tương ứng là từ cộng hưởng từ cơ bản, bậc ba và bậc năm. Dựa trên phân bố dòng điện cảm ứng, năng lượng điện trường và từ trường, mạch LC tương đương được xây dựng như Hình 2.7(b).



Hình 2.7. (a) Sơ đồ cấu trúc ô cơ sở và (b) mạch điện LC của cấu trúc [96].

Với trường hợp cộng hưởng từ cơ bản, áp dụng biểu thức (2.8), độ tự cảm hiệu dụng L_m được tính bởi:

$$L_m = \frac{L}{2} = \frac{\mu(t_s + 2t_m) \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right]}{2}, \quad (2.18)$$

và điện dung hiệu dụng là

$$C_m = \pi \epsilon c_1 \frac{R_1^2 - R_2^2}{t_s}, \quad (2.19)$$

với μ_0 là độ từ thẩm của chân không, c_1 là hệ số tỉ lệ, đặc trưng cho phân bố điện tích trên các bề mặt kim loại, $0,2 \leq c_1 \leq 0,3$ và ϵ là hằng số điện môi của FR-4. Tần số cộng hưởng từ cơ bản là:

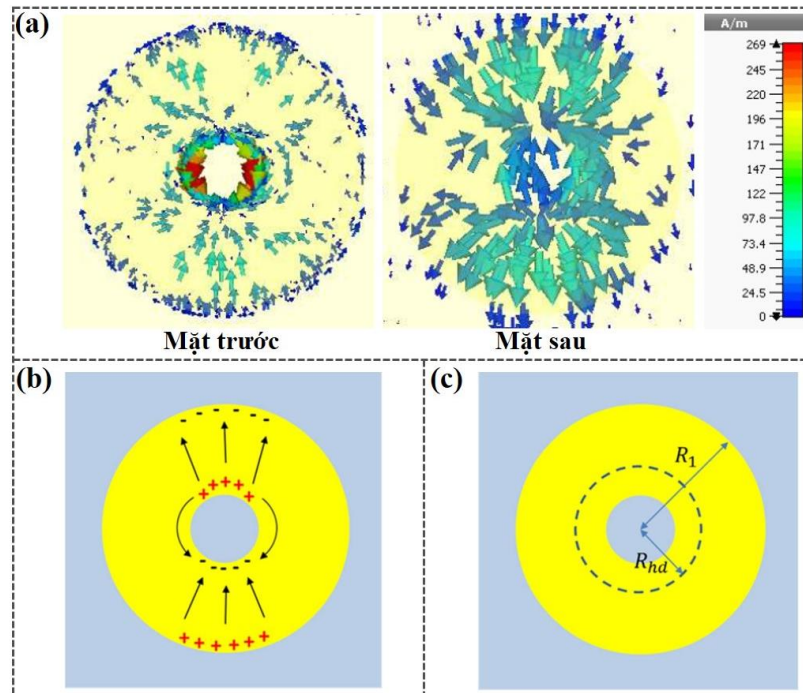
$$f_{ml} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}} = \frac{\sqrt{2t_s}}{2\pi \sqrt{\pi c_1 \epsilon \mu (t_s + 2t_m) (R_1^2 - R_2^2) \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right)}}. \quad (2.20)$$

Thay thế các giá trị $R_1 = 8,2$ mm, $R_2 = 2$ mm, $t_s = 0,8$ mm, $t_m = 0,036$ mm, $\epsilon = 4,3$, $c_1 = 0,2$ vào biểu thức (2.20), f_{ml} thu được là 4,36 GHz.

Xét đỉnh hấp thụ bậc ba tại 14,39 GHz, phân bố dòng điện ở tần số này cho thấy có ba cặp dòng điện bề mặt ngược chiều nhau [Hình 2.8(a)], điện trường tập trung tại bốn vị trí của cấu trúc [Hình 2.8(b)]. Để xác định tần số cộng hưởng từ mạch LC tương đương, một diện tích tương ứng với bán kính hiệu dụng R_{hd} được xem xét [Hình 2.8(c)]. Trong vùng diện tích hiệu dụng này dòng điện bề mặt được phân bố tương tự như ở cộng hưởng từ cơ bản. Như vậy, để tính toán tần số của đỉnh cộng hưởng bậc ba, thay vì nghiên cứu toàn bộ cấu trúc, bán kính R_1 được quy đổi tương đương về bán kính hiệu dụng. Giá trị bán kính hiệu dụng sẽ được lấy xấp xỉ $R_{hd} \approx \frac{R_1}{2}$. Bằng cách sử dụng R_{hd} thay vì R_1 thu được tần số cộng hưởng từ bậc ba là:

$$f_{m3} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}} = \frac{\sqrt{2t_s}}{2\pi \sqrt{\pi c_2 \varepsilon \mu (t_s + 2t_m) (R_{hd}^2 - R_2^2) \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{R_2}{R_{hd}}\right)\right)}} \quad (2.21)$$

Thay thế các giá trị $R_1 = 8,2$ mm, $R_2 = 2$ mm, $t_s = 0,8$ mm, $t_m = 0,036$ mm, $\varepsilon = 4,3$, $c_2 = 0,2$ vào biểu thức (2.21), giá trị của f_{m3} thu được là 14,5 GHz. Kết quả này có sự sai lệch nhỏ với kết quả thu được khi mô phỏng (13,39 GHz), độ sai lệch là 0,7%. Sự sai lệch này có nguyên nhân là đã tính gần đúng R_{hd} và hệ số tỉ lệ c_2 .



Hình 2.8. (a) Phân bố dòng điện bề mặt tại 13,39 GHz, (b) minh họa chiều dòng điện và điện tích cảm ứng và (c) bán kính hiệu dụng ở tần số cộng hưởng từ bậc ba [96].

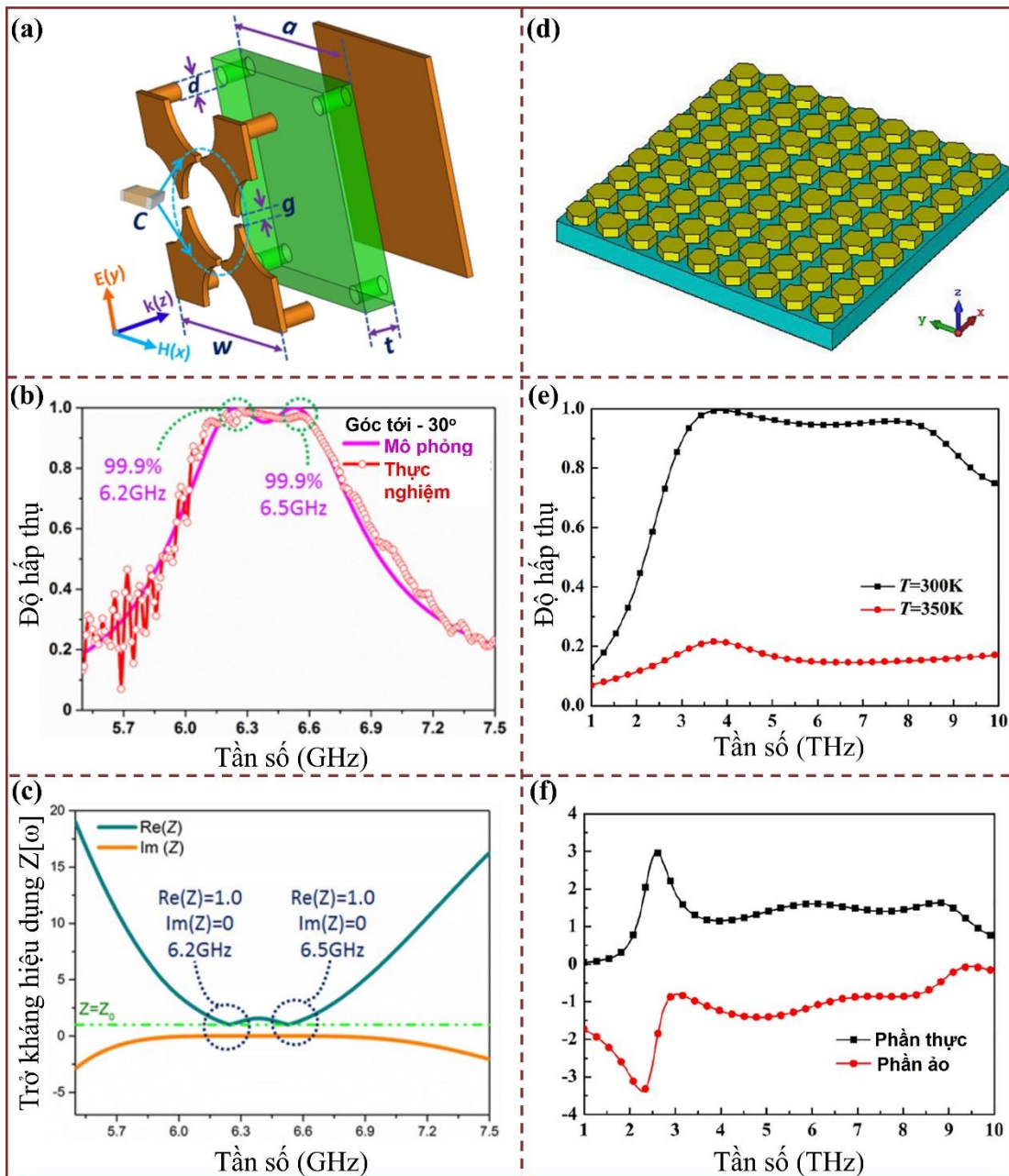
2.2.2. Tính toán trở kháng hiệu dụng

Trong các MPA nói chung và H-MPA nói riêng, để đạt được hấp thụ gần như tuyệt đối (độ hấp thụ xấp xỉ 100%), điều kiện cần đó là trở kháng hiệu dụng của chúng phải bằng trở kháng của môi trường tự do (điều kiện về sự phối hợp trở kháng). Do đó, trở kháng hiệu dụng của các H-MPA được xác định để đánh giá và giải thích khả năng hấp thụ của chúng. Với H-MPA hoạt động trong vùng GHz, có thể tính được các tham số hiệu dụng như độ điện thẩm, độ từ thẩm, trở kháng hiệu dụng, chiết suất ... từ các hệ số phản xạ (S_{11}) và truyền qua (S_{21}) [114]. Phương pháp tính này được đề xuất bởi Chen và cộng sự, trong đó trở kháng được tính theo các tham số tán xạ có dạng sau:

$$Z = \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}}. \quad (2.24)$$

Vì MPA được thiết kế với một tấm kim loại liên tục ở mặt sau, trong vùng GHz, tấm kim loại này sẽ ngăn toàn bộ sóng điện từ truyền ra ngoài cấu trúc. Do đó, thành phần truyền qua S_{21} bị triệt tiêu. Suy ra biểu thức tính trở kháng được rút gọn thành:

$$Z = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}}. \quad (2.25)$$



Hình 2.9. (a) Minh họa cấu trúc ô cơ sở (a), (b) phổ hấp thụ, (c) trở kháng hiệu dụng của H-MPA [115]; (d) cấu trúc vật liệu, (e) phổ hấp thụ, và (f) trở kháng hiệu dụng của MPA dải rộng trong vùng THz [116].

Để thỏa mãn điều kiện phối hợp trở kháng, trở kháng hiệu dụng có phần thực bằng 1 và phần ảo bằng 0. Hình 2.9 trình bày kết quả tính toán trở kháng hiệu dụng của cho một số MPA khác nhau. Có thể thấy rằng, tại các đỉnh hấp thụ trở kháng hiệu dụng của các cấu trúc này lần lượt có phần thực xấp xỉ 1 và phần ảo xấp xỉ 0, chứng tỏ đã có sự phối hợp trở kháng. Kết quả là thành phần phản xạ gần bằng 0, dẫn đến vật liệu hấp thụ gần như tuyệt đối sóng điện từ tại các tần số đó.

2.3. Phương pháp chế tạo H-MPA hoạt động trong vùng tần số GHz

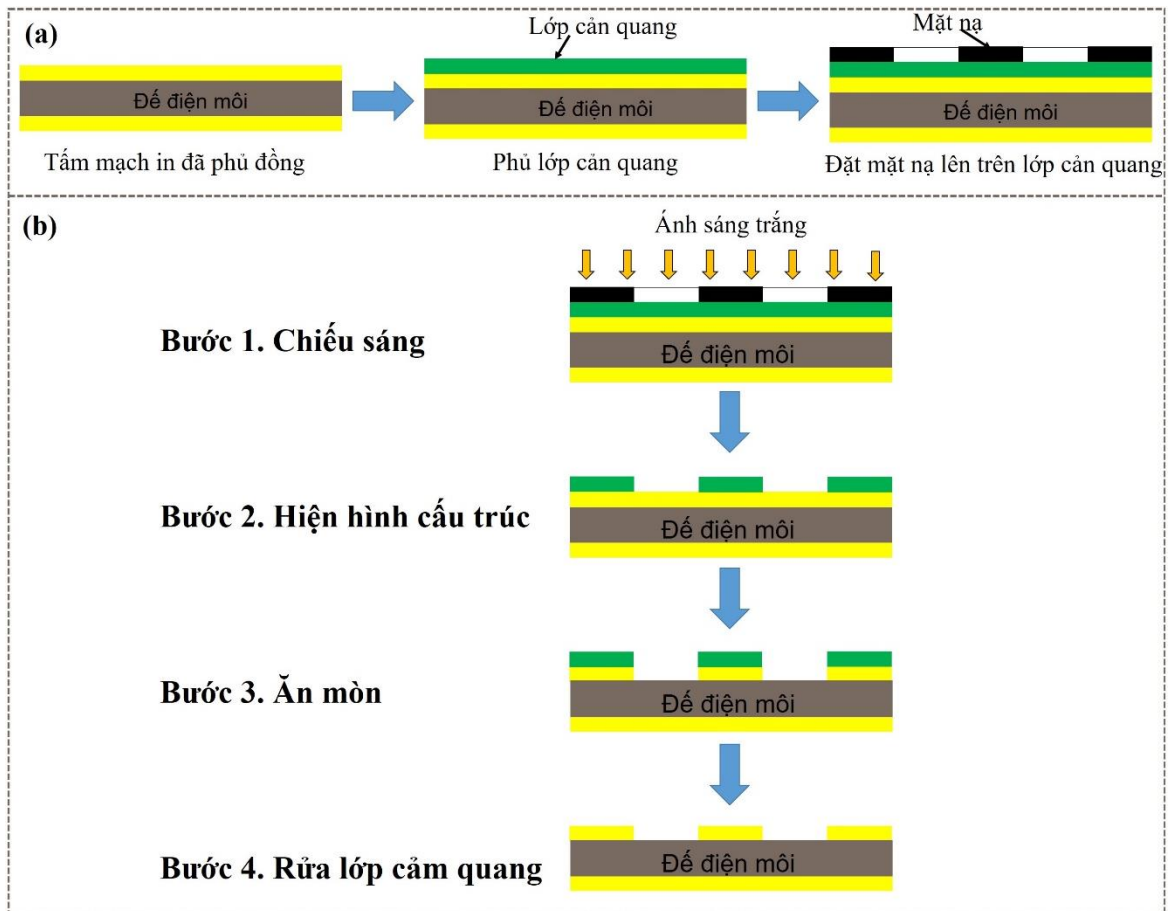
Với các H-MPA có cấu trúc ba lớp, kim loại - điện môi - kim loại, hoạt động trong vùng tần số GHz, phương pháp chế tạo phù hợp là phương pháp quang khắc. Nguyên tắc cơ bản của kỹ thuật quang khắc là sử dụng bức xạ ánh sáng làm biến đổi các chất cản quang phủ trên bề mặt vật liệu cần chế tạo. Quy trình chế tạo vật liệu MPA sử dụng phương pháp quang khắc đã được chúng tôi sử dụng và chế tạo thành công nhiều mẫu MPA với độ chính xác cao. Trong quá trình chế tạo, chúng tôi sử dụng chất cản quang dương, có tính chất bị biến đổi sau khi chiếu sáng sẽ bị hòa tan trong các dung dịch kiềm. Hệ thiết bị quang khắc bao gồm các bộ phận chính: 1) bộ phận chiếu sáng, 2) bể dung dịch ăn mòn và 3) bể dung dịch hiện hình (Hình 2.10). Ngoài ra, để duy trì nhiệt độ trong quá trình ăn mòn và hiện hình cấu trúc các hệ thống gia nhiệt và sục khí được sử dụng.



Hình 2.10. Hệ thiết bị quang khắc

Các H-MPA được nghiên cứu trong luận án có lớp điện môi là FR-4 hoặc Polyimide. Do đó, các tấm mạch in được sử dụng là PCB có điện môi là FR-4 (hằng

số điện môi khoảng 4,3) có độ dày từ 1,0 đến 3,0 mm hoặc FPC có điện môi làm từ Polyimide (hằng số điện môi khoảng 3,5) dày từ 0,25 đến 1,0 mm. Hai mặt của lớp điện môi có phủ một lớp đồng có độ dẫn điện là $5,96 \times 10^7$ S/m và có độ dày khoảng 0,035 mm. Mẫu được chế tạo sử dụng hệ quang khắc Kinsten ET20, độ chính xác 0,5 mm. Quy trình chế tạo H-MPA sử dụng phương pháp quang khắc bao gồm 4 bước (Hình 2.11):



Hình 2.11. (a) Chuẩn bị chế tạo mẫu, (b) quy trình chế tạo vật liệu MMs sử dụng phương pháp quang khắc.

Bước 1: Chiếu sáng.

Trước khi chiếu sáng, một lớp chất cảm quang được phủ lên bề mặt của tấm mạch in. Sau đó, một tấm mặt nạ được đặt sát lên trên lớp cảm quang. Dùng một đèn ánh sáng trắng có công suất 18 W chiếu lên tấm mạch in đã được phủ lớp cảm quang và mặt nạ. Khoảng cách giữa đèn và mặt nạ là 5 cm. Thời gian chiếu sáng là 10 phút. Sau khi chiếu sáng, tấm mặt nạ được tách khỏi bề mặt mẫu.

Bước 2: Tẩy rửa chất cảm quang.

Nhúng mẫu sau khi chiếu sáng vào trong dung dịch chất tẩy rửa cảm quang có nhiệt độ được duy trì ở khoảng 40 - 50°C, thời gian nhúng là 2 phút. Vì sau khi được

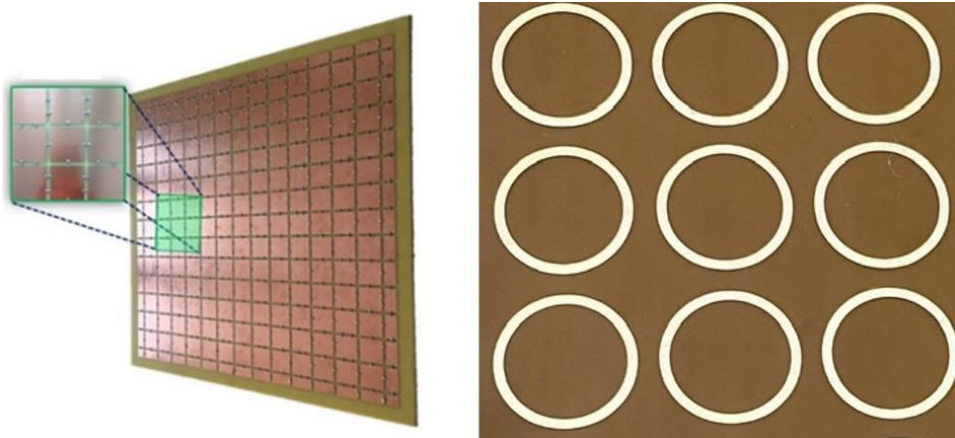
chiếu sáng, phần chất cản quang tiếp xúc với ánh sáng đã bị thay đổi tính chất hóa học và dễ dàng bị hòa tan trong dung dịch kiềm, do đó phần chất cản quang bị biến đổi sẽ được tẩy rửa và loại bỏ để lại phần chất cản quang không bị chiếu sáng.

Bước 3: Ăn mòn, tạo cấu trúc.

Mẫu sau khi được tẩy rửa lớp cản quang sẽ được ngâm trong dung dịch hóa chất ăn mòn chuyên dụng cho mạch in. Thời gian ngâm khoảng 10 – 15 phút, nhiệt độ của dung dịch hóa chất được giữ ở khoảng 30 – 40°C. Kết quả là phần kim loại đã bị loại bỏ chất cản quang tiếp xúc với dung dịch sẽ bị ăn mòn, để lại phần cấu trúc cần thiết kế.

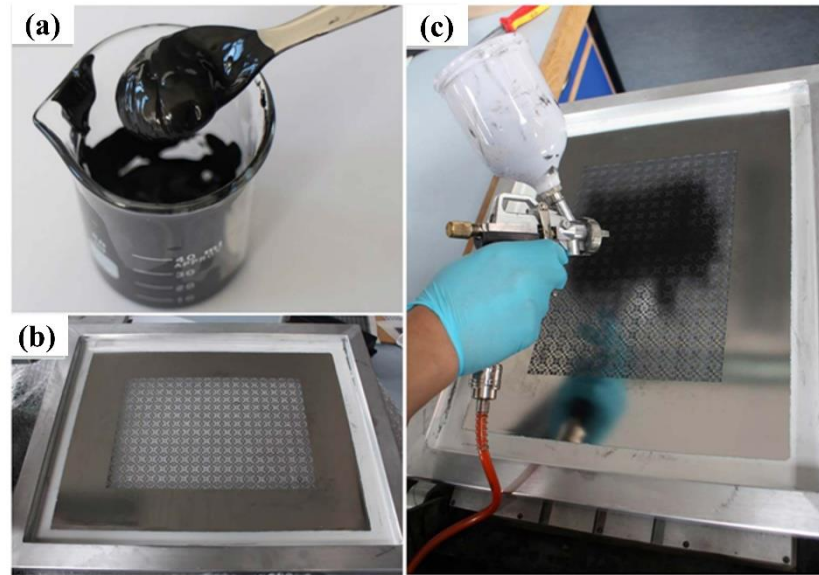
Bước 4: Hiện hình cấu trúc.

Sau bước ăn mòn, mẫu lại được đặt dưới đèn chiếu sáng tương tự như Bước 2 (không cần mặt nạ, thời gian chiếu 10 phút). Cuối cùng, mẫu được ngâm trong dung dịch tẩy rửa lớp cản quang (thời gian ngâm 2 phút) để loại bỏ phần chất cản quang còn lại.



Hình 2.12. Mẫu vật liệu MMs được chế tạo theo phương pháp quang khắc.

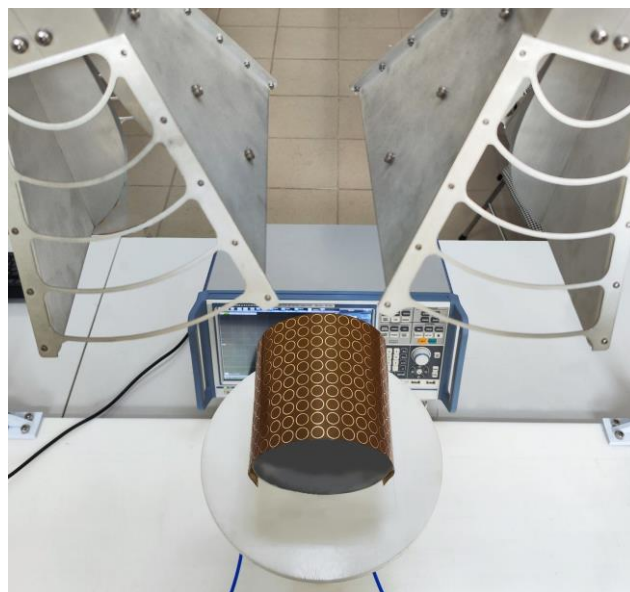
H-MPA có cấu trúc cộng hưởng làm từ mực in nano kim loại được chế tạo bằng phương pháp in lưới (Stencil printing). Nguyên lý của phương pháp này là lợi dụng sự thấm thấu của mực qua một tấm lưới in, trong đó chỉ một phần mực được thấm qua và in lên đế điện môi. H-MPA được chế tạo sử dụng tấm điện môi polyimide có độ dày 0,5 mm có một mặt được phủ kim loại. Đầu tiên một tấm mặt nạ được thiết kế theo cấu trúc cộng hưởng và được đặt cố định lên trên tấm điện môi. Mực nano bạc được phun lên bề mặt tấm điện môi qua các khe hở của mặt nạ. Sau khi quá trình phun mực kết thúc, mặt nạ được lấy ra và các cấu trúc cộng hưởng như thiết kế sẽ được để lại trên tấm điện môi. Phương pháp này đã được nhóm nghiên cứu tại Đại học Manchester (Anh) sử dụng chế tạo thành công mẫu vật liệu MPA với lớp mực in graphene trên nền điện môi silicon [117].



Hình 2.13. Chế tạo vật liệu MPA đàn hồi bằng phương pháp in lưới [117].

2.4. Phương pháp thực nghiệm đánh giá đặc trưng điện từ của H-MPA

Các kết quả thực nghiệm của luận án được đo đạc tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, sử dụng hệ thiết bị phân tích mạng véctor (VNA-Vector Network Analyzer) Rohde & Schwarz ZNB20. Hệ đo này có thể đo đạc các đặc trưng điện từ của vật liệu trong khoảng tần số từ 1 đến 18 GHz, có hai ăng-ten đóng vai trò nguồn phát và nguồn thu (Hình 2.14).



Hình 2.14. Máy phân tích mạng véctor VNA

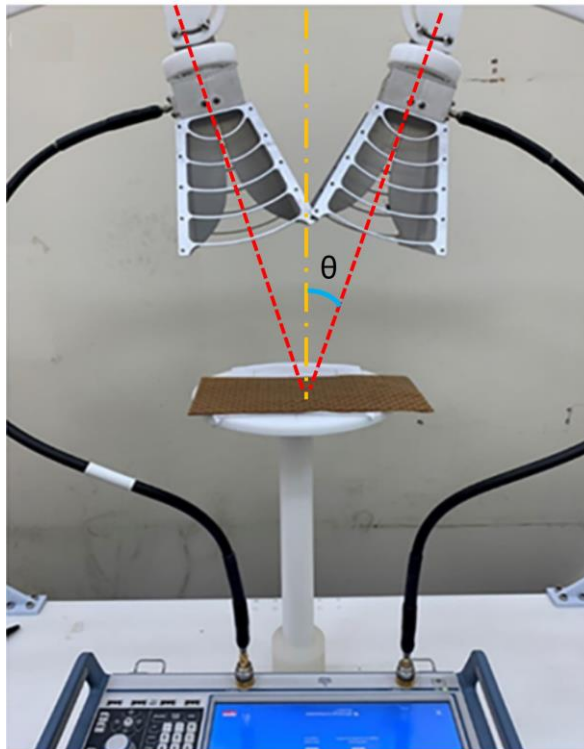
Để đo phổ phản xạ từ mẫu vật liệu biến hóa, một ăng-ten được thiết lập có vai trò phát sóng điện từ và ăng-ten còn lại thu tín hiệu phản xạ từ mẫu. Khoảng cách giữa hai ăng-ten được điều chỉnh chính xác cho các phép đo dưới góc tới khác nhau. Các bước tiến hành đo như sau: (i) Thiết lập vị trí của hai ăng-ten phát và thu sóng

điện từ, (ii) chuẩn hóa tín hiệu phản xạ của một mặt phẳng kim loại có kích thước bằng với mẫu MPA (độ phản xạ đạt 100%), (iii) thay tấm kim loại chuẩn hóa bằng mẫu MPA cần đo và ghi nhận tín hiệu phản xạ từ mẫu.

Trong quá trình đo, một số lưu ý để đạt được kết quả chính xác như sau:

- Mẫu cần đo phải có kích thước lớn hơn kích thước ăng-ten để đảm bảo nhận được đầy đủ năng lượng của búp sóng chính phát ra từ ăng-ten.
- Khoảng cách đặt mẫu so với ăng-ten thường được tối ưu ở khoảng cách trường xa (khoảng cách lớn hơn 4 - 6 lần bước sóng hoạt động).

Trong phép đo VNA, kết quả đo trả về dưới dạng các tham số tán xạ phức S-parameters, cho biết đặc tính phản xạ và truyền qua của vật liệu được đo và độ hấp thụ của vật liệu được tính theo công thức (2.5). Do các mẫu H-MPA được thiết kế và chế tạo có một tấm kim loại liên tục ở mặt sau, nên thành phần truyền qua của sóng điện từ bị triệt tiêu. Để đánh giá đặc trưng hấp thụ của vật liệu, chúng tôi chỉ cần đo tham số phản xạ S_{11} và tính độ hấp thụ theo biểu thức: $A = 1 - |S_{11}|^2$.



Hình 2.15. Thiết lập phép đo đặc trưng phản xạ của H-MPA sử dụng hệ thiết bị VNA.

Trong một số trường hợp kết quả đo đạc và mô phỏng có thể có sự sai lệch. Nguyên nhân của sai số là do mẫu chế tạo được là không lý tưởng, trong quá trình chế tạo có thể xuất hiện các khuyết tật về mặt hình học của các cấu trúc hoặc trong quá trình đo đạc, kết quả bị ảnh hưởng bởi nhiễu. Ngoài ra, quá trình mô phỏng là quá trình lý tưởng, trong đó cả tham số hình học và tham số đặc trưng cho vật liệu là

lý tưởng, giá trị của chúng có thể sai khác so với các vật liệu thương mại dùng để chế tạo mẫu.

2.5. Kết luận chương 2

Luận án sử dụng kết hợp các phương pháp nghiên cứu mô phỏng vật lý, mô hình hóa sử dụng mạch điện LC, tính toán bán lý thuyết và thực nghiệm. Đây là các phương pháp hiệu quả để nghiên cứu đặc trưng điện từ của MPA nói chung và H-MPA nói riêng. Các phương pháp này là đáng tin cậy, đã được nhiều nhà khoa học trong nước và quốc tế sử dụng hiệu quả. Trong quá trình thực hiện luận án, các phương pháp nghiên cứu kể trên được thực hiện độc lập, kết quả của các phương pháp đó được so sánh với nhau để kiểm chứng lại và đảm bảo độ chính xác các kết quả nghiên cứu.

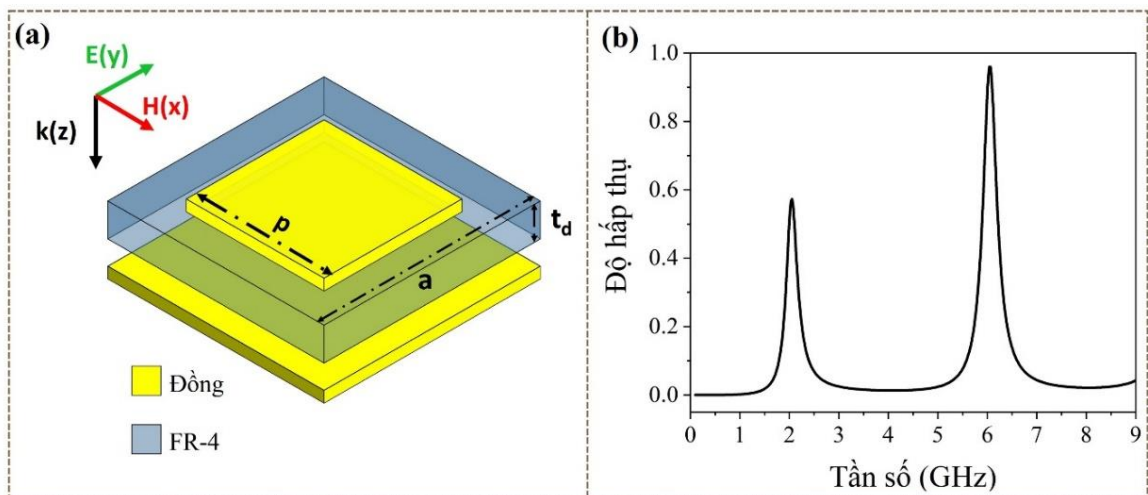
Chương 3. ĐẶC TRƯNG HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CỘNG HƯỞNG TỪ BẬC LÊ

MPA có tiềm năng ứng dụng to lớn trong nhiều lĩnh vực. Tuy nhiên để đưa MPA vào ứng dụng trong thực tiễn thì vẫn cần phải nghiên cứu để làm rõ bản chất vật lý, cơ chế hoạt động, đồng thời cải tiến các đặc tính điện từ của chúng. Một trong các tính chất điện từ của MPA đang thu hút được nhiều sự quan tâm gần đây đó là tăng số lượng hoặc mở rộng băng tần hoạt động của vật liệu. Như đã bàn luận ở Chương 1, trong một số trường hợp cấu trúc cộng hưởng đặc biệt, ví dụ như cấu trúc CWP, đĩa tròn ... có thể cho hấp thụ đa đỉnh. Trong đó, bên cạnh đỉnh hấp thụ có nguồn gốc từ cộng hưởng điện từ cơ bản, các cấu trúc này còn cho thấy sự xuất hiện của các đỉnh hấp thụ có nguồn gốc từ cộng hưởng điện từ bậc cao. Khai thác hiệu ứng cộng hưởng điện từ bậc cao để mở rộng băng tần hoạt động của MPA là phương pháp hiệu quả với ưu điểm vật liệu có kích thước nhỏ và khối lượng nhẹ. Tuy nhiên, hướng nghiên cứu này cũng đặt ra các thách thức cần phải vượt qua để đạt được hấp thụ đa đỉnh: duy trì độ hấp thụ cao khi mở rộng góc tới của sóng điện từ, đồng thời trang bị cho vật liệu tính đàn hồi để mở rộng phạm vi ứng dụng của vật liệu trong các bề mặt không phẳng trong thực tế. Trong chương này, luận án sẽ trình bày ba mẫu H-MPA có cấu trúc bề mặt được cải tiến, dựa trên các cấu trúc cộng hưởng thông dụng như tấm kim loại hình vuông, vòng cộng hưởng, nhằm thu được đặc tính hấp thụ đa đỉnh dựa trên hấp thụ cộng hưởng từ bậc cao, hoạt động trong các vùng tần số khác nhau. Cụ thể, mẫu vật liệu H-MPA có cấu trúc cộng hưởng hình vuông được tích hợp tụ điện (kí hiệu H-MPA1) và mẫu H-MPA có cấu trúc cộng hưởng dạng vòng gấp khúc (kí hiệu H-MPA2) được thiết kế cho mục tiêu hấp thụ trong các vùng tần số thấp từ băng tần VHF (0,03 - 0,3 GHz) đến băng tần S (2,0 - 4,0 GHz), định hướng cho các ứng dụng trong lĩnh vực truyền thông không dây, thiết bị Wi-Fi cho liên lạc 4G, thông tin vệ tinh, viễn thông vô tuyến đường dài... Ngoài ra, nghiên cứu mở rộng cho MPA hoạt động trong băng tần THz sử dụng cấu trúc hình ngôi sao (hai hình vuông xoay lệch nhau một góc 45°) (kí hiệu H-MPA3) đã được thực hiện nhằm làm rõ hơn cơ chế hấp thụ bậc cao. Đặc biệt, cấu trúc H-MPA2 và H-MPA3 được tích hợp đế điện môi làm từ polymer đàn hồi để mở rộng khả năng ứng dụng của vật liệu đề xuất cho các bề mặt không phẳng.

3.1. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA tích hợp tụ điện hoạt động trong cả hai băng tần VHF (30 - 300 MHz) và S (2,0 – 4,0 GHz)

3.1.1. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA có cấu trúc cộng hưởng hình vuông, chưa được tích hợp tụ điện

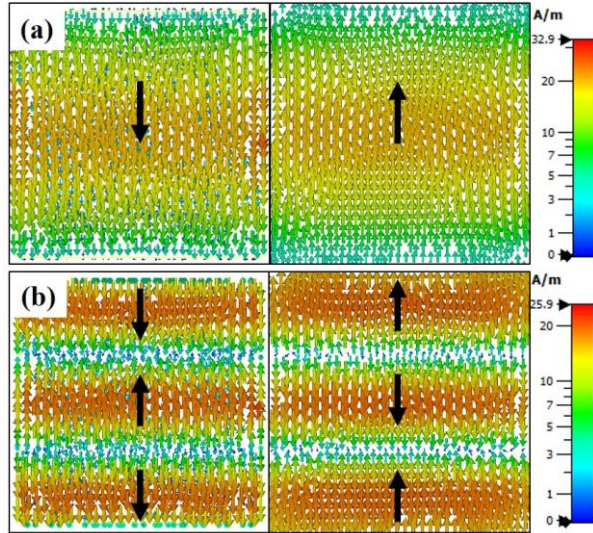
Từ các nghiên cứu về cấu trúc CWP, đặc trưng điện từ của H-MPA có cấu trúc cộng hưởng dạng hình vuông theo thiết kế như trong Hình 3.1(a) được khảo sát bằng mô phỏng. H-MPA được thiết kế với cấu trúc ba lớp: kim loại - điện môi - kim loại. Lớp kim loại được làm từ đồng để đảm bảo có độ dẫn điện tốt ($5,96 \times 10^7$ S/m), đồng thời dễ dàng chế tạo bằng kỹ thuật quang khắc. Lớp điện môi được làm từ FR-4, có độ điện thẩm là 4,3 và tổn hao điện môi khoảng 0,025 nhằm đảm bảo khả năng tiêu tán năng lượng sóng điện từ. Để đạt được mục tiêu hấp thụ trong vùng tần số thấp, kích thước ô cơ sở của cấu trúc được lựa chọn là $a = 33$ mm. Mỗi ô cơ sở của H-MPA đề xuất gồm có: *i*) tấm đồng hình vuông có cạnh là $w = 30$ mm và có độ dày là $t_m = 0,035$ mm; *ii*) lớp giữa là FR-4 có độ dày là $t_d = 3,0$ mm; *iii*) lớp dưới cùng là một tấm đồng có độ dày là t_m . Trong vùng tần số GHz, tấm đồng liên tục ở mặt sau có tác dụng ngăn không cho sóng điện từ truyền ra khỏi vật liệu. Do đó thành phần truyền qua bằng 0 và độ hấp thụ được tính bởi $A(\omega) = 1 - |R(\omega)| = 1 - |S_{11}(\omega)|^2$. Phổ hấp thụ của vật liệu thu được từ mô phỏng được biểu diễn trên Hình 3.1(b). Dễ thấy rằng trong vùng tần số từ 0,1 đến 9 GHz, dưới sự kích thích của sóng điện từ phân cực TE, có hai đỉnh hấp thụ tại 2,05 GHz và 6,06 GHz với độ hấp thụ lần lượt là 57,66% và 96,1%.



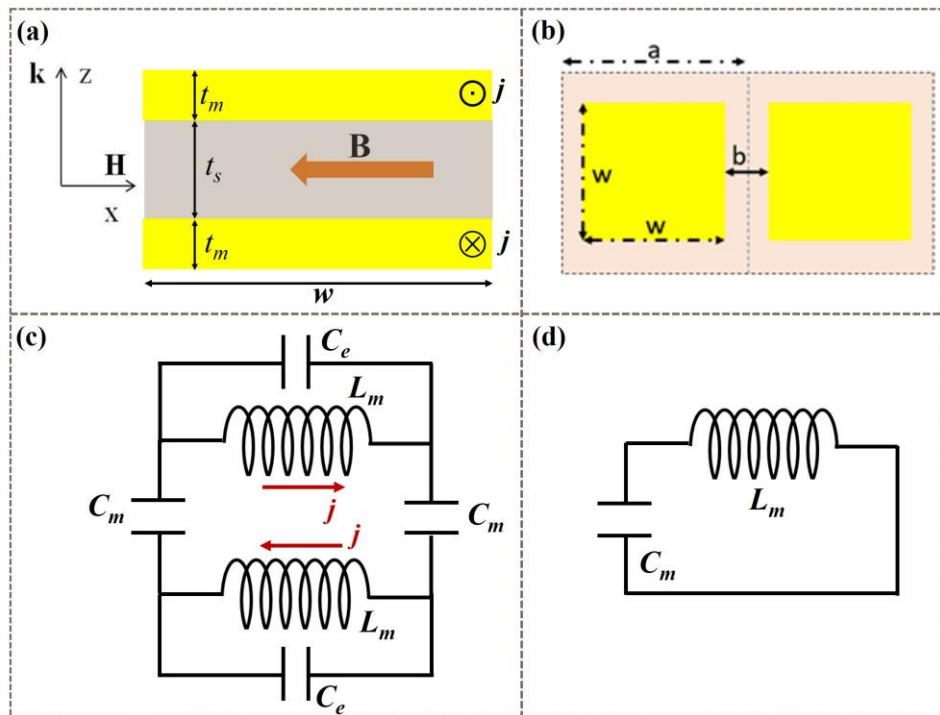
Hình 3.1. (a) Cấu trúc ô cơ sở của vật liệu, (b) phổ hấp thụ mô phỏng của vật liệu khi lớp điện môi có độ dày là $t_d = 3,0$ mm

Phân bố dòng điện bề mặt tại 2,05 GHz cho thấy, trên toàn bộ cấu trúc cộng hưởng có một cặp dòng điện điện cảm ứng có chiều ngược nhau hình thành tại hai mặt kim loại của ô cơ sở [Hình 3.2(a)]. Điều này chứng tỏ đỉnh hấp thụ tại 2,05 GHz

có nguồn gốc là cộng hưởng từ cơ bản. Tại 6,06 GHz, dòng điện cảm ứng trên cả hai mặt kim loại của cấu trúc bị chia thành ba vùng riêng biệt, các cặp dòng điện trong mỗi vùng là ngược chiều nhau, cho thấy đỉnh cộng hưởng này có nguồn gốc từ cộng hưởng từ bậc ba [Hình 3.2(b)].



Hình 3.2. Phân bố dòng điện cảm ứng trên các bề mặt kim loại tại (a) $f_1 = 2,05$ GHz; (b) $f_2 = 6,06$ GHz.



Hình 3.3. (a) Chiều dòng điện cảm ứng và từ trường (trong mặt phẳng E, k), (b) minh họa mặt trên của cấu trúc vật liệu và các tham số hình học, (c) mạch điện LC tương đương và (d) mạch điện thu gọn.

Kết quả mô phỏng trên được kiểm chứng lại qua việc xây dựng mô hình mạch điện tương đương LC cho cấu trúc đề xuất (Hình 3.3). Trong mạch LC, C_e là tụ điện

không khí được tạo ra bởi hai đầu của cấu trúc kim loại hình vuông nằm trong hai ô cơ sở cạnh nhau dọc theo phương của véc tơ điện trường. Điện dung của tụ điện có giá trị được tính bởi [95]:

$$C_e = \frac{\pi \varepsilon \varepsilon_0 w}{\ln(b/t_m)} \quad (3.1)$$

với ε và ε_0 lần lượt là độ điện thẩm của lớp không khí giữa hai bản tụ điện và độ điện thẩm của chân không. Tụ điện C_m được tạo ra bởi hai tấm kim loại ở mặt dưới và mặt trên và có điện dung được tính bởi công thức sau:

$$C_m = \varepsilon_d \varepsilon_0 \frac{S}{t_d} = \varepsilon_d \varepsilon_0 \frac{c_1 S_0}{t_d}, \quad (3.2)$$

trong đó c_1 là hệ số tỉ lệ đặc trưng cho sự phân bố điện tích trên bề mặt hiệu dụng S , $0,2 \leq c_1 \leq 0,3$, S_0 là toàn bộ diện tích bề mặt của cấu trúc cộng hưởng kim loại hình vuông, ε_d là độ điện thẩm của lớp điện môi. Tấm kim loại hình vuông có độ dài các cạnh là w nên C_m được tính toán như sau:

$$C_m = \varepsilon_d \varepsilon_0 \frac{c_1 w^2}{t_d}. \quad (3.3)$$

Tính toán giá trị của điện dung C_e theo công thức (3.1) và điện dung C_m theo công thức (3.3) chúng tôi nhận thấy rằng $C_e \approx 0,1 C_m$, nên có thể bỏ qua C_e [95]. Khi đó mạch điện LC được rút gọn đơn giản như biểu diễn trong Hình 3.3(d).

Trong mạch điện LC, phần cấu trúc kim loại ở mặt dưới và mặt trên được mô hình hóa bởi cuộn cảm L_m . Giá trị độ tự cảm hiệu dụng L_m thu được từ việc áp dụng định luật Ampere và phương trình Faraday:

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (3.4)$$

với $\phi = \int B dS$, dS là diện tích mặt cắt vuông góc mà có cảm ứng từ xuyên qua và cảm ứng từ $B = \frac{\mu_0 I}{w}$, với μ_0 là độ từ thẩm của chân không. Từ Hình 3.3(a) biểu diễn dòng điện cảm ứng và từ trường, ta có:

$$\phi = \int B dS = \int_{-(t_s+2t_m)/2}^{(t_s+2t_m)/2} dz \int_{-w/2}^{w/2} \frac{\mu_0 I}{w} dy. \quad (3.5)$$

Do đó, ta tính được độ tự cảm hiệu dụng theo biểu thức sau:

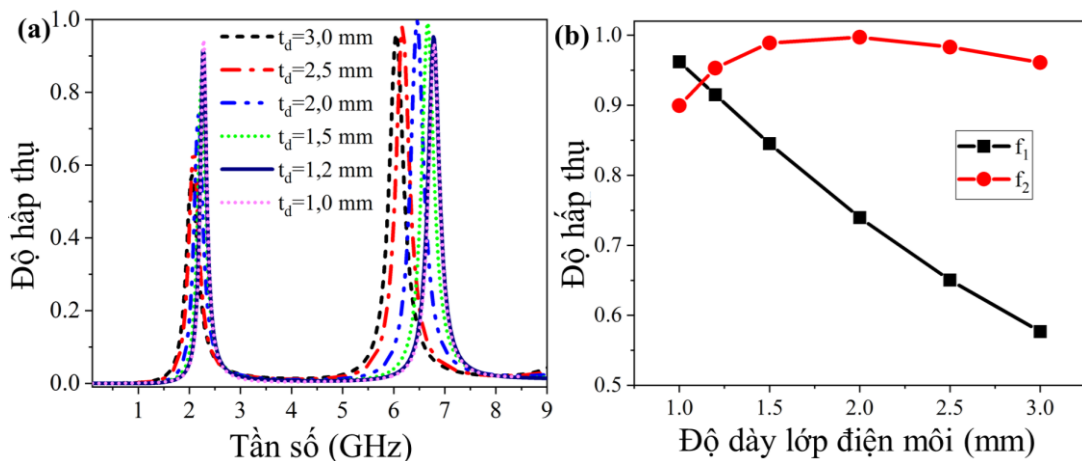
$$L_m = \frac{L}{2} = \int_{-(t_d+2t_m)/2}^{(t_d+2t_m)/2} dz \int_{-w/2}^{w/2} \frac{\mu_0}{w} dy \approx \frac{\mu_0 t_d}{2}. \quad (3.6)$$

Tần số cộng hưởng từ cơ bản được xác định gần đúng bởi biểu thức:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_m(C_m + C_e)}} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_m C_m}} \quad (3.7)$$

Kết quả tính toán tần số cộng hưởng cơ bản của vật liệu đề xuất là $f_1 = 2,051$ GHz ứng với giá trị $c_1 = 0,28$. Kết quả tính toán này phù hợp với kết quả mô phỏng đã trình bày ở trên.

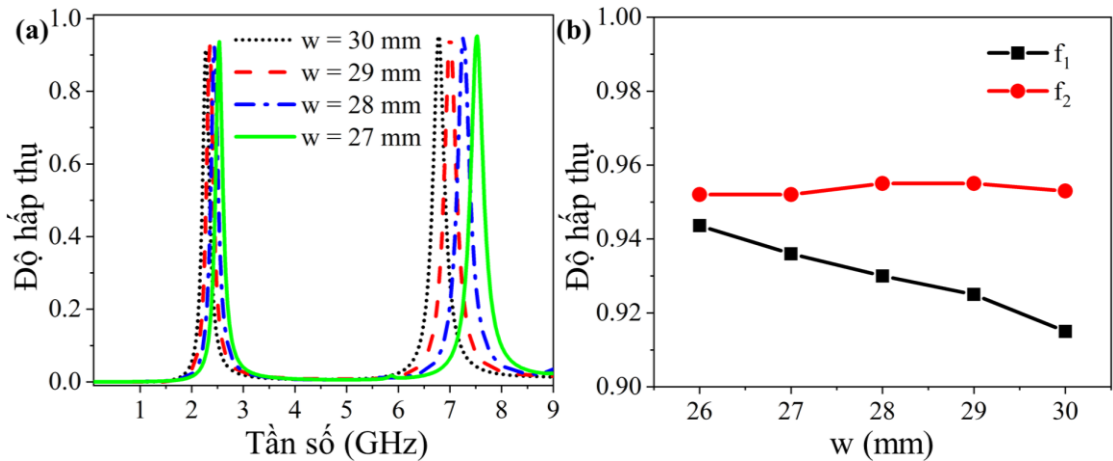
Tiếp theo, ảnh hưởng của các tham số cấu trúc lên tính chất hấp thụ của vật liệu đề xuất được khảo sát. Đầu tiên là độ dày lớp điện môi. Phổ hấp thụ của vật liệu khi độ dày lớp điện môi thay đổi từ 1,0 mm đến 3,0 mm được mô phỏng và trình bày trên Hình 3.4. Có thể quan sát thấy khi độ dày lớp điện môi tăng từ 1,0 mm đến 3,0 mm thì đỉnh hấp thụ bị dịch chuyển về phía tần số thấp hơn, đặc biệt là các đỉnh cộng hưởng bậc cao [Hình 3.4(a)]. Sự dịch chuyển đó khi tăng t_d có thể được giải thích gần đúng theo mô hình mạch điện dao động LC tương đương: với các giá trị của các tham số hình học đang xét, giá trị hiệu dụng của cuộn cảm (cấu trúc hình vuông) ảnh hưởng mạnh đến vị trí cộng hưởng của cấu trúc. Theo công thức (3.3) và (3.6), khi t_d tăng lên, giá trị của L_m tăng lên đáng kể, trong khi đó giá trị của C_m giảm không đáng kể, kết quả dẫn đến tần số cộng hưởng của vật liệu bị giảm xuống. Bên cạnh sự dịch chuyển của đỉnh hấp thụ, cường độ của các đỉnh hấp thụ cũng bị thay đổi [Hình 3.4(b)]. Với đỉnh cộng hưởng cơ bản, khi t_d tăng từ 1,0 mm đến 3,0 mm, độ hấp thụ giảm từ 96,2% xuống còn 57,66%. Đỉnh hấp thụ bậc ba có cường độ tăng dần khi t_d tăng và đạt cực đại khi $t_d = 1,5$ mm. Nếu tiếp tục tăng t_d , độ hấp thụ của đỉnh này lại giảm xuống, tuy nhiên độ giảm là không đáng kể. Có thể nhận thấy giá trị tốt nhất của t_d là 1,2 mm, khi đó cả hai đỉnh hấp thụ f_1 và f_2 có cường độ lần lượt là 91,5% và 95,3 %.



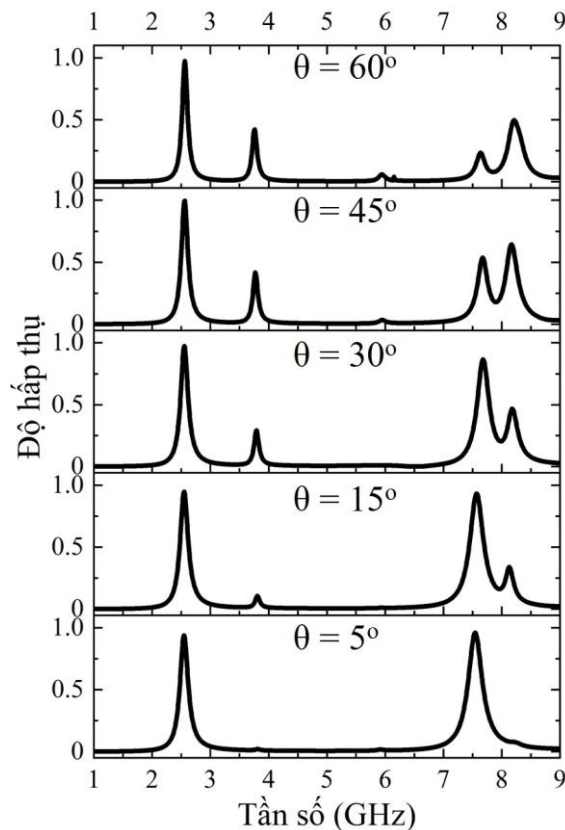
Hình 3.4. Phổ hấp thụ (a) và độ hấp thụ (b) phụ thuộc vào độ dày lớp điện môi.

Ảnh hưởng của kích thước tâm kim loại hình vuông w lên đặc trưng hấp thụ của H-MPA được khảo sát khi cố định giá trị độ dày lớp điện môi là $t_d = 1,2$ mm. Kết quả được biểu diễn trên Hình 3.5(a). Khi w tăng từ 27 mm đến 30 mm, có sự dịch chuyển của phổ hấp thụ về phía tần số thấp hơn. Sự dịch chuyển này là do khi kích thước của cấu trúc cộng hưởng tăng đã làm tăng điện dung C_m theo công thức (3.3),

dẫn đến tần số cộng hưởng giảm xuống. Ngoài ra, các đỉnh hấp thụ có cường độ thay đổi phụ thuộc vào giá trị của w . Cụ thể, khi w tăng từ 27 mm đến 30 mm, độ hấp thụ của đỉnh cơ bản giảm từ 93,6% xuống còn 91,5%. Ngược lại, đỉnh hấp thụ bậc ba có cường độ tăng khi w tăng từ 27 mm đến 30 mm, tuy nhiên độ tăng này là không đáng kể, độ hấp thụ của đỉnh này vẫn được duy trì trên 95% cho tất cả các giá trị của w được khảo sát. Như vậy, với giá trị $w = 27$ mm và $t_d = 1,2$ mm, trong dải tần số đang xét, vật liệu đề xuất cho hai đỉnh hấp thụ tại 2,53 GHz (độ hấp thụ 93,6%) và tại 7,53 GHz (độ hấp thụ 95,2%).

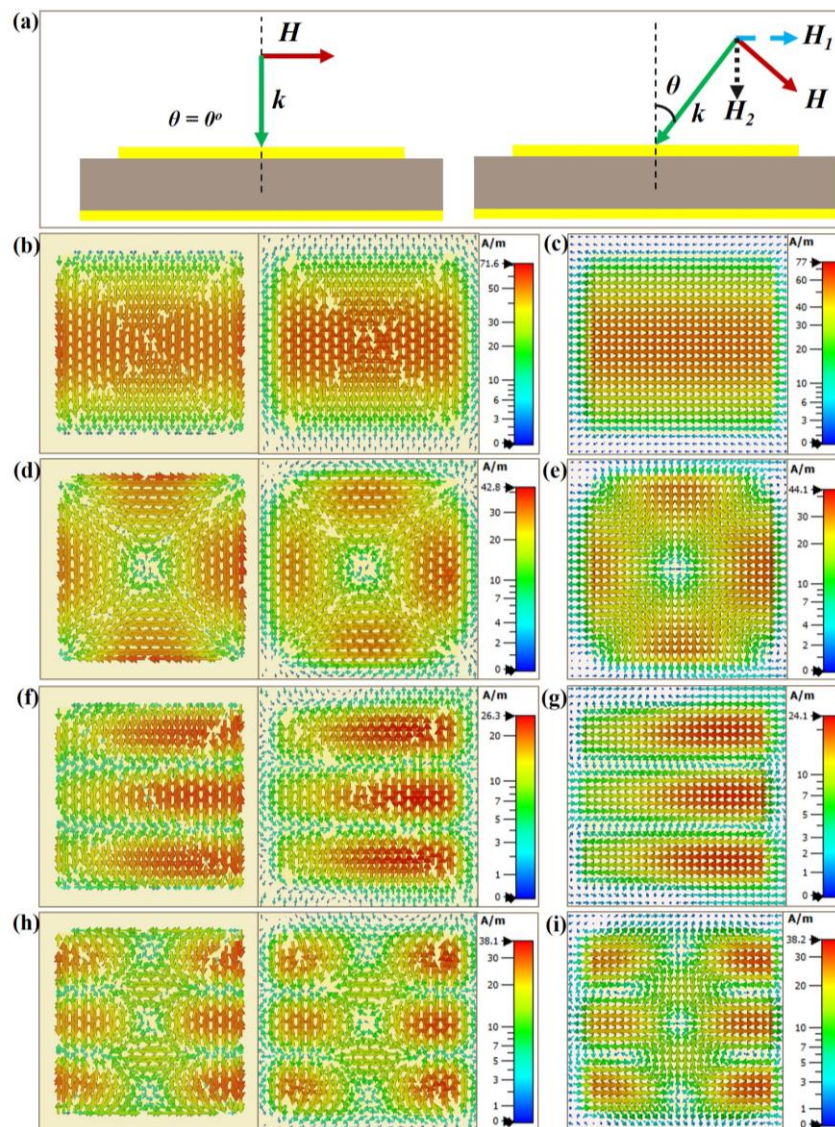


Hình 3.5. Ảnh hưởng của kích thước cấu trúc cộng hưởng w lên (a) phổ hấp thụ và (b) độ hấp thụ tại các tần số f_1 và f_2 .



Hình 3.6. Ảnh hưởng của góc tới θ đến phổ hấp thụ của vật liệu.

Ảnh hưởng của góc tới lên tính chất hấp thụ của vật liệu đề xuất được khảo sát và biểu diễn trên Hình 3.6. Khi góc tới tăng từ 0 đến 60°, đỉnh hấp thụ cơ bản tại tần số khoảng 2,56 GHz vẫn được duy trì tốt với độ hấp thụ luôn lớn hơn 90% và vị trí đỉnh hấp thụ hầu như không thay đổi. Đặc biệt, khi góc tới θ tăng từ 5° đến 45°, độ hấp thụ của đỉnh này tăng từ 93,7% đến 99,7%. Tiếp tục tăng góc tới lên 60°, độ hấp thụ lại giảm một chút xuống còn 97,4%. Tuy nhiên, khi tăng góc tới θ từ 5° đến 60° đỉnh hấp thụ bậc ba có độ hấp thụ giảm từ 96% xuống 23,3%, đồng thời vị trí đỉnh hấp thụ đã dịch chuyển từ 7,54 tới 7,65 GHz. Ngoài ra, khi sóng tới có phương xiên góc với bề mặt vật liệu, có sự xuất hiện thêm hai đỉnh hấp thụ tại 3,8 GHz và 8,2 GHz, góc tới càng lớn thì độ hấp thụ của các đỉnh mới này cũng càng lớn. Khi $\theta = 60^\circ$ đỉnh hấp thụ mới tại 3,8 GHz và 8,2 GHz có độ hấp thụ lần lượt là 42,2% và 49,8%.

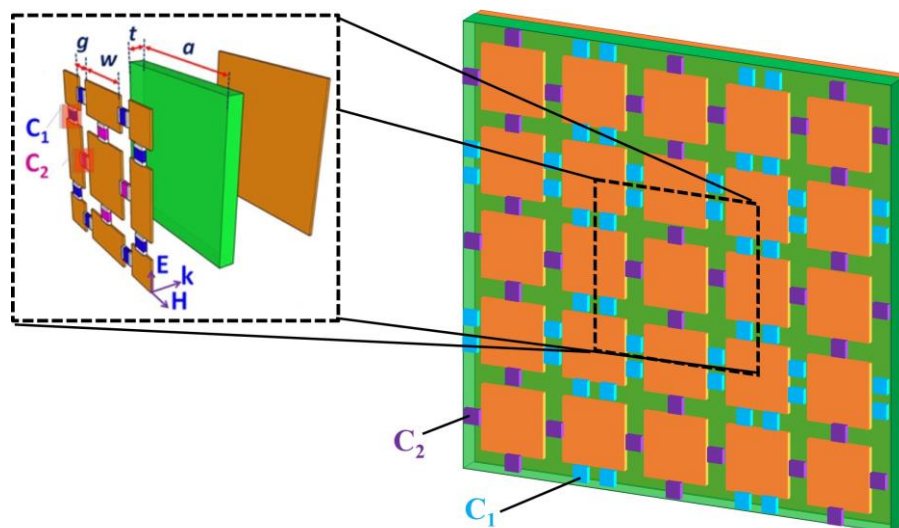


Hình 3.7. (a) Minh họa mô hình sóng tới bề mặt vật liệu theo phương vuông góc ($\theta = 0^\circ$) và xiên góc, phân bố dòng điện bề mặt và từ trường: (b) và (c) tại 2,56 GHz, (d) và (e) tại 3,8GHz, (f) và (g) tại 7,54 GHz, (h) và (i) tại 8,2 GHz.

Nguồn gốc của các đỉnh hấp thụ mới được làm rõ bởi phân bố dòng điện và từ trường trong cấu trúc cộng hưởng tại các đỉnh hấp thụ (Hình 3.7). Dễ thấy, khi sóng điện từ truyền tới vật liệu theo phương xiên góc, thành phần từ trường của sóng điện từ không còn song song với bề mặt vật liệu. Lúc này ta có thể phân tích từ trường thành hai thành phần, thành phần H_1 song song với bề mặt vật liệu và thành phần H_2 vuông góc với bề mặt vật liệu, như biểu diễn trên Hình 3.7(a). Quan sát phân bố dòng điện trên hai mặt kim loại của vật liệu tại 2,56 GHz [Hình 3.7(b)] và 7,65 GHz [Hình 3.7(f)], có thể nhận thấy rằng hai đỉnh hấp thụ mới này vẫn có nguồn gốc cộng hưởng từ cơ bản và bậc ba, tương tự như trường hợp sóng tới theo phương vuông góc. Với các đỉnh hấp thụ mới tại 3,8 GHz và 8,2 GHz, phân bố dòng điện bề mặt có dạng hoàn toàn khác [Hình 3.7(d) và (h)]. Điều này được cho là do có sự xuất hiện của thành phần từ trường vuông góc H_2 , dòng điện vòng trên bề mặt được tạo ra, từ đó góp phần vào cơ chế hấp thụ và kết quả là các đỉnh hấp thụ mới được kích thích [43].

3.1.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA được tích hợp tụ điện

Qua các kết quả mô phỏng được trình bày ở phần trên, có thể thấy rằng, trong dải tần số từ 0,1 đến 9,0 GHz, cấu trúc cộng hưởng dạng hình vuông đề xuất có hai đỉnh hấp thụ. Hai đỉnh này có nguồn gốc từ các cộng hưởng từ cơ bản và cộng hưởng từ bậc ba. Với mục tiêu nhận được H-MPA hoạt động trong băng tần VHF và băng tần S, từ nghiên cứu đã được báo cáo [28], các tụ điện có điện dung C_1 và C_2 được gắn vào khoảng trống giữa các tấm hình vuông trên bề mặt vật liệu.

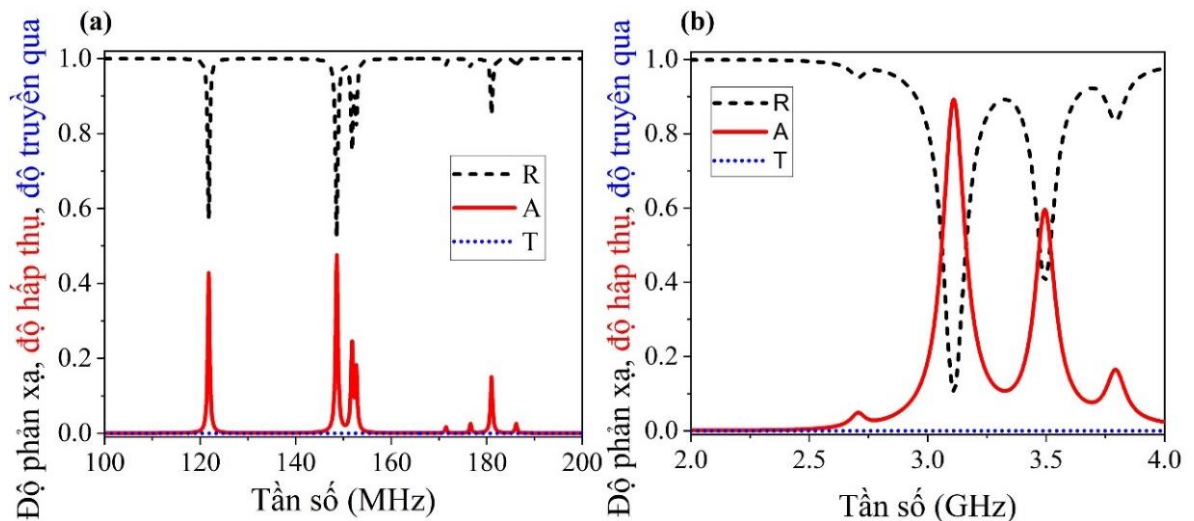


Hình 3.8. Sơ đồ minh họa cấu trúc siêu ô cơ sở của H-MPA khi được tích hợp tụ điện.

Hình 3.8 trình bày cấu trúc của H-MPA sau khi tích hợp các tụ điện C_1 và C_2 vào khoảng trống giữa các cấu trúc cộng hưởng trên bề mặt vật liệu. Lúc này, cấu trúc mới sẽ trở thành siêu ô cơ sở (Super unit cell). Mỗi siêu ô cơ sở này bao gồm chín tấm đồng có độ dày là $t_m = 0,035$ mm: tấm hình vuông ở tâm có độ dài cạnh là

w , bốn tấm hình vuông ở bốn góc có độ dài cạnh là $w/2$ và bốn tấm hình chữ nhật ở bốn cạnh có chiều dài w và chiều rộng là $w/2$. Khoảng trống giữa các tấm đồng này là g . Dễ thấy rằng, khi cấu trúc trở thành dạng siêu ô cơ sở, hằng số mạng của cấu trúc đã tăng lên là $a = 66$ mm. Đầu tiên chúng tôi lựa chọn các tham số cấu trúc như đã được tối ưu ở phần trên, nghĩa là $w = 27$ mm, $t_d = 1,2$ mm. Khi đó, giá trị của g là 6 mm. Các tụ điện C_1 và C_2 có điện dung lần lượt là 180 và 360 pF.

Vì hằng số mạng của vật liệu tích hợp được tăng lên đáng kể so với trường hợp đã khảo sát ở mục 3.1.1, theo các nghiên cứu trước đây cho trường hợp vật liệu bao gồm các tụ điện, phổ hấp thụ của vật liệu có thể bị dịch về phía tần số thấp (bị dịch đỏ) [28]. Do đó đặc trưng điện từ của vật liệu tích hợp này trong cả hai dải tần số, băng tần VHF (30 – 300 MHz) và băng tần S (2,0 – 4,0 GHz) đã được mô phỏng. Trong vùng VHF, vật liệu có năm đỉnh hấp thụ tại 121,8 MHz (độ hấp thụ 42,8%), 148,6 MHz (độ hấp thụ 47,56%), 151,82 MHz (độ hấp thụ 24,6%) và 181 MHz (độ hấp thụ 15%). Trong băng tần S, vật liệu có ba đỉnh hấp thụ ở 3,11 GHz (độ hấp thụ 89,2%), 3,5 GHz (độ hấp thụ 59,2%) và 3,79 GHz (độ hấp thụ 16,5%). Nguyên nhân của độ hấp thụ thấp là do khi tích hợp các tụ điện vào khoảng trống giữa các tấm kim loại ở mặt trên của vật liệu đã làm thay đổi các giá trị điện cảm và điện dung hiệu dụng của vật liệu. Khi đó, điều kiện phối hợp trở kháng không được thỏa mãn, dẫn đến thành phần phản xạ của sóng điện từ tại bề mặt vật liệu không bị triệt tiêu, như quan sát thấy trên Hình 3.9.



Hình 3.9. Phổ phản xạ (R), hấp thụ (A) và truyền qua (T) của H-MPA tích hợp tụ điện trong (a) băng tần VHF và (b) băng tần S.

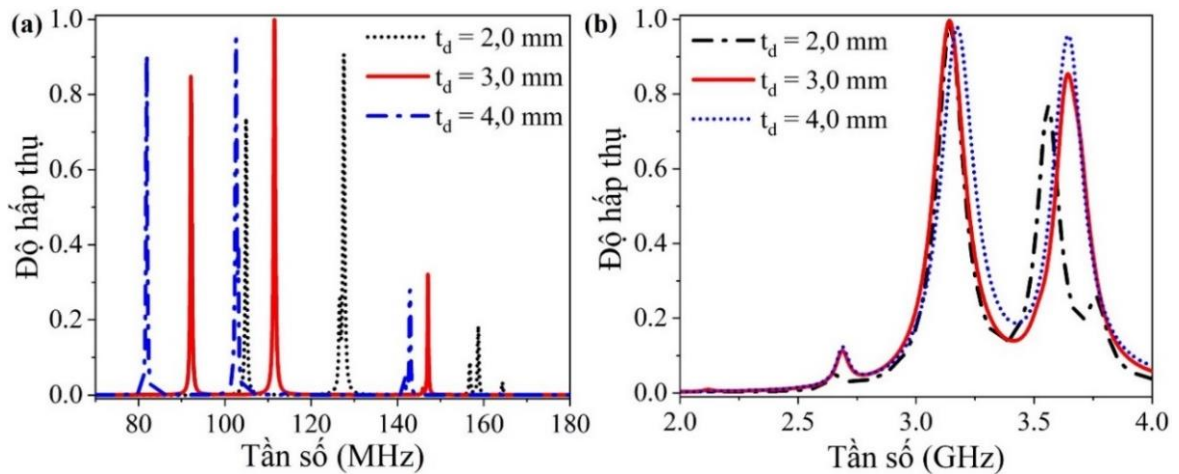
Để cải thiện độ hấp thụ, các tham số độ dày lớp điện môi t_d và kích thước tấm kim loại trung tâm w được tối ưu. Đầu tiên, sự phụ thuộc của phổ hấp thụ của vật liệu vào t_d được khảo sát, với giá trị của t_d tăng từ 2,0 mm đến 4,0 mm, trong đó giá trị

của w được giữ cố định là 27 mm. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 3.10. Trong băng tần VHF, khi độ dày lớp điện môi tăng lên, phổ hấp thụ vẫn thể hiện ba đỉnh hấp thụ, tuy nhiên có quan sát thấy sự dịch đồ. Đặc biệt, khi lớp điện môi có độ dày tăng lên thì độ hấp thụ của các đỉnh này đều tăng. Các vị trí đỉnh hấp thụ, độ hấp thụ khi t_d thay đổi được trình bày cụ thể trong Bảng 3.1

Bảng 3.1. Số liệu phổ hấp thụ mô phỏng của MPA được đề xuất khi t_d thay đổi.

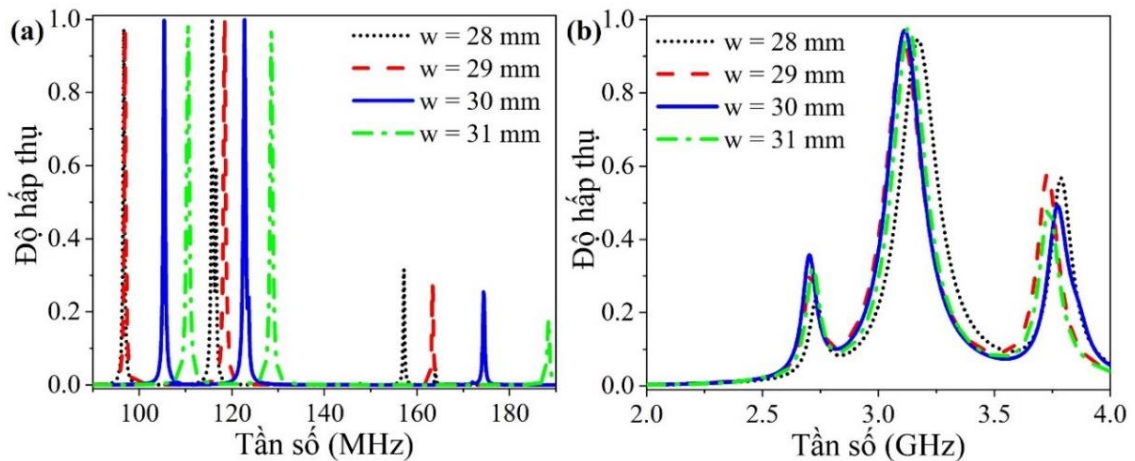
STT	t_d (mm)	Đỉnh hấp thụ thứ nhất		Đỉnh hấp thụ thứ hai		Đỉnh hấp thụ thứ ba	
		Vị trí (MHz)	Độ hấp thụ (%)	Vị trí (MHz)	Độ hấp thụ (%)	Vị trí (MHz)	Độ hấp thụ (%)
1	2	104,9	73,43%	127,57	90,41%	158,8	18,07%
2	3	92,15	84,92	111,5	99,88	147,08	32,08
3	4	81,95	90,6%	102,61	94,77	142,85	30,11

Phổ hấp thụ của vật liệu ứng với các giá trị khác nhau của độ dày lớp điện môi trong băng tần S được trình bày trong Hình 3.10(b). Khi t_d tăng từ 2,0 mm đến 4,0 mm, đỉnh hấp thụ ở phía tần số thấp có sự thay đổi nhỏ về cả cường độ và vị trí, trong khi đó đỉnh hấp thụ ở phía tần số cao hơn có cường độ tăng lên và bị dịch chuyển đáng kể. Cụ thể, khi $t_d = 2,0$ mm, hai đỉnh hấp thụ có vị trí tại 3,14 GHz (độ hấp thụ 98,85%), 3,56 GHz (độ hấp thụ 76,6%) và một đỉnh hấp thụ cường độ thấp tại 3,76 GHz (độ hấp thụ 25,78%). Khi $t_d = 3,0$ mm, hai đỉnh hấp thụ có vị trí tại 3,14 GHz (độ hấp thụ 99,64%) và 3,64 GHz (độ hấp thụ 85,36%); khi $t_d = 4,0$ mm, hai đỉnh hấp thụ có vị trí tại 3,17 GHz (độ hấp thụ 97,76%) và 3,65 GHz (độ hấp thụ 95,71%). Từ các kết quả trên, có thể kết luận rằng tham số độ dày của lớp điện môi có ảnh hưởng khá nhiều các đỉnh hấp thụ trong băng tần VHF, trong khi đó đỉnh hấp thụ trong băng tần S ít chịu ảnh hưởng hơn.



Hình 3.10. Ảnh hưởng của độ dày lớp điện môi lên phổ hấp thụ trong (a) băng tần VHF và (b) băng tần S.

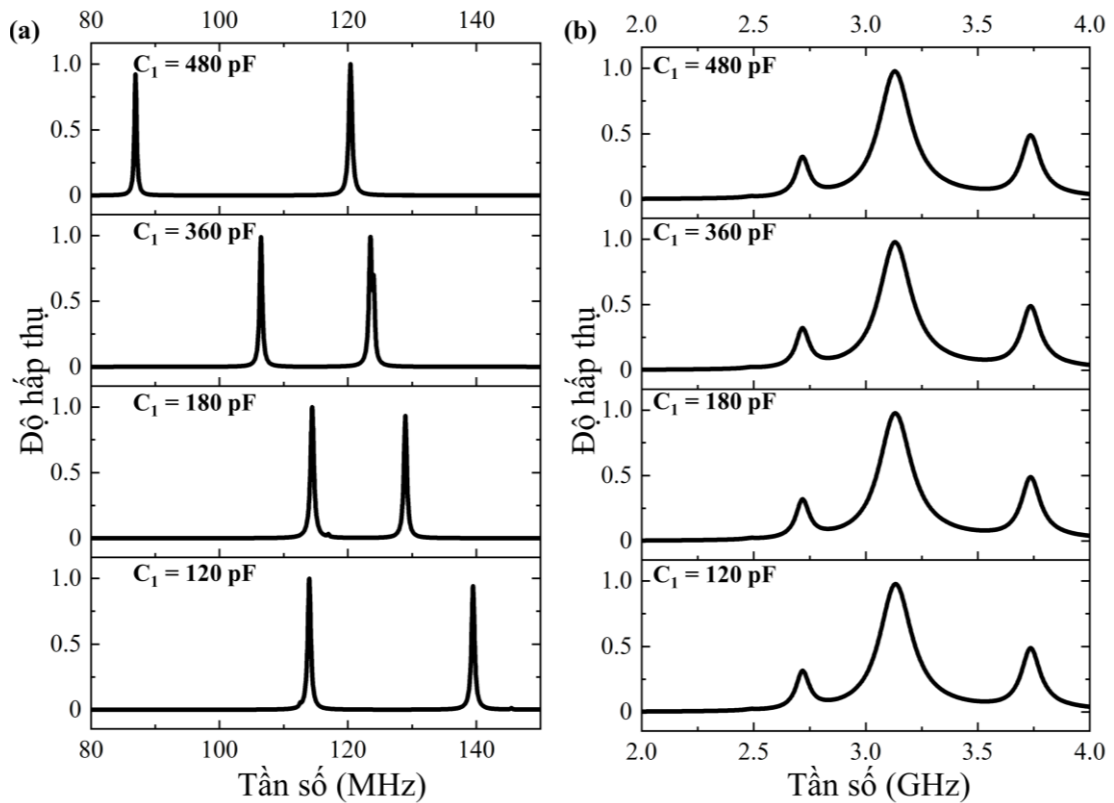
Ảnh hưởng của kích thước các tấm kim loại (đặc trưng bởi giá trị w) đến tính chất hấp thụ của vật liệu tích hợp được khảo sát, với độ dày lớp điện môi được giữ cố định là $t_d = 3,0$ mm. Kết quả được trình bày trên Hình 3.11 cho thấy, khi tăng kích thước của tấm kim loại từ 28 đến 31 mm, các đỉnh cộng hưởng trong băng tần VHF bị dịch chuyển đáng kể về phía tần số cao và độ hấp thụ của hai đỉnh đầu tiên có giá trị lớn nhất khi $w = 30$ mm. Với các đỉnh cộng hưởng trong băng tần S, phổ hấp thụ vẫn có ba đỉnh, cường độ và vị trí của các đỉnh này có sự thay đổi không đáng kể khi thay đổi w . Như vậy, đỉnh hấp thụ trong băng tần VHF nhạy với sự thay đổi của tham số w , trong khi đó đỉnh hấp thụ trong băng tần S không thay đổi nhiều khi thay đổi w . Từ các kết quả phân tích ở trên, các tham số cấu trúc tối ưu có thể chọn để chế tạo mẫu là $a = 66,0$ mm, $t_d = 3,0$ mm, $w = 30,0$ mm.



Hình 3.11. Ảnh hưởng của kích thước tấm kim loại ở mặt trên của ô cơ sở lên phổ hấp thụ trong (a) băng tần VHF và (b) băng tần S.

3.1.3. Khảo sát ảnh hưởng của tụ điện đến tính chất hấp thụ của vật liệu

Để làm rõ hơn vai trò của các tụ điện được tích hợp trên bề mặt vật liệu, ảnh hưởng của các tụ điện đến tính chất hấp thụ của vật liệu được khảo sát. Hình 3.12 trình bày phổ hấp thụ của vật liệu phụ thuộc vào điện dung của tụ điện C_1 trong khi điện dung của tụ điện C_2 được giữ cố định là 180 pF. Dễ dàng quan sát thấy trên Hình 3.12 (a), khi tụ điện C_1 có điện dung tăng từ 120 pF đến 480 pF, vị trí của các đỉnh hấp thụ trong băng tần VHF dịch chuyển về phía tần số thấp hơn. Bên cạnh đó, cường độ của các đỉnh hấp thụ có sự thay đổi nhưng không đáng kể, tất cả các đỉnh hấp thụ đều giữ được cường độ trên 90%. Vị trí đỉnh hấp thụ, độ hấp thụ khi điện dung C_1 thay đổi được trình bày cụ thể trong Bảng 3.2. Đối với các đỉnh hấp thụ bậc cao trong băng tần S, chúng tôi quan sát thấy khi tăng điện dung của C_1 , phổ hấp thụ hầu như không thay đổi [Hình 3.12(b)].



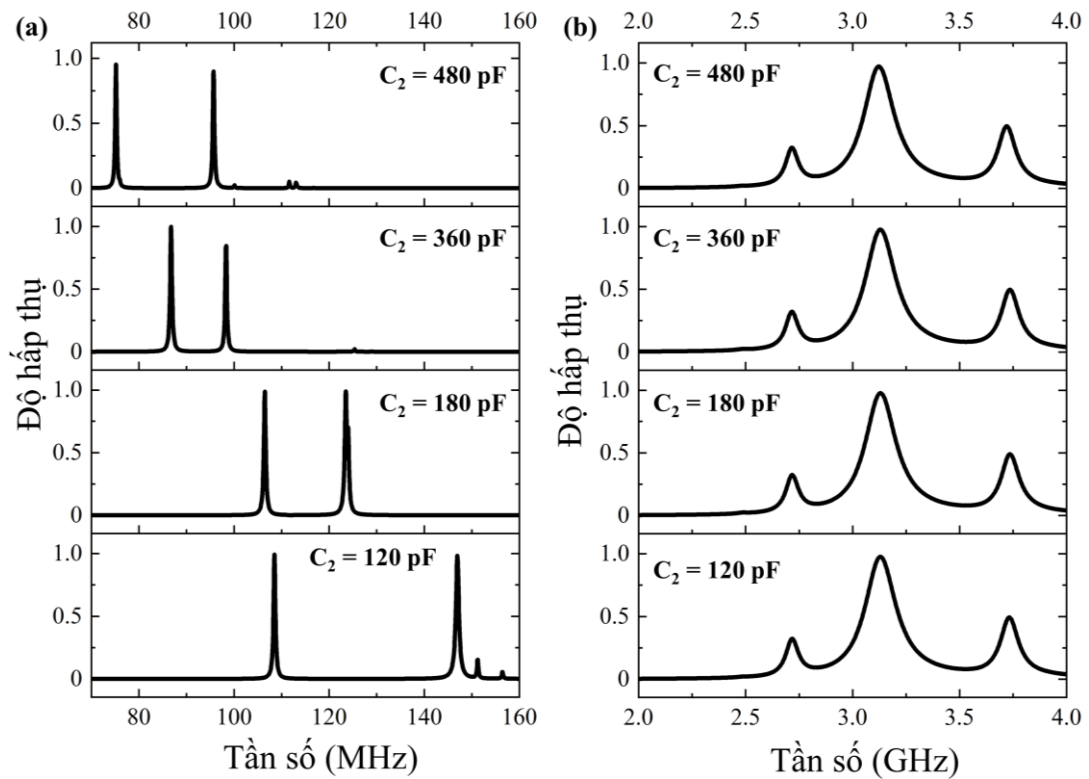
Hình 3.12. Ảnh hưởng của giá trị điện dung của tụ điện C_1 lên phổ hấp thụ của H-MPA trong các băng tần (a) VHF và (b) S.

Bảng 3.2. Số liệu phổ hấp thụ mô phỏng trong băng tần VHF của H-MPA được đề xuất khi điện dung C_1 thay đổi.

STT	C_1 (pF)	Đỉnh hấp thụ thứ nhất		Đỉnh hấp thụ thứ hai	
		Vị trí (MHz)	Độ hấp thụ (%)	Vị trí (MHz)	Độ hấp thụ (%)
1	120	114	99,85	139,5	94,2
2	180	113,9	99,94	129	93,15
3	360	106	99,5	123,4	99,7
4	480	86,9	92,2	120,4	99,97

Hình 3.13 trình bày phổ hấp thụ của vật liệu khi điện dung của tụ điện C_2 thay đổi với điện dung của tụ điện C_1 được giữ cố định là 360 pF. Dễ thấy rằng, khi điện dung của C_2 tăng dần từ 120 pF đến 480 pF, các đỉnh hấp thụ cũng có sự dịch chuyển về phía tần số thấp. Vị trí đỉnh hấp thụ, độ hấp thụ khi điện dung C_1 thay đổi được trình bày cụ thể trong Bảng 3.3. Đối với các đỉnh hấp thụ bậc cao trong băng tần S, khi tăng điện dung của tụ điện C_2 , phổ hấp thụ hầu như không thay đổi [Hình 3.13(b)]. Từ các kết quả mô phỏng được trình bày ở trên, chúng ta có thể kết luận rằng các tụ điện có vai trò quan trọng làm dịch chuyển vị trí các đỉnh hấp thụ cơ bản mà ít ảnh hưởng đến cường độ của chúng. Sự dịch chuyển vị trí của đỉnh hấp thụ cơ bản về phía

tần số thấp hơn khi tăng điện dung của các tụ điện được giải thích là khi điện dung của các tụ điện tăng lên sẽ làm tăng điện dung hiệu dụng của vật liệu dẫn đến giảm tần số cộng hưởng [theo công thức (3.3) và (3.7)]



Hình 3.13. Ảnh hưởng của giá trị điện dung của tụ điện C_2 lên phổ hấp thụ của H-MPA trong các băng tần (a) VHF và (b) S.

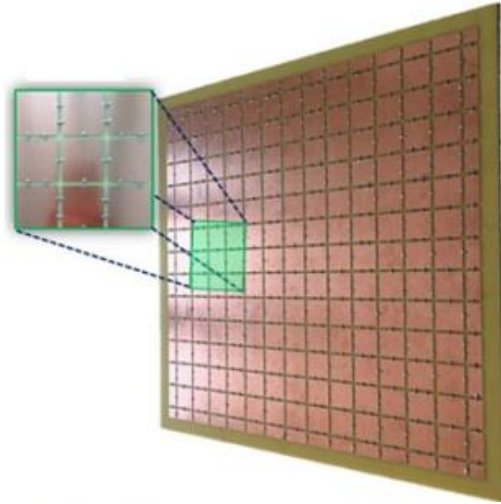
Bảng 3.3. Số liệu phổ hấp thụ mô phỏng trong băng tần VHF của H-MPA được đề xuất khi điện dung C_2 thay đổi.

STT	C_2 (pF)	Đỉnh hấp thụ thứ nhất		Đỉnh hấp thụ thứ hai	
		Vị trí (MHz)	Độ hấp thụ (%)	Vị trí (MHz)	Độ hấp thụ (%)
1	120	108,5	99,2	147	98,3
2	180	106	98,9	123,5	99,1
3	360	86,8	99,8	98,3	84,6
4	480	75	96,5	95,5	91,1

3.1.4. Ảnh hưởng của góc tới sóng điện từ lên đặc trưng hấp thụ của H-MPA

Để đánh giá đặc trưng hấp thụ của H-MPA đề xuất hoạt động dưới sóng điện từ với góc tới khác nhau, phổ hấp thụ của H-MPA khi góc tới thay đổi được khảo sát. Từ các kết quả mô phỏng ảnh hưởng của các tham số cấu trúc và tụ điện trình bày ở trên, các tham số tối ưu được lựa chọn để chế tạo vật liệu bao gồm: kích thước ô cơ

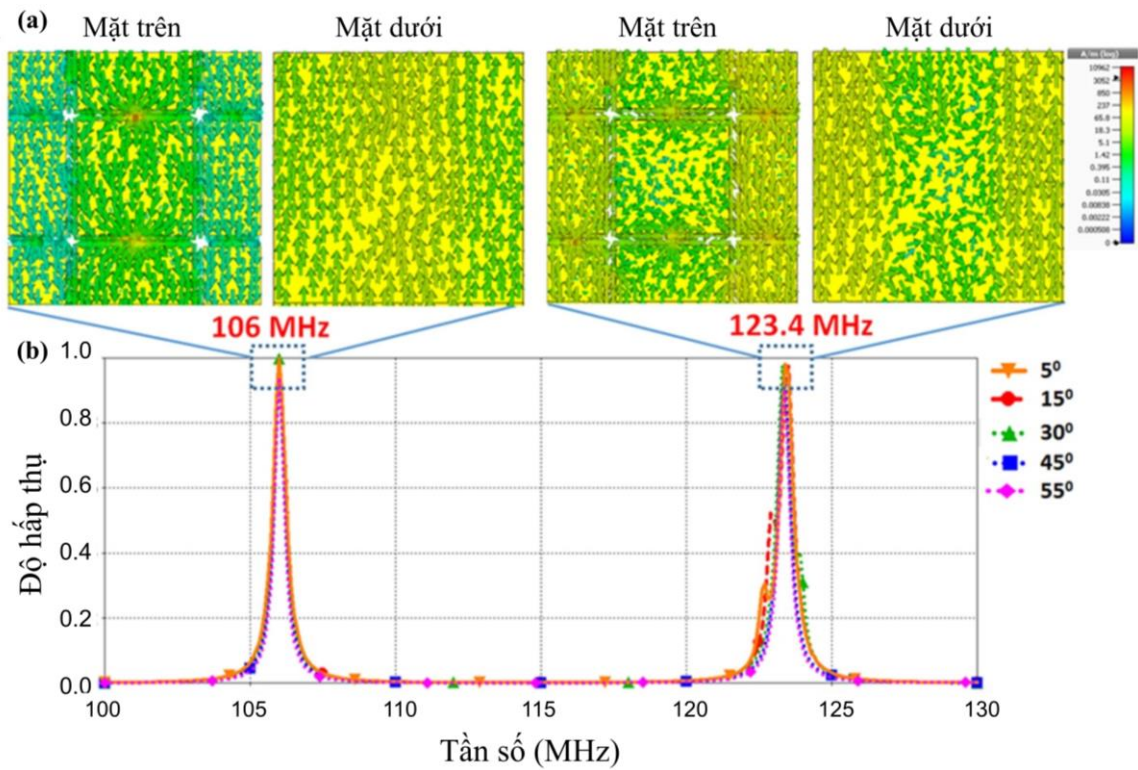
sở $a = 66,0$ mm, độ dày lớp điện môi $t_d = 3,0$ mm, kích thước tấm kim loại $w = 30,0$ mm, điện dung của các tụ điện là $C_1 = 180$ pF và $C_2 = 360$ pF. Mẫu vật liệu có kích thước 80×80 cm² được chế tạo (Hình 3.14). Đầu tiên, các tấm kim loại đồng tại mặt trên của mẫu được chế tạo bằng kỹ thuật quang khắc. Sau đó, 2028 tụ điện được gắn vào các khoảng trống giữa các tấm kim loại bằng kỹ thuật hàn linh kiện.



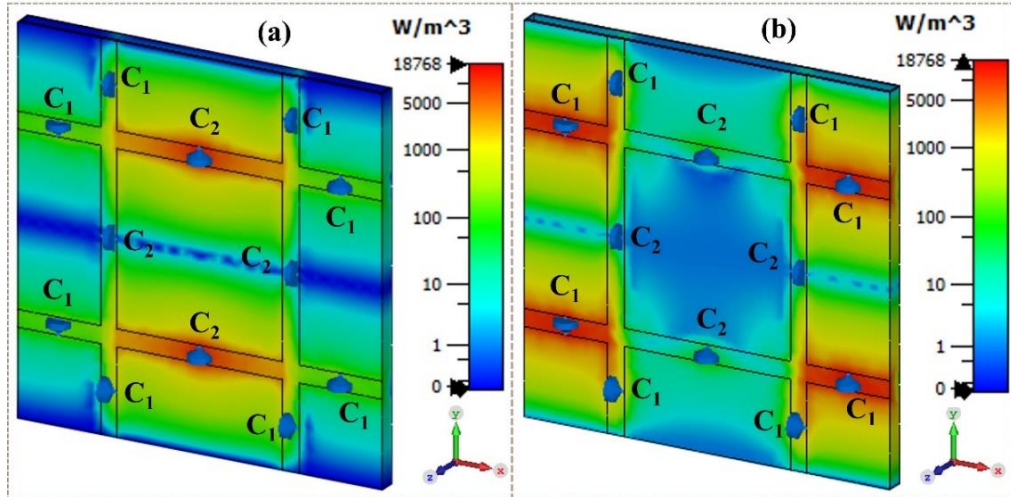
Hình 3.14. Mẫu H-MPA chế tạo được

Vì hạn chế về giới hạn vùng tần số đo đạc của thiết bị đo Vector Network Analyzer, ảnh hưởng của góc tới lên tính chất chấp thụ của vật liệu trong vùng tần số VHF được khảo sát bằng phương pháp mô phỏng và kết quả được trình bày trong Hình 3.15. Dễ thấy, vật liệu có hai đỉnh hấp thụ tại các tần số rất thấp 106,0 và 123,4 MHz với cường độ trên 99%. So sánh độ dày hiệu dụng và chu kỳ của ô cơ sở với bước sóng cộng hưởng của vật liệu đề xuất chúng tôi nhận được kết quả là độ dày hiệu dụng và chu kỳ của ô cơ sở được thu nhỏ tới kích thước là $0,001\lambda$ và $0,02\lambda$, trong đó λ là bước sóng tương ứng với tần số 106 MHz.

Hình 3.15(a) mô tả phân bố dòng điện trên bề mặt kim loại của cấu trúc tại 106 và 123,4 MHz. Tại cả hai tần số cộng hưởng, dòng điện tại hai mặt kim loại, trên và dưới của cấu trúc, có chiều ngược nhau, trong đó, tại tần số 106 MHz, dòng điện có mật độ cao tại các tấm kim loại trung tâm của ô cơ sở, tuy nhiên ở 123,4 MHz, dòng điện lại phân bố chủ yếu trên các tấm kim loại ở hai bên rìa của ô cơ sở. Điều này cho thấy bản chất vật lý của hai đỉnh hấp thụ của vật liệu trong băng tần VHF là do cộng hưởng từ cơ bản. Ngoài ra, cũng quan sát thấy rằng dòng điện phân bố không đối xứng, điều này được lí giải là do có sự tích hợp các tụ điện tại các khoảng trống giữa các tấm kim loại. Ảnh hưởng của góc tới lên các đỉnh cộng hưởng trong băng tần VHF được mô phỏng và trình bày trên Hình 3.15(b). Có thể nhận thấy rằng, vị trí của các đỉnh hấp thụ này không phụ thuộc vào góc tới θ .



Hình 3.15. (a) Phân bố dòng điện trên bề mặt kim loại tại 106 MHz và 123,4 MHz và (b) phổ hấp thụ trong vùng băng tần VHF của vật liệu phụ thuộc góc tới của sóng điện từ θ .

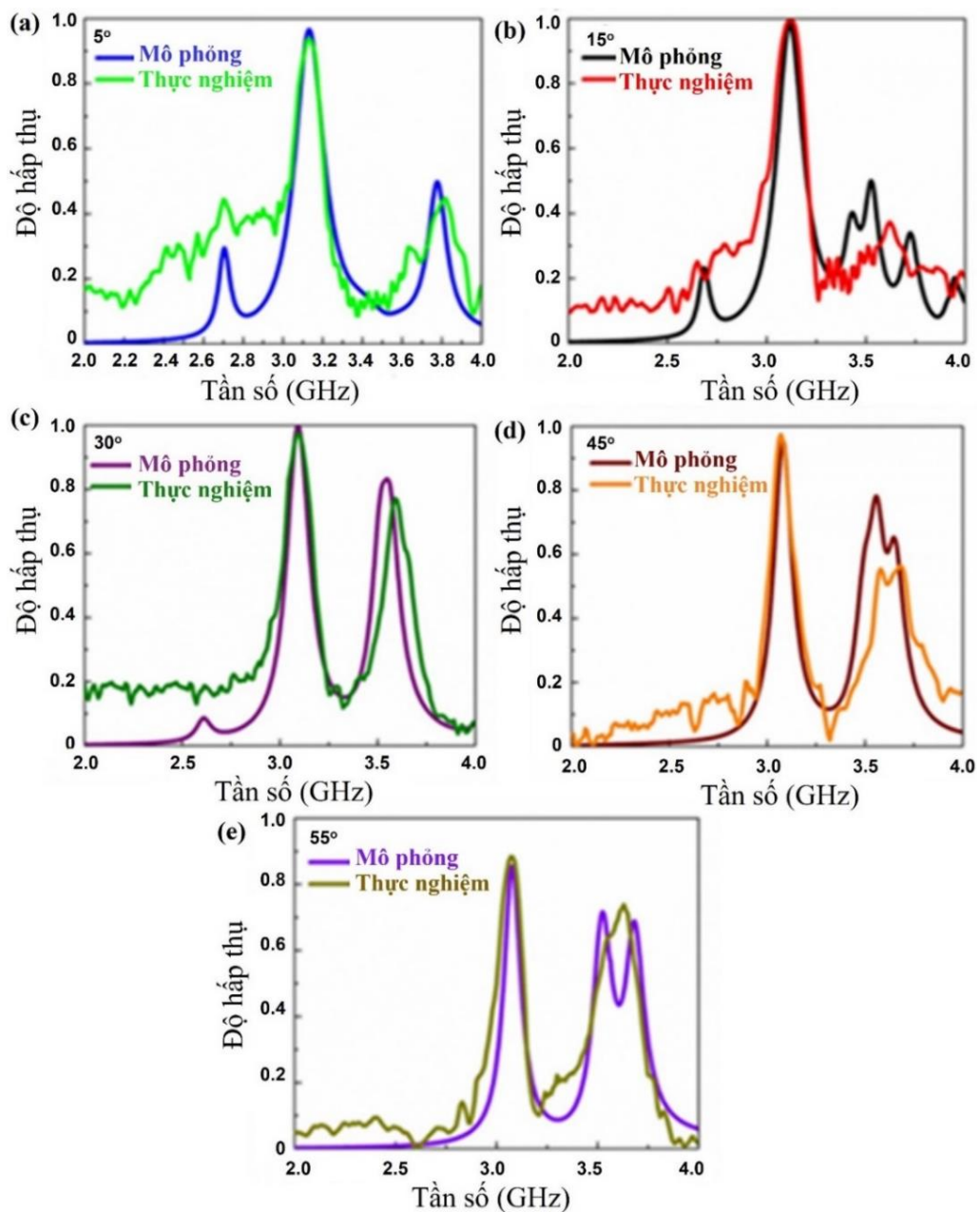


Hình 3.16. Phân bố tổn hao (a) tại 106 MHz và (b) tại 123,4 MHz.

Có thể làm rõ vai trò của các tụ điện C_1 và C_2 với việc hình thành hai đỉnh hấp thụ này qua kết quả mô phỏng phân bố tổn hao điện môi (Hình 3.16). Rõ ràng, năng lượng của sóng điện từ tới đã bị tiêu hao hoàn toàn bên trong vật liệu. Theo hướng của điện trường ngoài, ở tần số 106 MHz, tổn hao điện năng chủ yếu tập trung chủ yếu ở phần xung quanh tụ điện C_2 và ở tần số 123,4 MHz, tổn hao điện năng chủ yếu tập trung tại hai bên trái và bên phải của ô cơ sở, xung quanh tụ điện C_1 . Nói cách khác, các tấm kim loại ở tâm ô cơ sở (chứa tụ điện C_2) đóng vai trò chính trong việc tạo ra đỉnh hấp thụ tại 106 MHz. Các tấm kim loại ở hai bên rìa ô cơ sở (dọc theo

phương điện trường) được nối với nhau bởi các tụ điện C_I , chủ yếu tạo ra đỉnh cộng hưởng ở tần số 123,4 MHz [28].

Ảnh hưởng của góc tới lên các đỉnh hấp thụ bậc cao trong băng tần S được khảo sát bằng cả phương pháp mô phỏng và thực nghiệm. Hệ số phản xạ được đo bằng hệ VNA với sóng điện từ phân cực TE và góc tới thay đổi. Trong phép đo này, giá trị tối thiểu của góc tới là $\theta \approx 5^\circ$, do kích thước của ăng ten. Trong quá trình đo, bằng cách hiệu chỉnh phép đo với dữ liệu phản xạ của một tấm đồng liên tục có cùng kích thước với H-MPA, nên việc đo hệ số truyền qua là không cần thiết. Bằng cách này, độ hấp thụ của H-MPA được xác định từ sự khác biệt giữa tín hiệu phản xạ từ tấm đồng liên tục và tín hiệu phản xạ từ H-MPA.



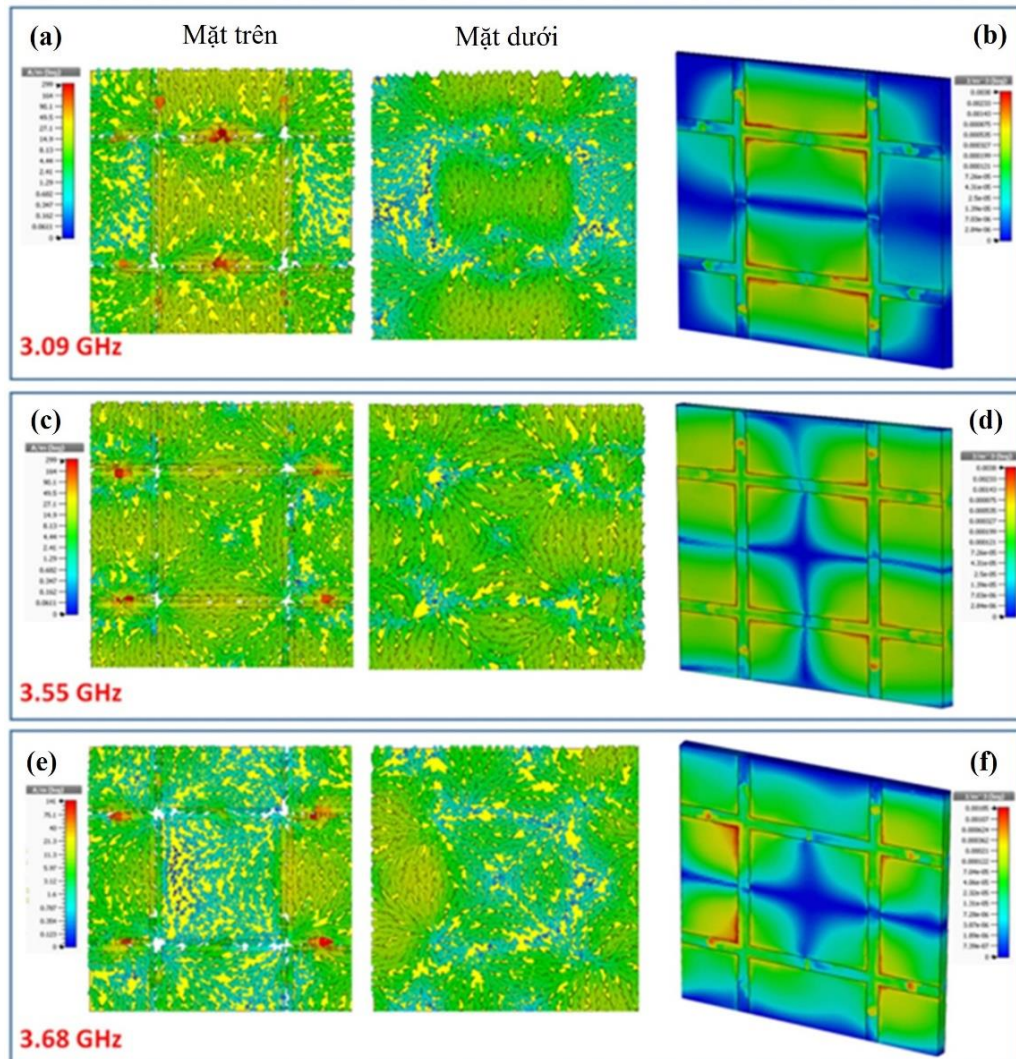
Hình 3.17. Kết quả mô phỏng và đo đạc phổ hấp thụ của H-MPA trong băng tần S với góc tới khác nhau: (a) 5° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° và (e) 55° .

Với trường hợp $\theta = 5^\circ$ [Hình 3.17 (a)], cả kết quả mô phỏng và thực nghiệm đều chỉ ra vật liệu có hai đỉnh cộng hưởng. Trong đó, theo mô phỏng, vật liệu có hai đỉnh hấp thụ tại 3,13 và 3,77 GHz với độ hấp thụ lần lượt là 96,6% và 49,8%. Phổ thực nghiệm cho thấy vật liệu có hai đỉnh hấp thụ tại 3,13 và 3,82 GHz với độ hấp thụ lần lượt là 93,9% và 44,7%. Khi góc tới tăng lên $\theta = 15^\circ$, độ hấp thụ tại tần số 3,12 GHz có giá trị là 98,3% trong mô phỏng và 99,6% trong thực nghiệm [Hình 3.17 (b)]. Khi θ được tăng lên đến 30° , kết quả mô phỏng cho thấy hai đỉnh có độ hấp thụ cao ở 3,09 (99,9%) và 3,55 GHz (83,1%); kết quả thực nghiệm cũng cho hai đỉnh hấp thụ tại 3,09 (97,6%) và 3,59 GHz (77,2%) [Hình 3.17 (c)].

Đặc biệt, khi $\theta = 45^\circ$, xuất hiện đỉnh hấp thụ thứ ba ở 3,65 GHz, độ hấp thụ là 65,1% (trong mô phỏng) và ở 3,67 GHz, độ hấp thụ là 56,5% (trong thực nghiệm) như được thể hiện trong Hình 3.17 (d). Khi $\theta = 55^\circ$, ba đỉnh hấp thụ rõ ràng hơn tại các tần số 3,08 GHz (85,6%), 3,53 GHz (71,6%) và 3,68 GHz (68,7%) trong mô phỏng và 3,07 GHz (88,3%), 3,54 GHz (63,9%) và 3,63 GHz (73,8%) trong thực nghiệm, như được biểu diễn trong Hình 3.17 (e). Có thể thấy rằng giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm có sự sai lệch nhỏ. Nguyên nhân là do khẩu độ tương đối lớn của hai ăng-ten trong phép đo ảnh hưởng tới các giá trị góc tới của sóng điện từ. Ngoài ra, thông số về hằng số điện môi và tổn hao điện môi của tấm PBC FR-4 của nhà sản xuất có thể sai khác với thông số mô phỏng, sai hỏng do quá trình chế tạo như xuất hiện các lớp kim loại thiếu khi gắn các tụ điện làm thay đổi vị trí phối hợp trở kháng và giảm độ hấp thụ so với kết quả mô phỏng. Với mục đích thu nhỏ kích thước, độ dày của H-MPA (độ hấp thụ đo được trên 90%) đã giảm xuống còn $\lambda/32,5$, $\lambda/32,3$, $\lambda/32,0$ và $\lambda/31,9$ lần lượt ứng với các tần số ở mode cộng hưởng bậc cao 3,07 ($\theta = 45^\circ$), 3,09 ($\theta = 30^\circ$), 3,12 ($\theta = 15^\circ$) và 3,13 GHz ($\theta = 5^\circ$). Những giá trị này xác nhận rằng cấu trúc của H-MPA được thiết kế trong luận án mỏng hơn các H-MPA phổ biến khác [40,41].

Cả kết quả mô phỏng và thực nghiệm đều cho thấy rằng H-MPA đề xuất có các đỉnh hấp thụ trong băng tần S. Các đỉnh hấp thụ này có nguồn gốc chủ yếu là do cộng hưởng từ bậc cao. Cụ thể, có hai đỉnh hấp thụ ở vị trí 3,09 và 3,55 GHz trong trường hợp $\theta = 30^\circ$ là do cộng hưởng từ bậc năm được kích thích, thể hiện bởi sự hình thành năm cặp dòng điện ngược chiều nhau trên các tấm kim loại phía trước và sau [Hình 3.18 (a) và (c)]. Từ phân bố mật độ năng lượng được trình bày trên Hình 3.18 (b) và (d), có thể thấy rằng tại tần số 3,09 GHz, năng lượng tập trung ở trung tâm của cấu trúc. Tuy nhiên tại 3,55 GHz, năng lượng tập trung trong toàn bộ cấu trúc. Điều này chứng tỏ rằng các tụ điện C_2 ở giữa ô cơ sở đóng vai trò chính cho việc hình

thành đỉnh hấp thụ ở tần số 3,09 GHz trong khi sự kết hợp của các tụ điện C_1 và C_2 có liên quan đến đỉnh hấp thụ ở tần số 3,55 GHz [118].



Hình 3.18. Phân bố dòng điện bề mặt và mật độ năng lượng điện tại ba cộng hưởng khác nhau: (a), (b) 3,09 GHz, (c), (d) 3,55 GHz khi $\theta = 30^\circ$ và (e), (f) 3,68 GHz khi $\theta = 55^\circ$.

Như đã chỉ ra ở phần trên, các đỉnh hấp thụ bậc cao phụ thuộc vào góc tới, khi góc tới $\theta = 55^\circ$, có thêm một đỉnh hấp thụ mới được kích thích tại 3,68 GHz. Từ phân bố dòng điện bề mặt và mật độ năng lượng [Hình 3.18 (e) và (f)], có thể chỉ ra rằng do tương tác trường gần yếu giữa các tấm kim loại (gây ra bởi tụ điện C_2 ở giữa và các tụ điện C_1 bên ngoài) dẫn đến năng lượng được phân bố tương tự như cộng hưởng từ bậc năm. Đây là nguyên nhân dẫn đến hình thành đỉnh hấp thụ này.

Từ các phân tích và bàn luận ở trên có thể thấy rằng các tụ điện tích hợp trên bề mặt vật liệu đã tạo ra cộng hưởng từ bậc năm, cho phép đạt được các đỉnh hấp thụ gần như tuyệt đối hoạt động ở cả dải tần số MHz và GHz, trong khi kích thước ô cơ sở chỉ bằng $1/32$ lần bước sóng hoạt động của vật liệu. Điều này cho thấy H-MPA được thiết kế tích hợp tụ điện có thể sẽ mở ra các ứng dụng mới trong lĩnh vực kỹ

thuật vi sóng và tần số vô tuyến (Radio Frequency – RF). Đặc biệt, việc thu nhỏ kích thước cũng như tối ưu hóa cộng hưởng cơ bản và bậc cao cho MPA đa chức năng có thể được mở rộng một cách hiệu quả cho thế hệ tiếp theo của bộ lọc tần số, cảm biến, máy dò, máy thu năng lượng tần số vô tuyến chọn lọc và nhiều ứng dụng khác trong dải tần số từ GHz đến THz.

3.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA đàn hồi hoạt động trong băng tần UHF (300 MHz – 1000 MHz) và băng tần L (1,0 – 2,0 GHz)

Trong mục 3.1, cấu trúc H-MPA tích hợp tụ điện hấp thụ trong vùng tần số thấp đã được nghiên cứu. Tuy nhiên, quá trình tích hợp một số lượng lớn tụ điện lên bề mặt cấu trúc sẽ gây khó khăn cho quá trình chế tạo. Bên cạnh đó, lớp điện môi làm từ vật liệu FR-4, tính đàn hồi kém nên sẽ hạn chế ứng dụng của vật liệu cho các trường hợp bề mặt không phẳng, gồ ghề và cho các thiết bị điện tử đeo được yêu cầu tính mềm dẻo. Do đó, trong phần này, luận án sẽ cải tiến cấu trúc bề mặt theo hướng đơn giản, dễ chế tạo, đồng thời tích hợp lớp điện môi Polyimide làm tăng tính đàn hồi cho vật liệu.

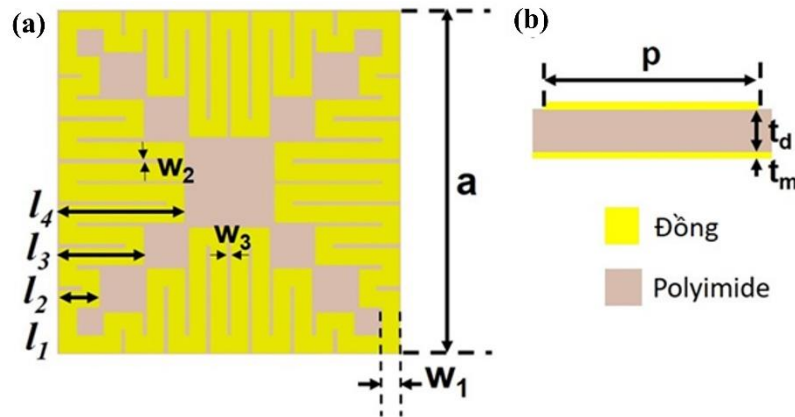
3.2.1. Thiết kế mô phỏng H-MPA đàn hồi

Từ kết quả công bố của nhóm nghiên cứu về vật liệu MPA hoạt động trong vùng tần số thấp [119], có thể thấy rằng cấu trúc cộng hưởng dạng gấp khúc có thể làm tăng kích thước của vòng cộng hưởng để nhận được đặc trưng hấp thụ trong vùng tần số thấp mà vẫn giữ được kích thước nhỏ gọn của ô cơ sở. Do đó, trong phần này của luận án, cấu trúc dạng gấp khúc được cải tiến thành dạng vòng cộng hưởng gấp khúc nhằm thu được vật liệu hấp thụ đa đỉnh dựa trên hiệu ứng cộng hưởng từ bậc cao, có tính năng đàn hồi, hấp thụ trong băng tần UHF và băng tần L. H-MPA đã được thiết kế gồm các cấu trúc ba lớp, trên cùng là lớp vòng cộng hưởng gấp khúc được làm bằng đồng, ở giữa là tấm điện môi Polyimide liên tục và dưới cùng là một tấm kim loại đồng liên tục (Hình 3.19). Các lớp kim loại có bề dày $t_m = 0,035$ mm, độ dẫn điện $5,96 \times 10^7$ S/m. Cấu trúc ô cơ sở được đặc trưng bởi kích thước của ô cơ sở a , độ dày của lớp điện môi t , chiều rộng w_1 , chiều dài (l_1, l_2, l_3, l_4) của các đường gấp khúc và khoảng cách giữa chúng (w_2, w_3). Để đạt được độ hấp thụ lớn nhất, giá trị của chúng được tối ưu hóa và trình bày trong Bảng 3.4.

Bảng 3.4. Các thông số hình học tối ưu của H-MPA

Thông số hình học	a	p	t_d	w_1	w_2	w_3	l_1	l_2	l_3	l_4
Giá trị (mm)	55,0	54,5	4,0	2,8	0,6	0,5	7,2	6,5	13,5	20,0

Các đặc trưng hấp thụ của H-MPA được nghiên cứu mô phỏng sử dụng phần mềm CST. Trong mô phỏng này, các điều kiện biên tuần hoàn được thiết lập cho hướng x và y và mở cho hướng z . Độ hấp thụ được tính bằng công thức $A(\omega) = 1 - T(\omega) - R(\omega) = 1 - |S_{21}|^2 - |S_{11}|^2$, trong đó $T(\omega) = |S_{21}|^2$ và $R(\omega) = |S_{11}|^2$ lần lượt là độ truyền qua và độ phản xạ. Do sự có mặt phẳng kim loại liên tục ở phía dưới, sóng điện từ không thể truyền qua khỏi mẫu, và khi đó độ hấp thụ được tính đơn giản là $A(\omega) = 1 - R(\omega)$.

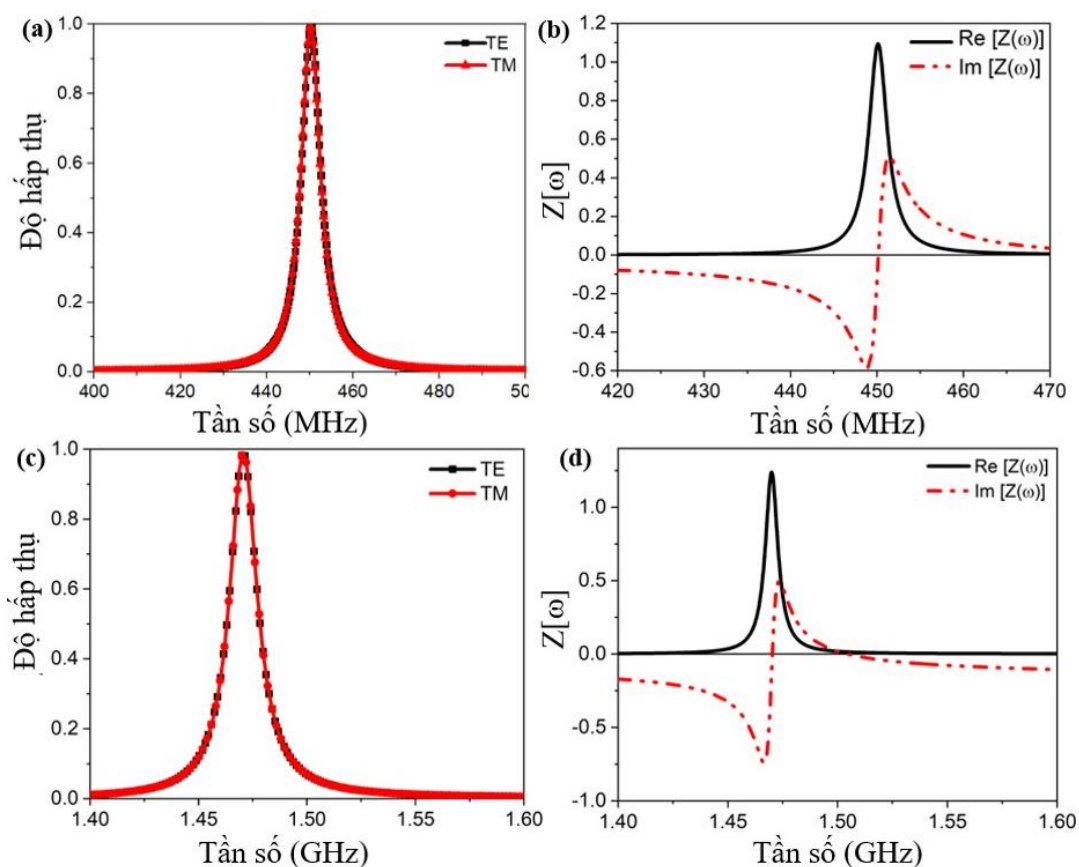


Hình 3.19. Minh họa cấu trúc ô cơ sở của H-MPA (a) mặt trên và (b) mặt bên.

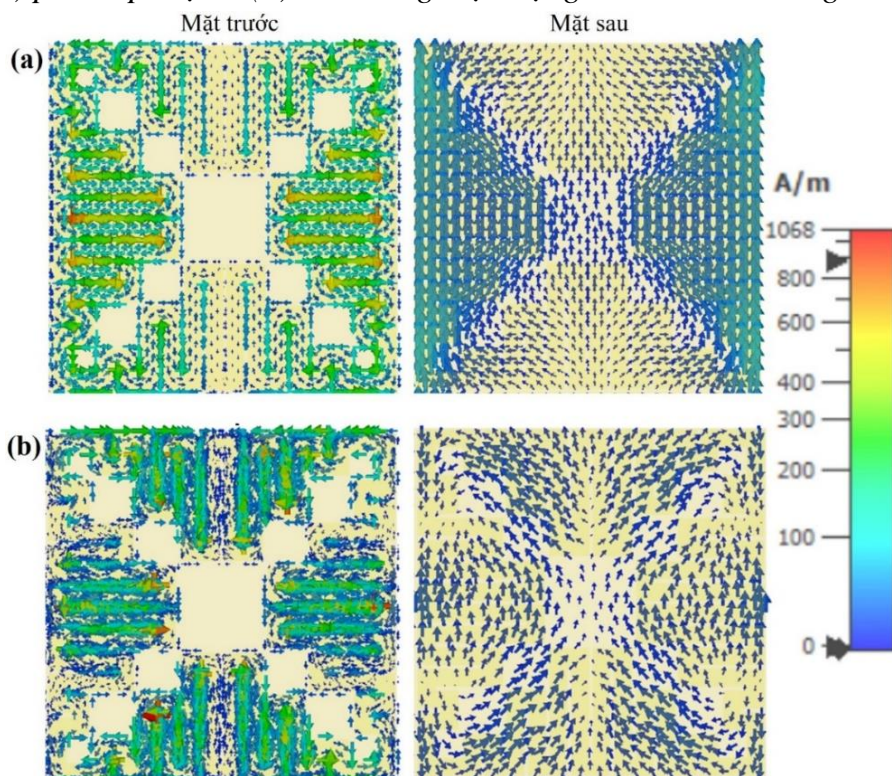
3.2.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc ba ở trạng thái phẳng

Phổ hấp thụ của H-MPA khi sóng điện từ tới vuông góc với bề mặt cấu trúc khi nó ở trạng thái phẳng được trình bày trong Hình 3.20(a) và (c) cho thấy hai đỉnh hấp thụ tại các tần số 450 MHz và 1,47 GHz có độ hấp thụ lần lượt là 99,4% và 99,8%. Bên cạnh đó, với thiết kế cấu trúc cộng hưởng thích hợp, tỉ lệ giữa kích thước ô cơ sở với bước sóng là a/λ có giá trị $1/12$ tương ứng với đỉnh cộng hưởng đầu tiên tại 450 MHz và $1/3$ tương ứng với đỉnh cộng hưởng tại 1,47 GHz.

Cơ chế hấp thụ của vật liệu được giải thích bằng cách sử dụng lý thuyết phối hợp trở kháng. Trở kháng hiệu dụng $Z(\omega)$ của H-MPA được tính từ các tham số tán xạ (S -parameters). Phần thực của $Z(\omega)$ có giá trị khoảng 1,08 và phần ảo bằng 0 ở 450 MHz, điều này cho thấy trở kháng hiệu dụng gần bằng trở kháng của không khí [Hình 3.20(b)]. Trở kháng hiệu dụng của H-MPA trong băng tần L được tính toán và mô tả trong Hình 3.20 (d). Tại tần số hấp thụ 1,47 GHz, giá trị của phần ảo và phần thực của trở kháng hiệu dụng lần lượt bằng 0 và gần đúng 1,0. Các giá trị này xác nhận rằng điều kiện phối hợp trở kháng đã được thỏa mãn. Do đó, ở 450 MHz và 1,47 GHz, thành phần phản xạ của sóng điện từ gần bằng không, gần như toàn bộ sóng tới được truyền vào bên trong H-MPA và được hấp thụ.



Hình 3.20. (a) Phổ hấp thụ và (b) trở kháng hiệu dụng của H-MPA trong băng tần UHF, (c) phổ hấp thụ và (d) trở kháng hiệu dụng của H-MPA trong băng tần L.

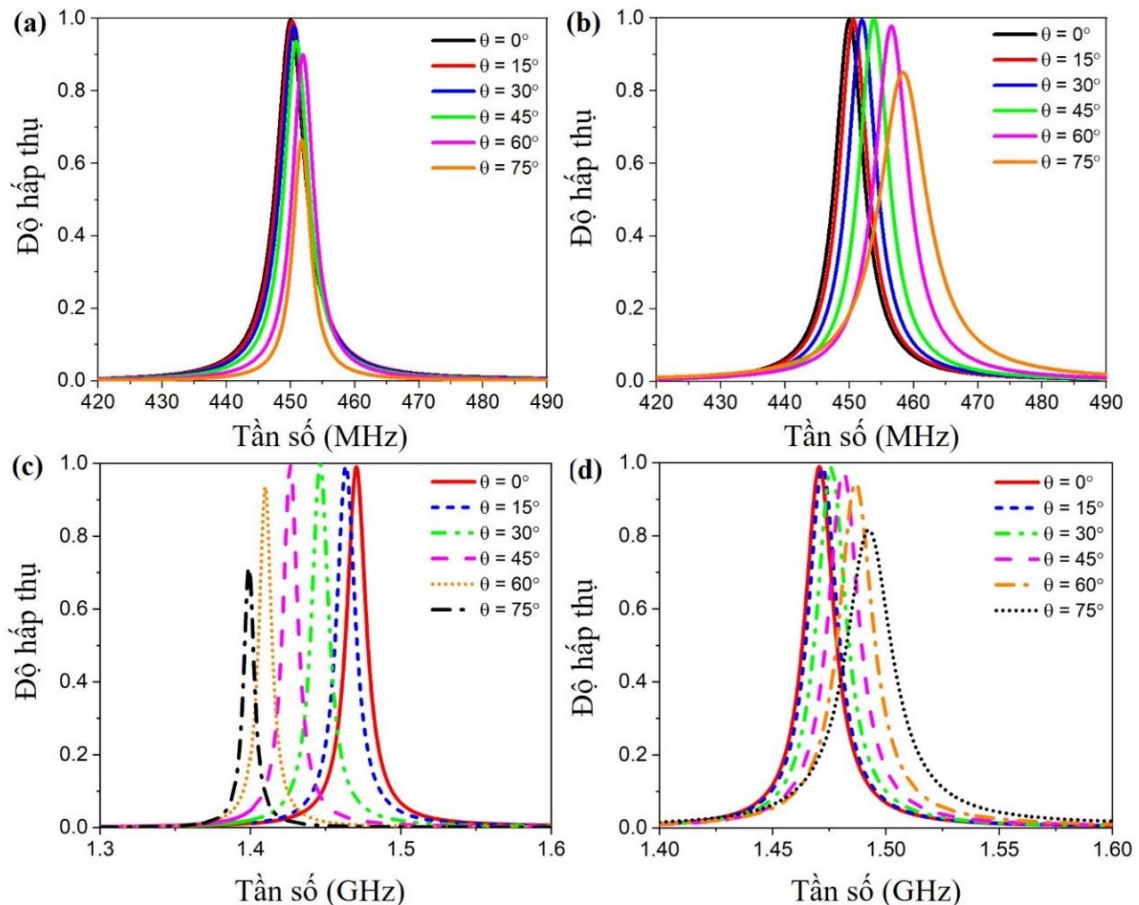


Hình 3.21. Phân bố dòng điện bề mặt tại (a) 450 MHz và (b) 1,47 GHz.

Để nghiên cứu cơ chế vật lý hình thành các đỉnh hấp thụ, phân bố dòng điện bề mặt ở tần số 450 MHz và 1,47 GHz đã được khảo sát. Tại 450 MHz, dòng điện

trên hai bề mặt kim loại (mặt trên và mặt dưới) có chiều ngược nhau [Hình 3.21(a)], xác nhận rằng cơ chế hấp thụ được điều khiển bởi cộng hưởng từ cơ bản [43]. Trong khi đó, ở đỉnh hấp thụ cao hơn (1,47 GHz), các dòng điện cảm ứng được chia thành ba vùng riêng biệt và dòng điện trong hai vùng lân cận ngược chiều nhau, đồng thời các dòng điện tại mặt trên và mặt dưới trong mỗi vùng cũng ngược chiều nhau, như được chỉ ra trong Hình 3.21(b). Do đó, có thể kết luận rằng, hấp thụ tuyệt đối tại 1,47 GHz có nguồn gốc từ cộng hưởng từ bậc ba [42].

Với H-MPA ở trạng thái phẳng, phổ hấp thụ của nó dưới sóng tới xiên góc đã được khảo sát và biểu diễn trên Hình 3.22. Trong băng tần UHF, với cả hai trường hợp sóng phân cực TE và TM, khi tăng góc tới từ 0° đến 60° , đỉnh hấp thụ cơ bản có cường độ luôn được duy trì trên 90% và bị dịch chuyển về phía tần số cao hơn [Hình 3.22(a) và (b)]. Khi góc tới tăng lên đến 75° , độ hấp thụ giảm xuống khoảng 65% đối với phân cực TE và 83% đối với trường hợp TM.

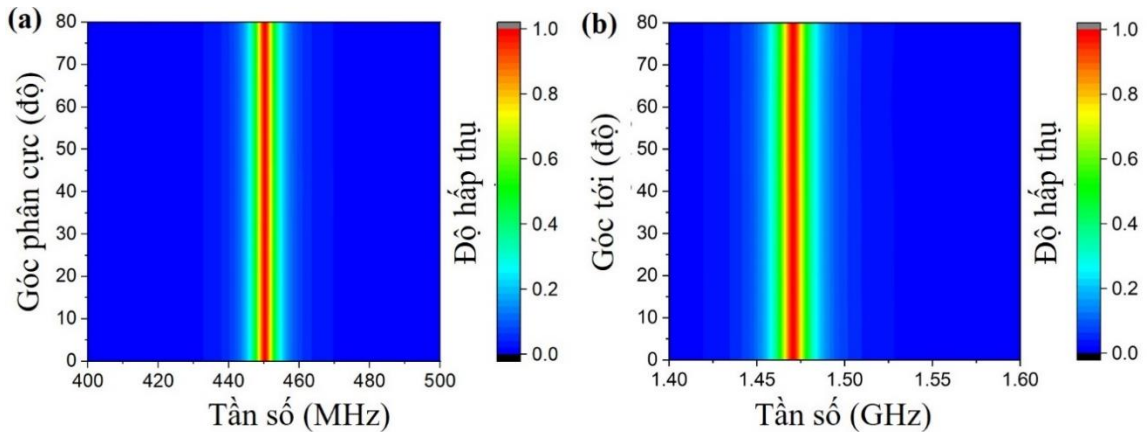


Hình 3.22. Ảnh hưởng của góc tới với (a) - (c) sóng phân cực TE và (b) - (d) sóng phân cực TM.

Trong băng tần L, với cả hai trường hợp sóng tới phân cực TE và TM, đỉnh hấp thụ bậc ba luôn giữ được cường độ trên 90% khi tăng góc tới từ 0° đến 60° . Khi góc tới tăng đến 75° độ hấp thụ bị giảm xuống còn khoảng 70% dưới sóng tới phân cực TE và 81% dưới sóng tới phân cực TM. Bên cạnh đó, khi tăng góc tới, đỉnh hấp

thụ bậc ba này có sự dịch chuyển về phía tần thấp hơn khi sóng tới phân cực TE và dịch chuyển về phía tần số cao khi sóng tới phân cực TM [Hình 3.22(c) và (d)].

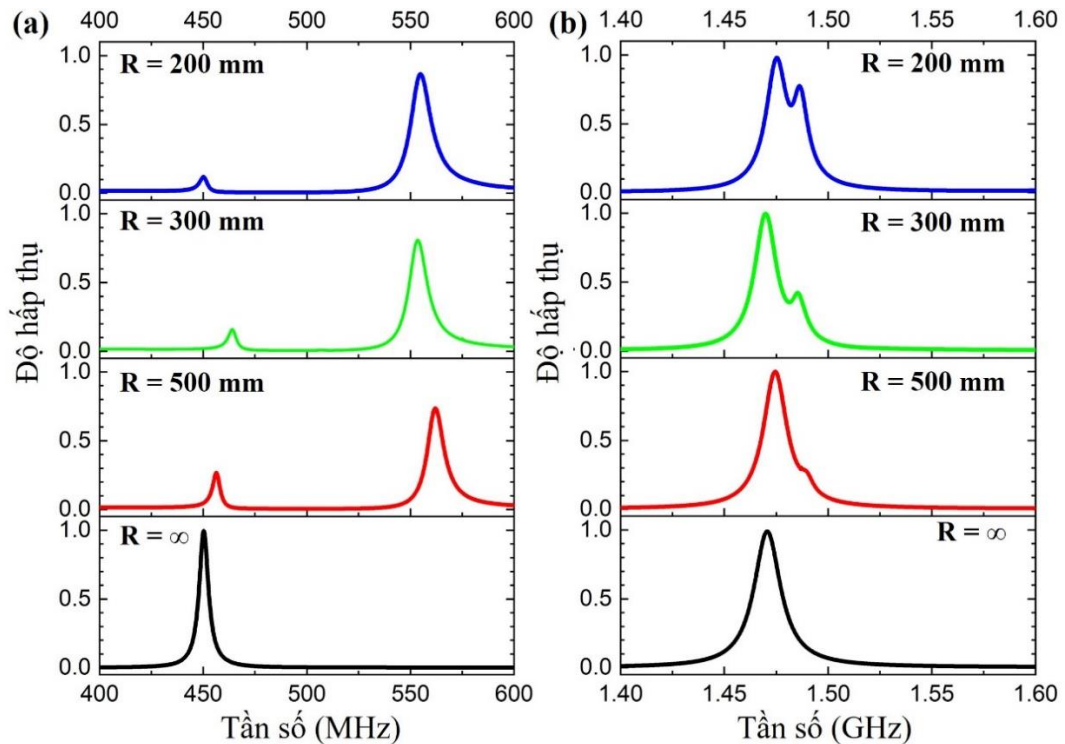
Ảnh hưởng của sự phân cực sóng điện từ lên tính chất hấp thụ của H-MPA cũng được khảo sát và mô tả trên Hình 3.23. Khi góc phân cực tăng từ 0° đến 80° , vì cấu trúc đối xứng nên phổ hấp thụ của H-MPA trong cả hai băng tần UHF và L đều không thay đổi [120]. Điều này chứng tỏ rằng H-MPA đang xét có đặc trưng hấp thụ độc lập với sự phân cực của sóng điện từ.



Hình 3.23. Ảnh hưởng của góc phân cực lên phổ hấp thụ của H-MPA đề xuất.

3.2.3. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc ba ở các trạng thái biến dạng khác nhau

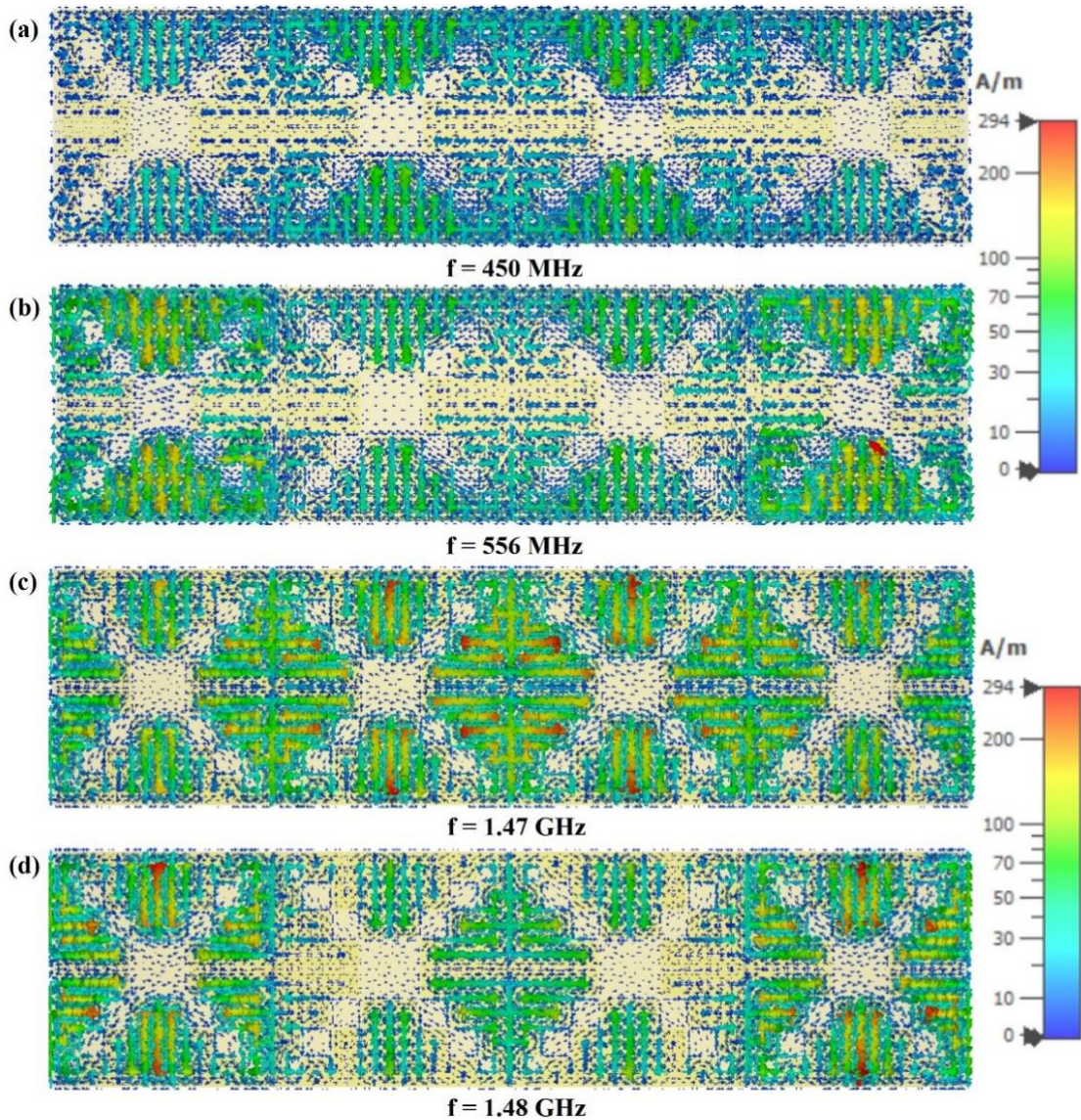
Một lợi thế của việc sử dụng lớp điện môi dẻo là vật liệu có thể dễ dàng uốn cong và gắn lên bề mặt hình trụ có bán kính khác nhau, từ đó tăng tiềm năng ứng dụng trong thực tế cho MPA. Trong phần này, đặc trưng hấp thụ của H-MPA đề xuất ở trên khi nó được uốn cong với bán kính uốn thay đổi được khảo sát. Đầu tiên mẫu H-MPA kích thước $27,5 \times 27,5 \text{ cm}^2$ (tức là có kích thước 5×5 ô cơ sở) được xây dựng và mô phỏng với sóng điện từ tới phân cực TE. Trong quá trình mô phỏng, sóng điện từ tới được thiết lập có phương truyền dọc theo trục Oz trong khi điện trường có phương Oy và từ trường có phương Ox. Ảnh hưởng của độ cong đến phổ hấp thụ của H-MPA trong băng tần UHF được mô tả trong Hình 3.24(a). Khi bán kính uốn có giá trị 500 mm, có một đỉnh hấp thụ mới xuất hiện ở 556 MHz với độ hấp thụ 73% trong khi độ hấp thụ của đỉnh hấp thụ ban đầu ở 450 MHz giảm xuống dưới 28%. Khi tiếp tục giảm bán kính uốn, độ hấp thụ của đỉnh ban đầu giảm dần, trong khi độ hấp thụ của đỉnh hấp thụ mới tăng dần. Khi bán kính uốn giảm xuống 200 mm, độ hấp thụ của đỉnh ban đầu giảm xuống chỉ còn khoảng 10% trong khi độ hấp thụ ở 556 MHz đạt gần 90%.



Hình 3.24. Sự phụ thuộc của phổ hấp thụ mô phỏng vào bán kính uốn đối với các đỉnh hấp thụ (a) cơ bản và (b) bậc cao.

Đối với đỉnh hấp thụ trong băng tần L, ảnh hưởng của độ cong đến các phổ hấp thụ của H-MPA cũng được xem xét và trình bày trong Hình 3.24(b). Khi H-MPA bị uốn cong, có một đỉnh hấp thụ mới được hình thành ở tần số 1,48 GHz. Khi bán kính uốn cong giảm tới 200 mm, đỉnh hấp thụ mới này có độ hấp thụ tăng lên gần 79%, trong khi độ hấp thụ của đỉnh hấp thụ bậc ba ban đầu vẫn được giữ không đổi. Sự hình thành các đỉnh hấp thụ mới được giải thích là do cấu trúc trở nên bất đối xứng khi bị uốn cong. Thật vậy, để tìm hiểu sâu hơn bản chất vật lý của các đỉnh hấp thụ mới xuất hiện, phân bố dòng điện trên bề mặt kim loại tại các tần số cộng hưởng khi cấu trúc bị uốn cong ở bán kính 200 mm được mô phỏng.

Phân bố dòng điện bề mặt đối với trường hợp bán kính uốn cong $R = 200$ mm được trình bày trong Hình 3.25. Ở tần số 450 MHz và 1,47 GHz, dòng điện bề mặt cảm ứng tại vị trí của các ô cơ sở trung tâm của hình bán trụ có cường độ mạnh hơn. Trong khi đó, ở 556 MHz và 1,48 GHz, dòng điện bề mặt tập trung chủ yếu tại các ô cơ sở ở rìa của hình bán trụ. Hiện tượng này chỉ ra rằng, khác với ảnh hưởng của góc tới, trạng thái uốn cong của H-MPA làm cho điện trường và từ trường phân bố không đồng nhất trên bề mặt cấu trúc, gây ra các đỉnh cộng hưởng mới [118,121]. Kết quả này tương tự như các công trình công bố trước đây, trong đó các đỉnh hấp thụ mới đã xuất hiện do tính bất đối xứng lớn của cấu trúc bị uốn cong [118].



Hình 3.25. Phân bố dòng điện bề mặt trên các lớp kim loại của H-MPA với bán kính uốn $R = 200$ mm ở các tần số khác nhau.

3.3. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA đàn hồi trong vùng tần số THz

3.3.1. Thiết kế cấu trúc H-MPA đàn hồi hoạt động trong vùng THz

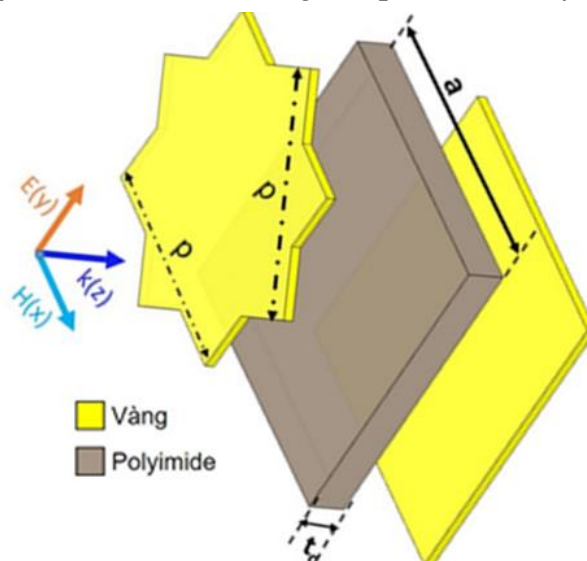
Như đã được bàn luận trong Chương 1 của luận án, MPA có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, từ các lĩnh vực dân sự đến quân sự. Đặc biệt trong giai đoạn hiện nay, MPA trong vùng tần số cao như THz và vùng quang học đang được quan tâm nghiên cứu mạnh mẽ và có tiềm năng ứng dụng lớn trong nhiều lĩnh vực như cảm biến, thu năng lượng, phát xạ nhiệt ... Tuy nhiên, khác với vùng tần số MHz và GHz, các kim loại trong vùng tần số THz có đặc trưng điện từ phụ thuộc vào tần số. Điều này có thể ảnh hưởng đến đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu. Do đó, luận án mở rộng nghiên cứu đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu trong vùng tần số THz (30-100 THz) nhằm làm rõ hơn cơ chế và đặc trưng của cộng hưởng bậc cao trong vùng tần số này. Bên cạnh đó, việc chế tạo vật liệu MPA hoạt động

trong vùng THz gặp một số khó khăn. Vì MPA có kích thước ô cơ sở nhỏ hơn bước sóng hoạt động của nó, nên kích thước của MPA trong vùng tần số THz thường rất nhỏ. Do vậy, việc tối ưu hóa thiết kế của MPA để thu được hiệu ứng hấp thụ bậc cao có thể hữu ích, có thể tạo ra đỉnh hấp thụ tại tần số cao trong khi vẫn giữ được kích thước lớn của cấu trúc. Để đánh giá ưu điểm của việc sử dụng H-MPA cho khía cạnh này, ảnh hưởng của tham số cấu trúc lên đặc trưng hấp thụ của H-MPA có tính năng đàn hồi hấp thụ trong vùng hồng ngoại đã được nghiên cứu mô phỏng.

Vật liệu đề xuất được thiết kế và minh họa trên Hình 3.26. Tương tự các MPA truyền thống, vật liệu đề xuất có cấu trúc gồm ba lớp kim loại - điện môi - kim loại, trong đó phần kim loại được làm từ vàng, có hằng số điện môi phụ thuộc vào tần số và được mô tả bởi hàm Drude [122]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\gamma)}, \quad (3.8)$$

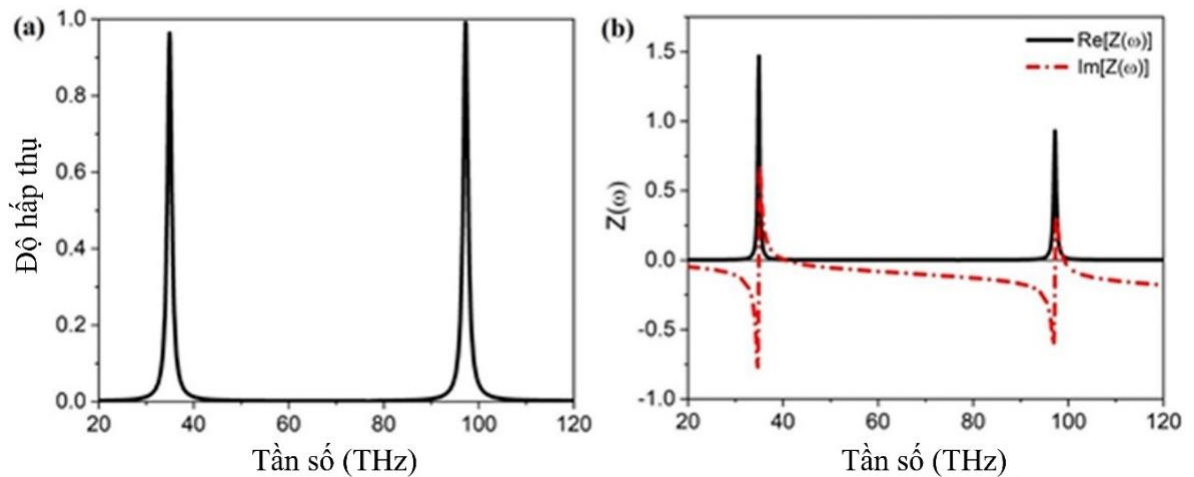
với ω là tần số của sóng ε_0 là độ điện thẩm của chân không, ω_p là tần số plasma của vàng, có giá trị là $1,37 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$, γ là hệ số dập tắt, có giá trị $6,48 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$. Lớp kim loại trên cùng có độ dày t_m , được thiết kế gồm một dãy các cấu trúc cộng hưởng được tạo hình bởi hai tấm kim loại hình vuông xoay lệch nhau một góc 45° , được sắp xếp tuần hoàn với chu kỳ a . Lớp giữa là điện môi liên tục, được làm từ Polyimide có độ dày là t_d . Cuối cùng là một tấm kim loại vàng liên tục có độ dày là t_m (Hình 3.26). Để đảm bảo độ dẫn điện của vàng và triệt tiêu thành phần truyền qua của sóng điện từ tại mặt dưới, giá trị của t_m được lựa chọn là $t_m = 0,07 \mu\text{m}$. Các tham số cấu trúc còn lại là chu kỳ a , kích thước của hình vuông p và độ dày lớp điện môi t_d là các yếu tố có ảnh hưởng lớn đến đặc trưng hấp thụ của vật liệu. Do đó, ảnh hưởng của các tham số này đến tính chất hấp thụ của vật liệu trong các phần dưới đây lần lượt khảo sát.



Hình 3.26. Cấu trúc ô cơ sở của H-MPA hoạt động trong vùng tần số THz.

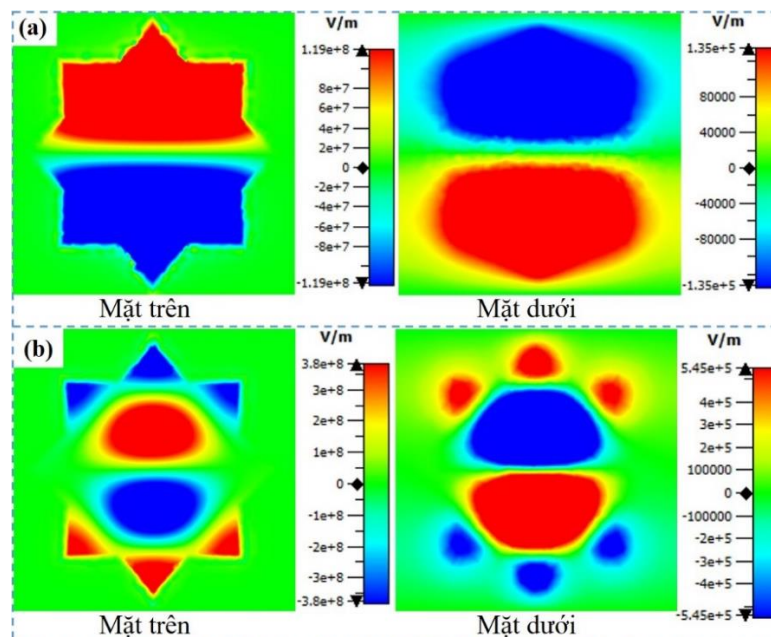
3.3.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA đàn hồi hoạt động trong vùng THz

Nhằm thu được MPA hoạt động trong vùng hồng ngoại giữa (Mid-wavelength infrared), các tham số cấu trúc của vật liệu lựa chọn $a = 2 \mu\text{m}$; $p = 1,1 \mu\text{m}$; $t_m = 0,07 \mu\text{m}$ và $t_d = 0,02 \mu\text{m}$. Kết quả mô phỏng phổ hấp thụ của vật liệu được trình bày trên Hình 3.27(a). Vật liệu cho hai đỉnh hấp thụ tại 34,9 THz và 97,2 THz với cường độ lần lượt là 96,4% và 99,2%.



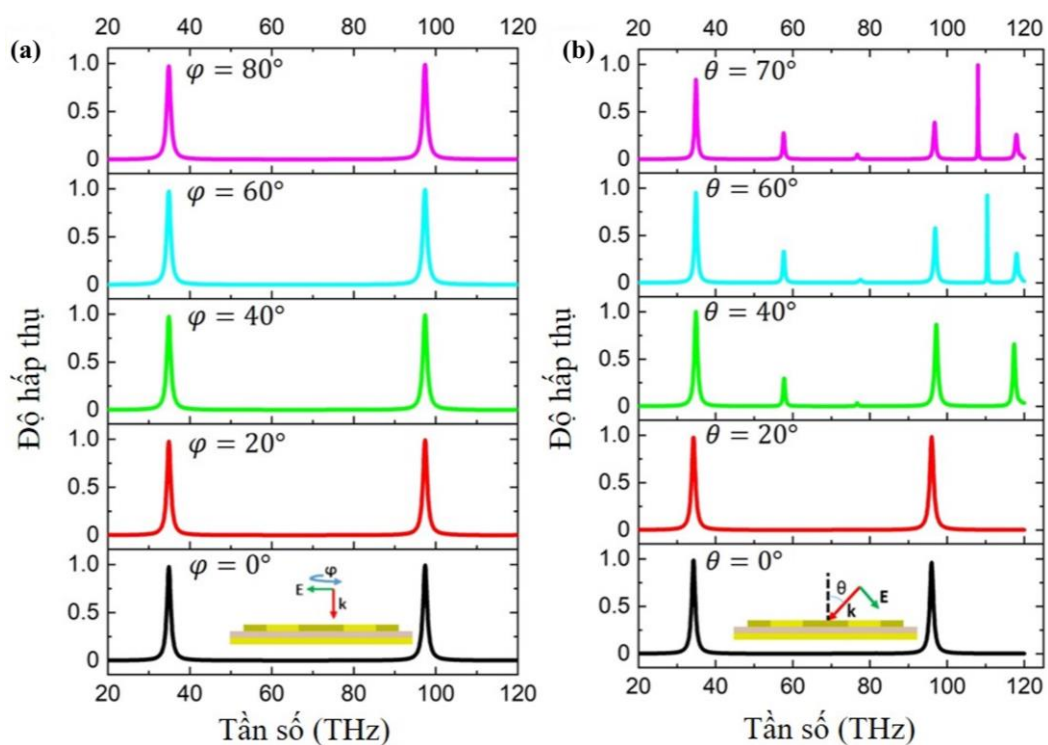
Hình 3.27. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng và (b) trở kháng hiệu dụng của H-MPA.

Trở kháng hiệu dụng của vật liệu $Z(\omega)$ được tính toán và trình bày trên Hình 3.27(b). Tại 34,9 THz, phần thực và phần ảo của $Z(\omega)$ có giá trị lần lượt là 0,9 và 0; tại 97,2 THz, chúng có giá trị lần lượt là 0,94 và 0. Các kết quả này chứng tỏ tại hai đỉnh cộng hưởng, trở kháng của vật liệu gần bằng trở kháng của môi trường. Kết quả là chỉ một phần rất nhỏ sóng điện từ bị phản xạ tại mặt trên của cấu trúc dẫn đến gần 100% sóng điện từ truyền vào trong vật liệu và bị hấp thụ.



Hình 3.28. Phân bố điện trường tại các tần số (a) 34,9 THz và (b) 97,2 THz.

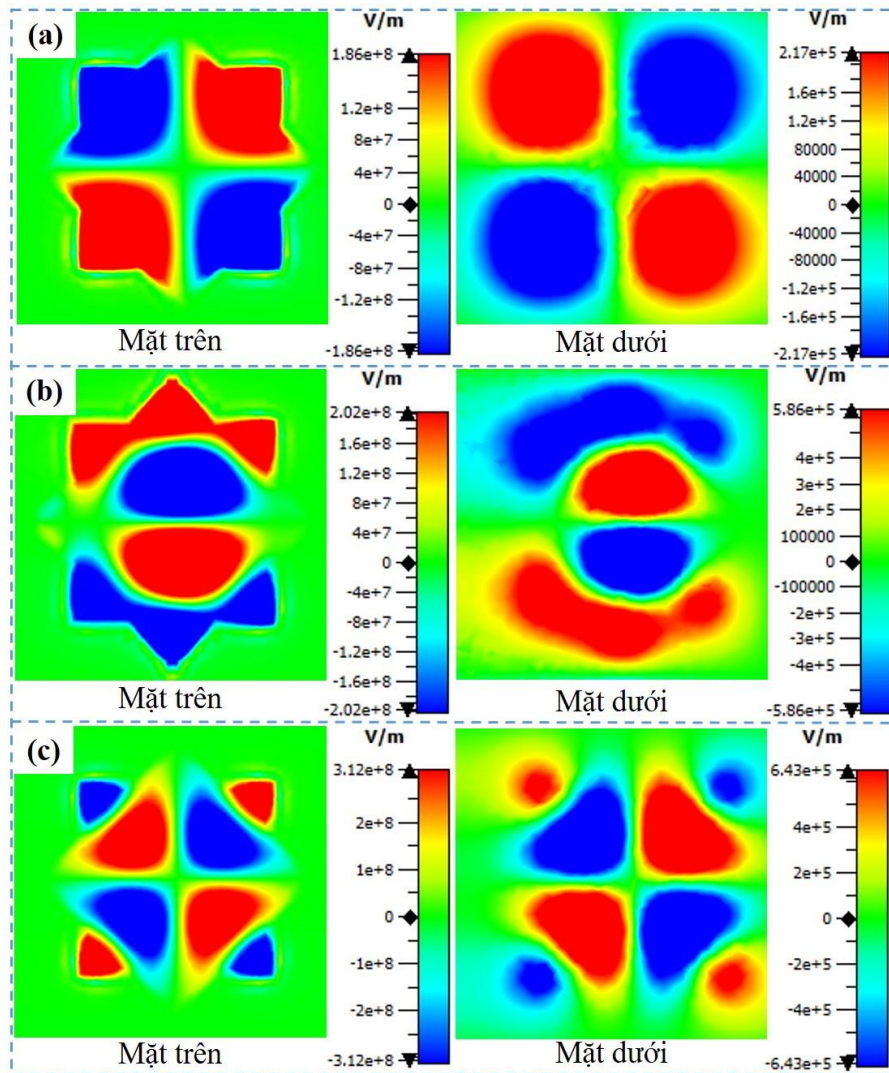
Nguồn gốc của hai đỉnh hấp thụ được khảo sát qua phân bố điện trường tại tần số hấp thụ (Hình 3.28). Tại tần số 34,9 THz điện trường tại hai mặt trên và dưới của cấu trúc có chiều ngược nhau [Hình 3.28(a)], chứng tỏ cộng hưởng từ cơ bản đã được kích thích và dẫn đến hình thành đỉnh hấp thụ. Tại 97,2 THz điện trường tại hai mặt kim loại của vật liệu có chiều ngược nhau, đồng thời được chia thành ba vùng riêng biệt [Hình 3.28(b)]. Điều này xác nhận rằng cộng hưởng từ bậc ba đã được kích thích và đây là nguồn gốc chính dẫn đến sự hình thành của đỉnh hấp thụ tại 97,2 THz [123,124].



Hình 3.29. Phổ hấp thụ của H-MPA (a) phụ thuộc góc phân cực và (b) phụ thuộc góc tới.

Để đánh giá ưu điểm của cấu trúc, ảnh hưởng của góc tới và góc phân cực lên phổ hấp thụ của vật liệu đề xuất được khảo sát. Hình 3.29(a) trình bày phổ hấp thụ phụ thuộc góc phân cực của sóng tới. Dễ nhận thấy rằng phổ hấp thụ của vật liệu không thay đổi khi góc phân cực thay đổi từ 0° đến 80° vì cấu trúc cộng hưởng có tính đối xứng. Như vậy có thể kết luận rằng cấu trúc vật liệu được thiết kế không nhạy với góc phân cực. Ảnh hưởng của góc tới đến tính chất hấp thụ của H-MPA cũng được nghiên cứu [Hình 3.29 (b)]. Khi tăng góc tới từ 0° đến 60° cả hai đỉnh hấp thụ cơ bản và đỉnh hấp thụ bậc ba có vị trí hầu như không thay đổi nhưng có cường độ bị suy giảm, cụ thể như sau: độ hấp thụ của đỉnh cơ bản đã giảm từ 96,4% xuống 84,3% và độ hấp thụ của đỉnh bậc ba giảm từ 99,2% xuống 38,8%. Ngoài ra, với các giá trị góc

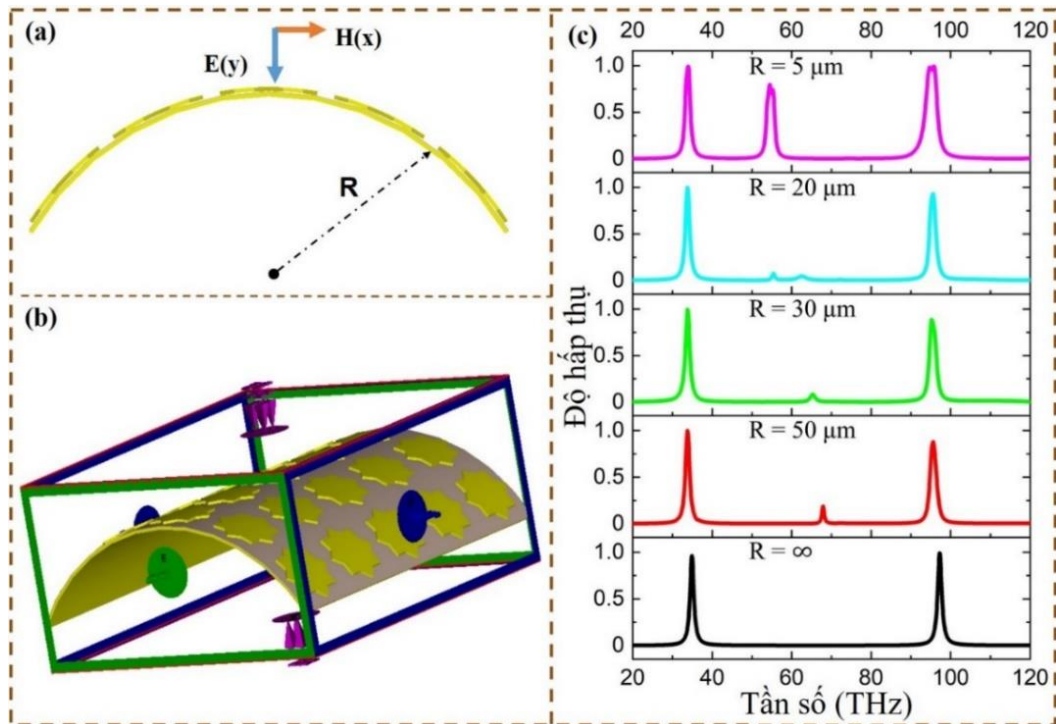
tới từ 40° đến 70° , cấu trúc xuất hiện thêm hai đỉnh hấp thụ có cường độ thấp tại 57,75 THz và 117,38 THz. Bên cạnh đó, khi góc tới lên đến 60° và 70° , vật liệu có thêm một đỉnh hấp thụ thứ tư tại 108,03 THz với cường độ đạt khoảng 99,5%. Như vậy có thể kết luận rằng đỉnh hấp thụ bậc ba nhạy với góc tới hơn so với đỉnh hấp thụ cơ bản. Kết luận này là tương đồng với các nghiên cứu khác về đỉnh hấp thụ bậc cao của MPA [115].



Hình 3.30. Phân bố điện trường (a) tại 57,75 THz, (b) tại 110 THz và (c) tại 117,38 THz khi sóng tới dưới góc 60° .

Sự xuất hiện của các đỉnh hấp thụ mới là do khi góc tới lớn cấu trúc trở nên bất đối xứng về pha, làm xuất hiện các mode cộng hưởng từ bậc cao [125]. Điều này được xác nhận từ phân bố điện trường tại các tần số hấp thụ 57,75 THz và 117,38 THz, được minh họa trong Hình 3.30. Tại 57,75 THz [Hình 3.30(a)], điện trường phân bố theo dạng tứ cực, chứng tỏ cộng hưởng từ bậc hai đã được kích thích. Tại 117,38 THz [Hình 3.30(c)], điện trường phân bố theo dạng đa cực (multipole), chứng tỏ cộng hưởng từ bậc cao đã được kích thích [123,124].

H-MPA đề xuất có lớp điện môi được làm từ Polyimide có khả năng uốn dẻo tốt, nên nó có thể dễ dàng uốn cong và phủ lên các bề mặt dạng hình trụ. Do đó, chúng tôi đã khảo sát tính chất hấp thụ của vật liệu khi được uốn cong với bán kính uốn khác nhau. Hình 3.31 trình bày tác động của bán kính uốn cong R tới phổ hấp thụ của vật liệu. Có thể thấy rằng khi được uốn cong, vị trí đỉnh hấp thụ cơ bản không thay đổi, trong khi đó đỉnh hấp thụ bậc ba dịch chuyển nhẹ về phía tần số thấp hơn. Bên cạnh đó, khi bán kính uốn thay đổi từ $R = 50 \mu\text{m}$ đến $R = 20 \mu\text{m}$, độ hấp thụ của đỉnh cơ bản hầu như không thay đổi, trong khi đó độ hấp thụ của đỉnh bậc ba giảm từ 92,86% xuống còn 88%. Khi tiếp tục giảm bán kính uốn xuống còn $R = 5 \mu\text{m}$, đỉnh hấp thụ cơ bản vẫn giữ nguyên vị trí và duy trì độ hấp thụ như ở trạng thái phẳng. Tuy nhiên, đỉnh hấp thụ bậc ba có sự mở rộng hơn, độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần số từ 94,36 THz đến 96,17 THz (1,81 THz). Ngoài ra, bên cạnh hai đỉnh hấp thụ ban đầu, trong trường hợp này còn hình thành thêm một đỉnh hấp thụ mới tại 54,5 THz với cường độ khoảng 80%. Sự xuất hiện của đỉnh hấp thụ mới này được giải thích do sự bất đối xứng của vật liệu khi bị uốn cong gây nên hiện tượng lệch pha của sóng tới trên bề mặt vật liệu [115].

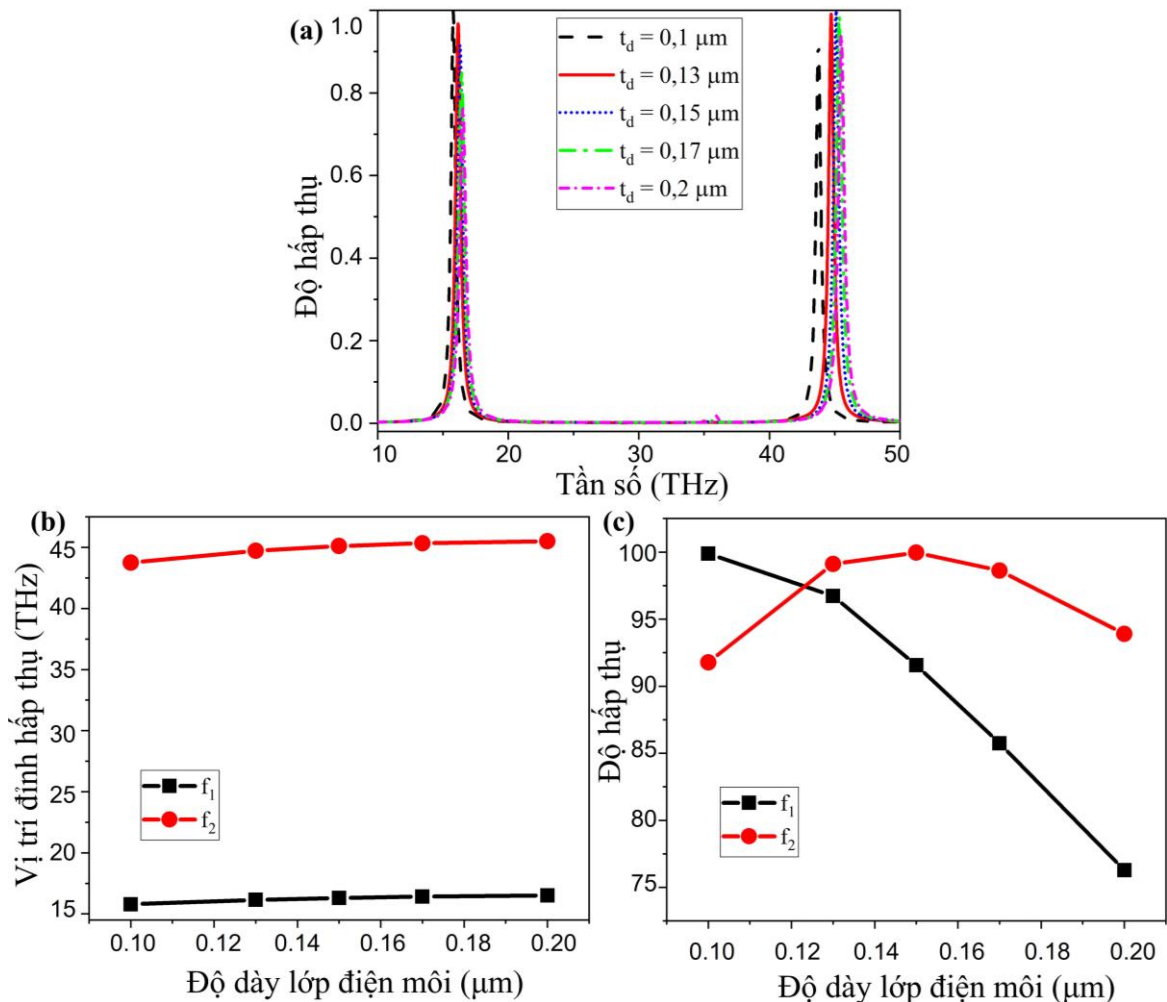


Hình 3.31. Minh họa (a) định nghĩa bán kính uốn cong R , (b) mẫu uốn cong trong mô phỏng và (c) phổ hấp thụ của vật liệu ở trạng thái uốn cong với bán kính uốn khác nhau.

Các kết quả được trình bày ở trên cho thấy H-MPA đề xuất hấp thụ sóng điện từ trong vùng hồng ngoại giữa, đặc trưng hấp thụ không nhạy với góc phân cực và ổn

định dưới góc tới 40° . Khi bị uốn cong với các bán kính uốn khác nhau, cả hai đỉnh hấp thụ đều được duy trì tốt. Tuy nhiên, vật liệu có các tham số cấu trúc được thiết kế như trên yêu cầu quy trình chế tạo phức tạp. Do đó, chúng tôi tăng tham số kích thước của mẫu nhằm làm cho quá trình chế tạo đơn giản hơn, đồng thời vẫn thu được vật liệu có đỉnh hấp thụ bậc ba hoạt động trong vùng hồng ngoại giữa cho các ứng dụng trong lĩnh vực ảnh nhiệt, phát xạ nhiệt ...

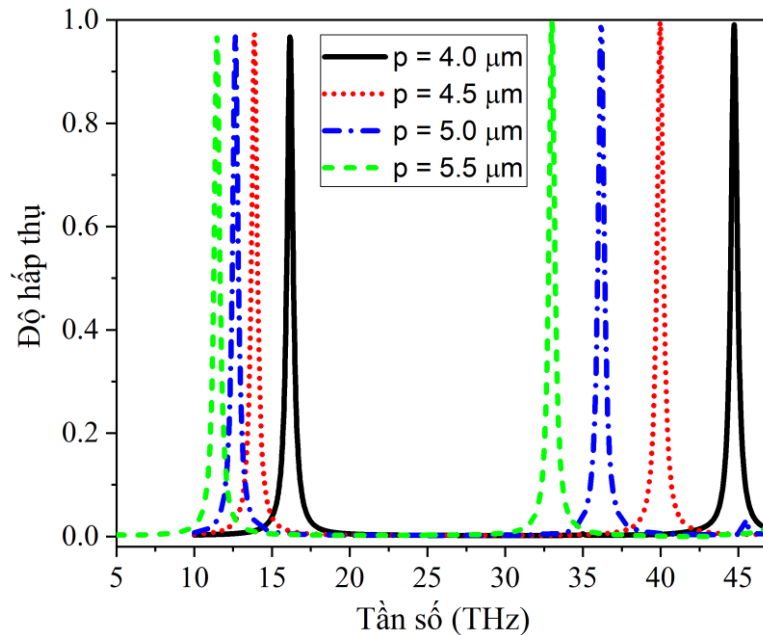
Kích thước ô cơ sở và kích thước của cấu trúc cộng hưởng được tăng lên giá trị là $a = 8 \mu\text{m}$ và $p = 4 \mu\text{m}$. Ảnh hưởng của độ dày lớp điện môi lên tính chất hấp thụ của vật liệu được khảo sát. Hình 3.32 trình bày kết quả mô phỏng phổ hấp thụ của vật liệu phụ thuộc vào độ dày lớp điện môi. Dễ thấy rằng, lớp điện môi có độ dày tối ưu là $0,13 \mu\text{m}$, lúc này phổ hấp thụ có hai đỉnh tại $16,15 \text{ THz}$ và $44,75 \text{ THz}$, với cường độ lần lượt là $96,72 \%$ và $99,11\%$.



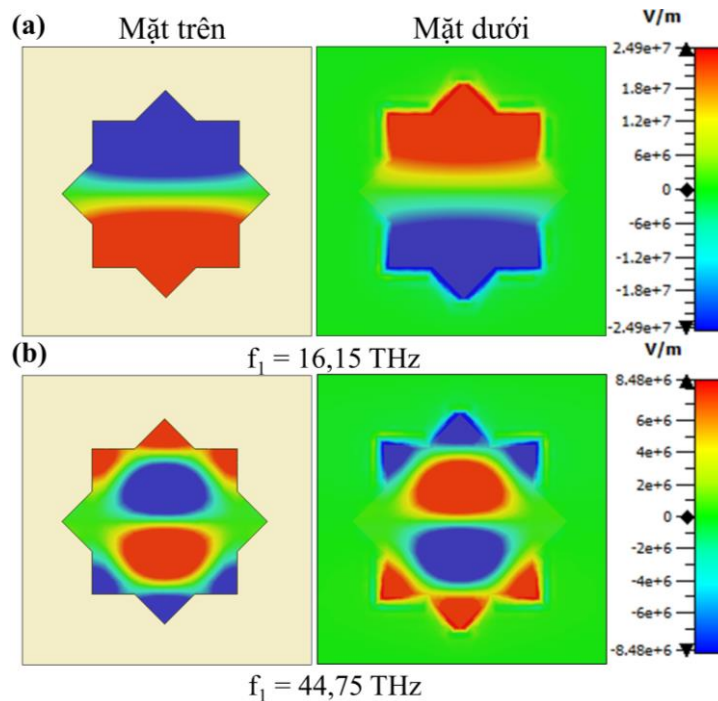
Hình 3.32. (a) Phổ hấp thụ của vật liệu, (b) vị trí đỉnh và (c) độ hấp thụ khi độ dày lớp điện môi t_d thay đổi từ $0,1$ đến $0,2 \mu\text{m}$.

Tiếp theo, ảnh hưởng của kích thước hình vuông được khảo sát, trong đó giữ giá trị của $a = 8 \mu\text{m}$ và $t_d = 0,13 \mu\text{m}$. Kết quả được trình bày trong Hình 3.33. Khi giá

trị của p thay đổi từ $4 \mu\text{m}$ đến $5,5 \mu\text{m}$, trong vùng tần số từ 5 THz đến 45 THz , phổ hấp thụ có hai đỉnh, tuy nhiên vị trí của các đỉnh hấp thụ có sự dịch chuyển về phía tần số thấp khi p tăng lên. Điều này được lý giải là do khi tăng kích thước của cấu trúc cộng hưởng ở mặt trên sẽ dẫn đến độ tự cảm hiệu dụng của H-MPA tăng lên, và kết quả là tần số cộng hưởng giảm đi. Từ phân bố điện trường (Hình 3.34) chúng tôi nhận thấy rằng đỉnh hấp thụ ở tần số thấp có nguồn gốc từ cộng hưởng từ cơ bản và đỉnh hấp thụ ở tần số cao hơn có nguồn gốc từ cộng hưởng từ bậc ba.

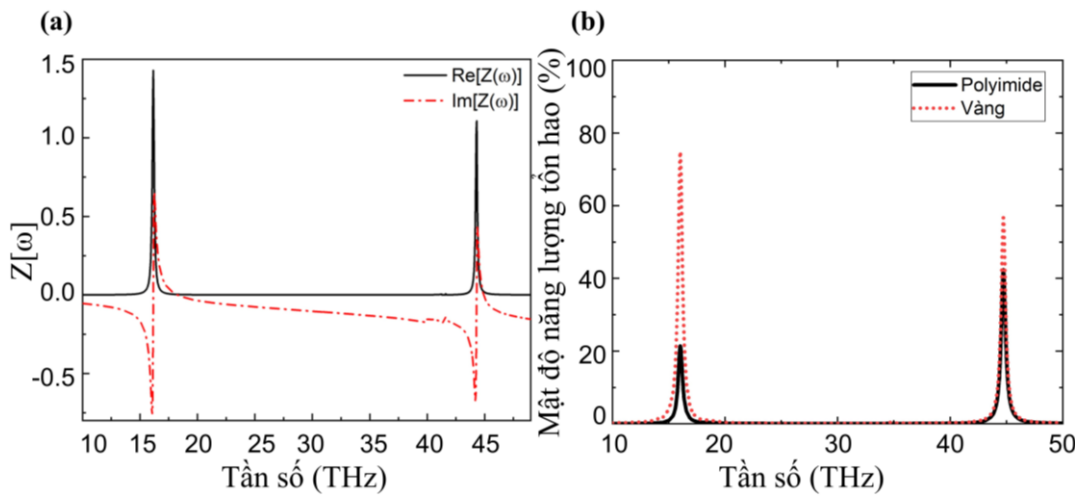


Hình 3.33. Phổ hấp thụ của vật liệu khi p thay đổi từ 4 đến $5,5 \mu\text{m}$, độ dày lớp điện môi được giữ không đổi $0,13 \mu\text{m}$.



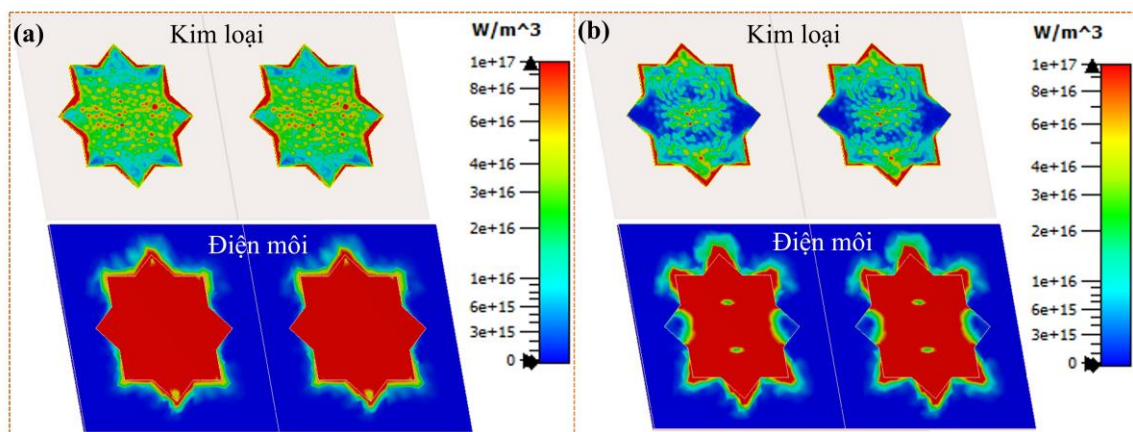
Hình 3.34. Phân bố điện trường tại hai mặt kim loại tại các tần số (a) $16,15 \text{ THz}$ và (b) $44,75 \text{ THz}$.

Để thấy rõ được bản chất vật lý của các đỉnh hấp thụ, chúng tôi xét trường hợp $p = 4 \mu\text{m}$ và tiến hành tính toán trở kháng hiệu dụng, đồng thời mô phỏng phân bố mật độ năng lượng tổn hao trong cấu trúc vật liệu. Kết quả tính toán trở kháng hiệu dụng được trình bày trong Hình 3.35(a). Tại 16,15 THz, phần thực của trở kháng có giá trị khoảng 1,1 và phần ảo có giá trị bằng 0. Tại 44,75 THz, chúng có giá trị lần lượt là 1,05 và 0. Điều này chứng tỏ rằng trở kháng hiệu dụng của vật liệu có giá trị gần bằng với trở kháng của môi trường. Kết quả là sóng điện từ tới hầu như không bị phản xạ lại môi trường, gần như toàn bộ sóng điện từ được truyền vào bên trong cấu trúc và bị tiêu tán.



Hình 3.35. (a) Trở kháng hiệu dụng và (b) phân bố mật độ năng lượng tiêu tán tại các phần của vật liệu.

Hình 3.35 (b) trình bày phân bố mật độ năng lượng bên trong vật liệu. Để thấy rằng tại hai đỉnh hấp thụ, tỉ lệ năng lượng tiêu tán tại lớp kim loại vàng luôn lớn hơn năng lượng tiêu tán tại lớp điện môi. Như vậy, với mẫu vật liệu đang xét, năng lượng được tiêu tán tại cả hai thành phần điện môi và kim loại cấu thành nên vật liệu. Kết luận này cũng được rút ra khi khảo sát phân bố mật độ năng lượng tổn hao như trình bày trên Hình 3.36.



Hình 3.36. Phân bố mật độ năng lượng tổn hao tại tần số (a) 16,15 THz và (b) 44,75 THz.

3.4. Kết luận chương 3

Trong chương này chúng tôi đã thiết kế và khảo sát tính chất hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc lẻ, thu được một số kết luận như sau:

i) Đã thiết kế và chế tạo thành công H-MPA tích hợp tụ điện, hấp thụ đa đỉnh, trong đó có hai đỉnh hấp thụ cơ bản trong băng tần VHF và hai đỉnh hấp thụ bậc năm trong băng tần S. Đỉnh hấp thụ bậc cao khá nhạy với góc tới.

ii) Đã tối ưu H-MPA có cấu trúc cộng hưởng dạng vòng gấp khúc, hấp thụ đa đỉnh: đỉnh hấp thụ cơ bản tại 450 MHz (99,4%) và đỉnh hấp thụ bậc ba tại 1,47 GHz (99,8%). Khi bị uốn cong đỉnh hấp thụ cơ bản có cường độ hấp thụ giảm đáng kể, đồng thời có xuất hiện một đỉnh hấp thụ mới tại 556 MHz có cường độ tăng lên khi bán kính uốn cong giảm. Đỉnh hấp thụ bậc ba được duy trì tốt khi thay đổi bán kính uốn, tuy nhiên cũng có sự xuất hiện thêm đỉnh hấp thụ mới tại 1,48 GHz.

iii) Đã thiết kế và tối ưu hóa tính chất hấp thụ của H-MPA trong vùng THz. Bằng cách sử dụng cấu trúc hình vuông, độ hấp thụ đạt trên 96% tại 34,9 THz (cộng hưởng từ cơ bản) và 97,2 THz (cộng hưởng từ bậc ba). Ở trạng thái đàn hồi khác nhau (bán kính uốn cong thay đổi từ 50 μm đến 5 μm), H-MPA này duy trì tốt đỉnh hấp thụ cơ bản với độ hấp thụ trên 90%.

Chương 4. ĐẶC TRƯNG HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CỘNG HƯỞNG TỪ BẬC CHẴN CÓ TÍNH NĂNG ĐÀN HỒI

Trong chương 3, luận án đã trình bày các kết quả khảo sát đặc trưng hấp thụ của các H-MPA đa đỉnh dựa trên cộng hưởng từ bậc cao, trong đó các mô hình cấu trúc cộng hưởng được lựa chọn có dạng thông dụng (tám/vòng cộng hưởng kim loại). Kết quả khảo sát các cấu trúc H-MPA đó cho thấy khi tối ưu hóa cấu trúc (hình dạng và kích thước) có thể nhận được hiệu ứng cộng hưởng từ bậc lẻ. Khác với cộng hưởng từ bậc lẻ, cộng hưởng từ bậc chẵn được biết đến là các mode tối, thường khó được quan sát thấy trong các cấu trúc đối xứng. Chỉ khi nào tính đối xứng của cấu trúc bị phá vỡ thì cộng hưởng từ bậc chẵn mới có thể được kích thích. Tính đối xứng của cấu trúc có thể bị phá vỡ trong một số điều kiện chặt chẽ như: sóng điện từ tới bề mặt cấu trúc theo hướng xiên góc hoặc cấu trúc vật liệu bị biến dạng. Đối với các cấu trúc đã khảo sát trong Chương 3, các cộng hưởng bậc chẵn có khả năng xuất hiện trong trường hợp sóng tới xiên góc và bề cong cấu trúc. Tuy nhiên, các cộng hưởng bậc chẵn trong các mô hình này thường yếu và do đó khó đạt được độ hấp thụ cao. Dựa trên các kết quả đạt được từ chương 3, trong chương 4, luận án sẽ nghiên cứu hiệu ứng cộng hưởng từ bậc hai được hình thành khi sóng điện từ tới theo phương xiên góc với bề mặt vật liệu hoặc khi cấu trúc vật liệu bị bề cong với các cấu trúc có dạng vòng cộng hưởng kín. Trong đó, đặc trưng hấp thụ của đỉnh cộng hưởng từ bậc chẵn phụ thuộc vào trạng thái uốn cong của vật liệu được khảo sát. Hai mẫu H-MPA được thiết kế và khảo sát đặc trưng hấp thụ trong chương này bao gồm H-MPA có cấu trúc cộng hưởng dạng vòng tròn (ký hiệu H-MPA4) và H-MPA có cấu trúc cộng hưởng dạng vòng bát giác giác đều (ký hiệu H-MPA5).

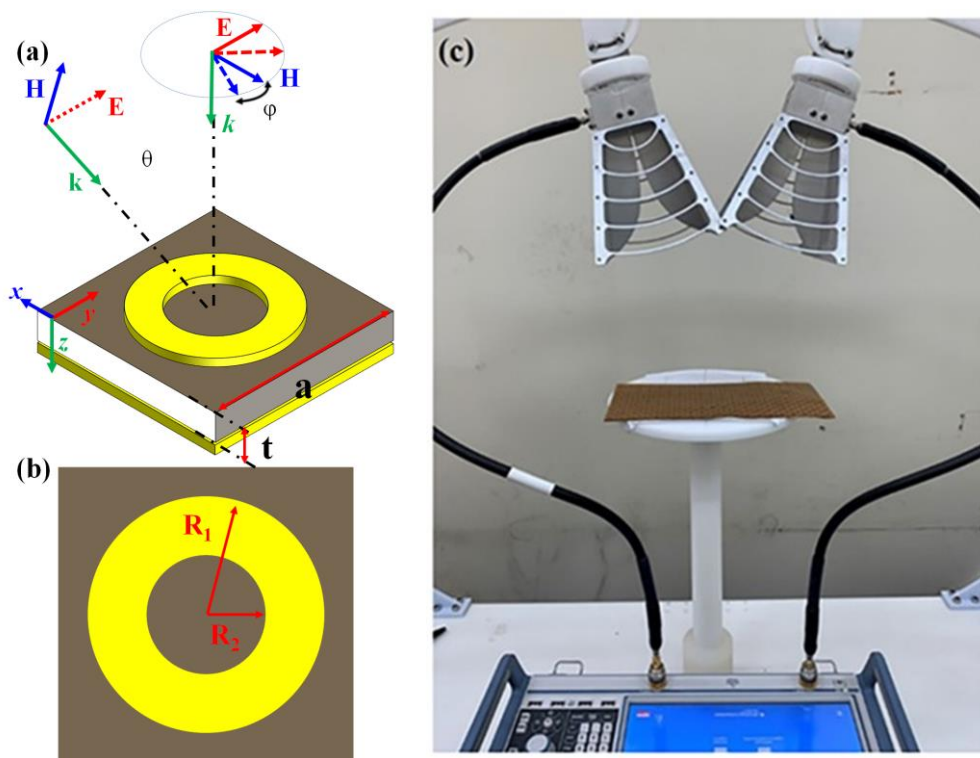
4.1. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc hai có tính năng đàn hồi

4.1.1. Thiết kế cấu trúc H-MPA cộng hưởng từ bậc hai

Để nhận được H-MPA có tính năng đàn hồi, do chiều dày lớp kim loại mỏng nên chúng tôi tiếp cận theo phương pháp thay thế các lớp điện môi có đặc tính mềm dẻo. Do đó, trong nghiên cứu này, cấu trúc vật liệu ba lớp kim loại – điện môi – kim loại có lớp điện môi được làm từ Polyimide mềm dẻo. Thiết kế ô cơ sở của H-MPA trên để đàn hồi được thể hiện trong Hình 4.1, trong đó mỗi ô cơ sở có cấu trúc gồm các vòng cộng hưởng có dạng tròn được làm từ đồng sắp xếp tuần hoàn, lớp điện môi Polyimide ở giữa và dưới cùng là một lớp đồng liên tục. Phần cấu trúc kim loại có độ dày $t_m = 0,035$ mm. Các thông số hình học đặc trưng cho H-MPA đề xuất bao gồm độ dày của lớp điện môi t , bề rộng của vòng cộng hưởng $w = R_1 - R_2$, với R_1 và R_2

lần lượt là bán kính ngoài và bán kính trong của vòng cộng hưởng, và kích thước của ô cơ sở (chu kỳ) a .

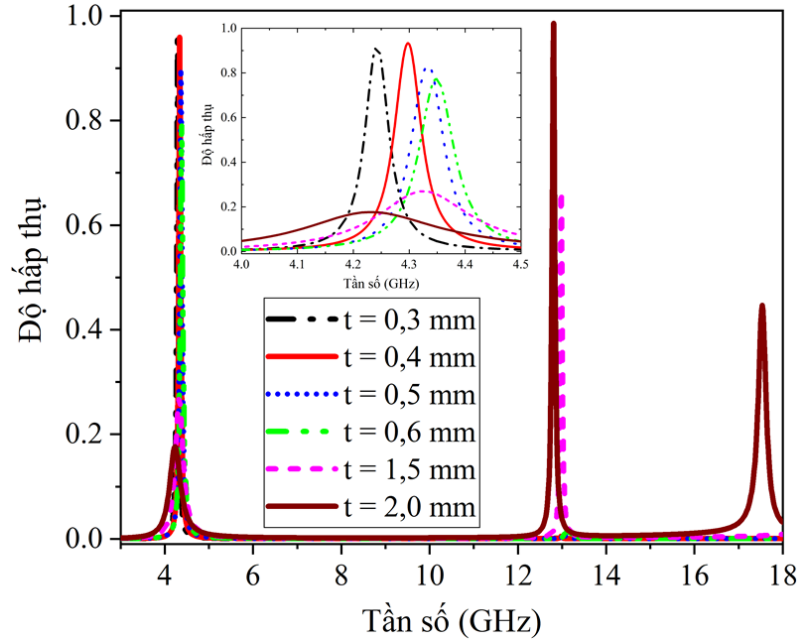
Về cơ bản, các đặc tính của vật liệu biến hóa không chỉ phụ thuộc vào thành phần hóa học của vật liệu cấu thành mà còn chịu tác động lớn bởi hình dạng và kích thước của cấu trúc được thiết kế. Để thu được H-MPA hoạt động trong băng tần C-X, các tham số hình học của vật liệu đã được tối ưu với các giá trị ban đầu được lựa chọn như sau: kích thước ô cơ sở là $a = 16,0$ mm, bán kính ngoài của vòng cộng hưởng là $R_1 = 7,0$ mm, bán kính trong là $R_2 = 6,0$ mm. Mô phỏng tính chất điện từ của H-MPA được thực hiện trên phần mềm CST, trong đó các điều kiện biên với tuần hoàn theo hai hướng x và y được thiết lập. Với trường hợp sóng truyền tới bề mặt theo phương vuông góc thì sóng điện từ truyền theo hướng z . Vì lớp kim loại nằm ở phía dưới cùng của H-MPA có khả năng chắn sóng điện từ ở vùng GHz, thành phần truyền qua bằng 0, nên độ hấp thụ được tính bởi $A = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2$.



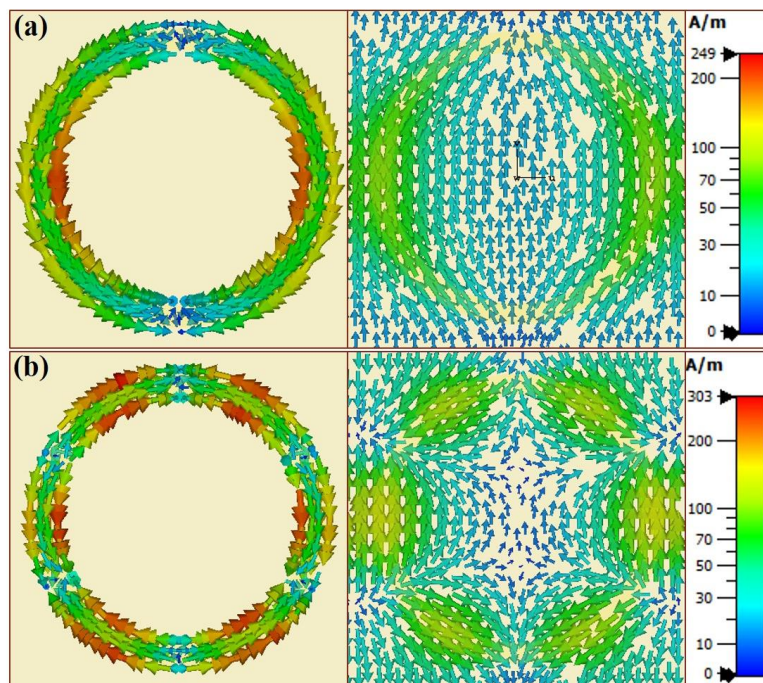
Hình 4.1. (a) Ô cơ sở của mẫu H-MPA được đề xuất, (b) ảnh cấu trúc mặt trên của ô cơ sở, (c) thiết lập phép đo hệ số phản xạ của H-MPA chế tạo được.

Kết quả mô phỏng phổ hấp thụ khi thay đổi độ dày lớp điện môi t được trình bày trên Hình 4.2. Khi t tăng từ 0,3 đến 0,6 mm, trong khoảng tần số từ 3,0 đến 18,0 GHz, vật liệu hấp thụ đơn đỉnh với một đỉnh duy nhất tại vị trí khoảng 4,3 GHz. Độ hấp thụ tại đỉnh này đạt giá trị cao nhất là khoảng 98% khi $t = 0,4$ mm. Khi tiếp tục tăng độ dày của lớp điện môi lên 1,5 mm, vật liệu có hai đỉnh hấp thụ, trong đó đỉnh hấp thụ tại 4,3 GHz có độ hấp thụ giảm xuống chỉ còn khoảng 27%, đỉnh hấp thụ thứ

hai ở 13,0 GHz có độ hấp thụ là 68%. Nếu $t = 2,0$ mm, vật liệu có ba đỉnh hấp thụ tại 4,2 GHz (17,6%), 12,8 GHz (99,9%) và 17,5 GHz (46%). Ngoài ra, có thể nhận thấy rằng khi thay đổi độ dày lớp điện môi, vị trí của đỉnh hấp thụ đầu tiên hầu như không thay đổi.



Hình 4.2. Phổ hấp thụ mô phỏng của H-MPA đang xét khi độ dày lớp điện môi thay đổi từ 0,3 đến 2,0 mm.

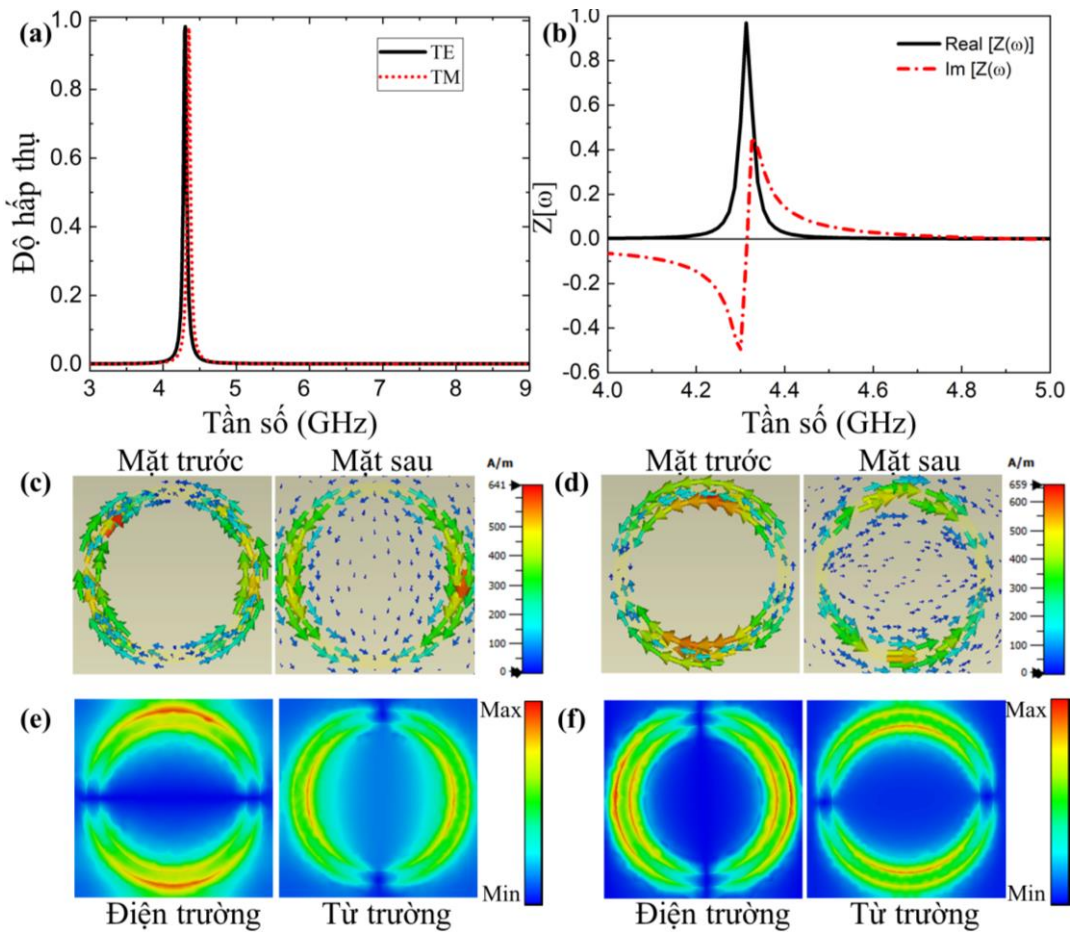


Hình 4.3. Phân bố dòng điện bề mặt tại (a) 4,3 GHz và (b) 13,0 GHz.

Nguồn gốc của các đỉnh hấp thụ được khảo sát thông qua phân bố dòng điện trên các bề mặt kim loại tại 4,3 GHz và 13,0 GHz, như trình bày trên Hình 4.3. Tại tần số 4,3 GHz, dòng điện tại mặt trên và lớp kim loại liên tục là ngược chiều nhau.

Điều này chứng tỏ đỉnh hấp thụ này có bản chất là cộng hưởng từ cơ bản. Tại tần số 13,0 GHz, các dòng điện tại vòng kim loại và mặt kim loại liên tục của cấu trúc cũng có chiều ngược nhau, chứng tỏ đỉnh hấp thụ này cũng có nguồn gốc từ cộng hưởng từ, tương tự như trường hợp tại 4,3 GHz. Tuy nhiên, dòng điện cảm ứng được chia thành ba vùng và các cặp dòng điện trong mỗi vùng là ngược chiều nhau. Vậy có thể kết luận là tại 13,0 GHz, đỉnh hấp thụ có bản chất là cộng hưởng từ bậc ba [39,41,42,96]. Từ kết quả trình bày ở trên, giá trị của các kích thước đặc trưng cho H-MPA được lựa chọn là $a = 16,0$ mm, $w = 1,0$ mm, bán kính ngoài (R_1) và bán kính trong (R_2) của vòng cộng hưởng lần lượt là 7,0 và 6,0 mm, độ dày lớp điện môi là 0,4 mm.

4.1.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc hai ở trạng thái phẳng



Hình 4.4. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng của H-MPA, (b) trở kháng hiệu dụng cho trường hợp sóng tới phân cực TE, (c) phân bố dòng điện bề mặt và (e) phân bố điện trường và từ trường tại 4,3 GHz với sóng tới phân cực TE, (d) phân bố dòng điện bề mặt và (f) phân bố điện trường và từ trường tại 4,3 GHz với sóng tới phân cực TM.

Trong phần này, đặc trưng điện từ của H-MPA có kích thước được tối ưu như ở mục trên tiếp tục được khảo sát. Đầu tiên, phổ hấp thụ của vật liệu ở dạng phẳng được mô phỏng dưới sóng điện từ tới phân cực điện trường ngang [Transverse-Electric (TE)] và phân cực từ trường ngang [Transverse-Magnetic (TM)]. Kết quả mô

phông được minh họa trong Hình 4.4(a). Trong cả hai trường hợp sóng điện từ phân cực TE và TM, phổ hấp thụ có một đỉnh duy nhất với độ hấp thụ 98% ở tần số 4,3 GHz. Về mặt lý thuyết, điều kiện để triệt tiêu thành phần phản xạ là trở kháng hiệu dụng của vật liệu có giá trị bằng với trở kháng của môi trường. Do đó, trở kháng hiệu dụng của MPA đã được tính toán từ các tham số S_{11} và S_{21} theo công thức sau [114]:

$$Z(\omega) = \sqrt{\frac{(1 + S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)}{(1 - S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)}}. \quad (4.1)$$

Kết quả tính toán được trình bày trong Hình 4.4 (b). Trở kháng hiệu dụng của MPA có phần ảo bằng 0 và phần thực là 0,96 ở 4,3 GHz. Như vậy có thể kết luận trở kháng của vật liệu gần tương đương với giá trị trở kháng của không khí. Do đó, tín hiệu phản xạ tại tần số này gần bằng 0 và sóng điện từ tới được hấp thụ gần như tuyệt đối trong H-MPA.

Phân bố dòng điện bề mặt trên các lớp kim loại được mô phỏng cho cả hai trường hợp sóng phân cực TE và TM tại tần số hấp thụ 4,3 GHz nhằm tìm ra nguồn gốc của đỉnh hấp thụ. Kết quả cho thấy các dòng điện có dạng lưỡng cực. Điều này chứng tỏ rằng tương tác giữa sóng điện từ và vật liệu đã kích thích cộng hưởng từ cơ bản, đây là nguyên nhân gây ra sự hấp thụ gần như hoàn toàn năng lượng của sóng điện từ có tần số 4,3 GHz [Hình 4.4 (c), (d)] [95].

Song song với quá trình mô phỏng, tần số cộng hưởng của vật liệu đề xuất được tính toán lý thuyết bằng cách xây dựng mô hình mạch LC cho cấu trúc. Dựa trên phân bố điện từ trường trên Hình 4.4(e), mạch điện LC tương đương được xây dựng (Hình 4.5). Sử dụng định luật Faraday và Ampere, độ tự cảm của vòng cộng hưởng có thể tính như sau:

$$L = \int_{-(t+2t_m)/2}^{(t+2t_m)/2} dz \left[\int_{-R_1}^{-R_2} \frac{\mu_0}{2\sqrt{R_1^2 - y^2}} dy + \int_{-R_2}^{R_2} \frac{\mu_0 \sqrt{R_1^2 - y^2}}{2(R_1 - R_2)R_1} dy + \int_{R_2}^{R_1} \frac{\mu_0}{2\sqrt{R_1^2 - y^2}} dy \right] \quad (4.2)$$

$$= (t + 2t_m) \mu \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_1}{R_1 - R_2} \left(\frac{1}{2} \arcsin \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{2} \frac{R_2}{R_1} \sqrt{\frac{R_1^2 - R_2^2}{R_1^2}} \right) \right],$$

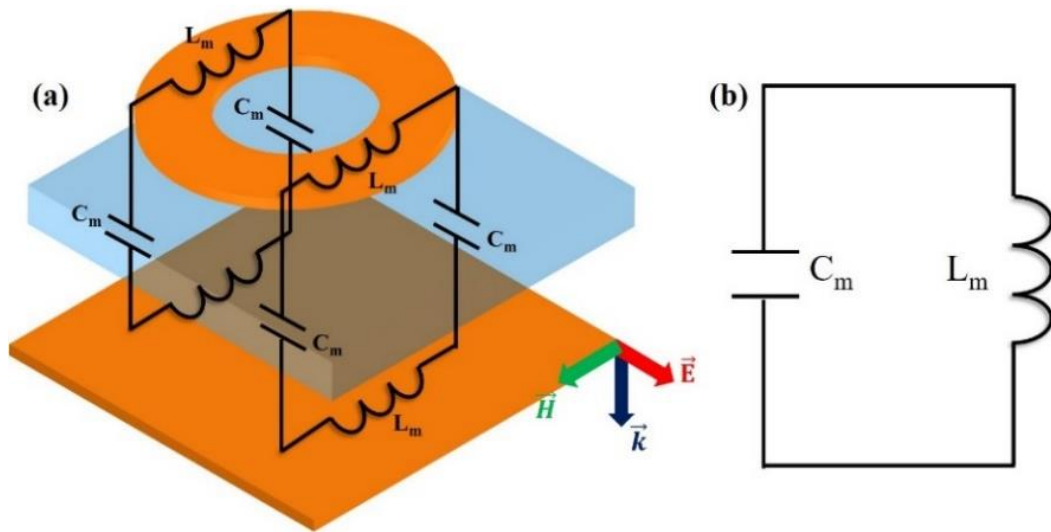
trong đó μ_0 là độ từ thẩm của môi trường. Từ mạch điện LC xây dựng cho cộng hưởng từ cơ bản, ta có độ tự cảm hiệu dụng của vật liệu được xác định bởi:

$$L_m = \frac{L}{2} = \frac{1}{2} (t + 2t_m) \mu \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_1}{R_1 - R_2} \left(\frac{1}{2} \arcsin \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{2} \frac{R_2}{R_1} \sqrt{\frac{R_1^2 - R_2^2}{R_1^2}} \right) \right], \quad (4.3)$$

Điện dung hiệu dụng của vật liệu là:

$$C_m = \varepsilon_0 \varepsilon c_1 \frac{S}{t} = \varepsilon_0 \varepsilon c_1 \frac{\pi(R_1^2 - R_2^2)}{t}, \quad (4.4)$$

trong đó ε_0 và ε lần lượt là độ điện thẩm của môi trường và độ điện thẩm của điện môi Polyimide, c_1 là hệ số đặc trưng cho sự phân bố dòng điện bề mặt không đều trên toàn bộ cấu trúc, $0,2 \leq c_1 \leq 0,3$ [95], S là diện tích của vòng cộng hưởng, R_1 và R_2 lần lượt là bán kính ngoài và bán kính trong của vòng cộng hưởng.



Hình 4.5. (a) Mô hình mạch điện LC trong trường hợp cộng hưởng từ cơ bản, (b) mạch điện LC rút gọn.

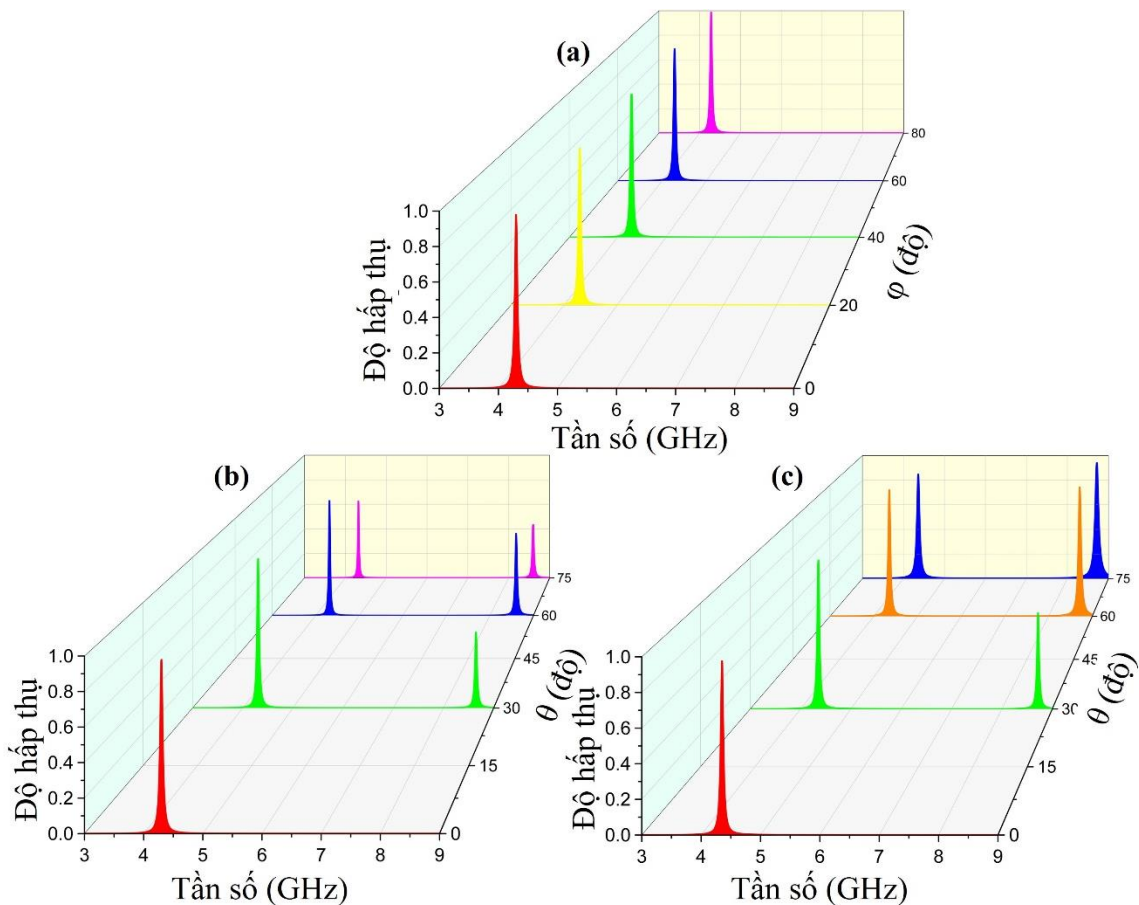
Tần số cộng hưởng từ cơ bản của H-MPA được tính bởi công thức:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}}, \quad (4.5)$$

Thay các giá trị của t , t_m , R_1 , R_2 vào biểu thức (4.5), chúng tôi nhận được giá trị của tần số cộng hưởng từ cơ bản là $f_1 = 4,3$ GHz ứng với $c_1 = 0,25$. Giá trị này hoàn toàn trùng khớp với kết quả thu được từ mô phỏng.

Từ các công trình đã công bố liên quan đến MPA [43,115] và kết quả khảo sát tác động của góc tới của sóng điện từ đến phổ hấp thụ của MPA được trình bày ở phần 3.2, có thể nhận thấy rằng khi tăng góc tới, vật liệu có thể cho các đỉnh hấp thụ mới. Do đó, với mục tiêu đạt được H-MPA, chúng tôi tiến hành khảo sát đặc trưng hấp thụ của vật liệu đề xuất ở trên dưới sóng tới phân cực TE và phân cực TM với góc tới khác nhau. Ảnh hưởng của góc phân cực được khảo sát và trình bày trên Hình 4.6(a). Dễ thấy, phổ hấp thụ của vật liệu không thay đổi khi góc phân cực tăng từ 0

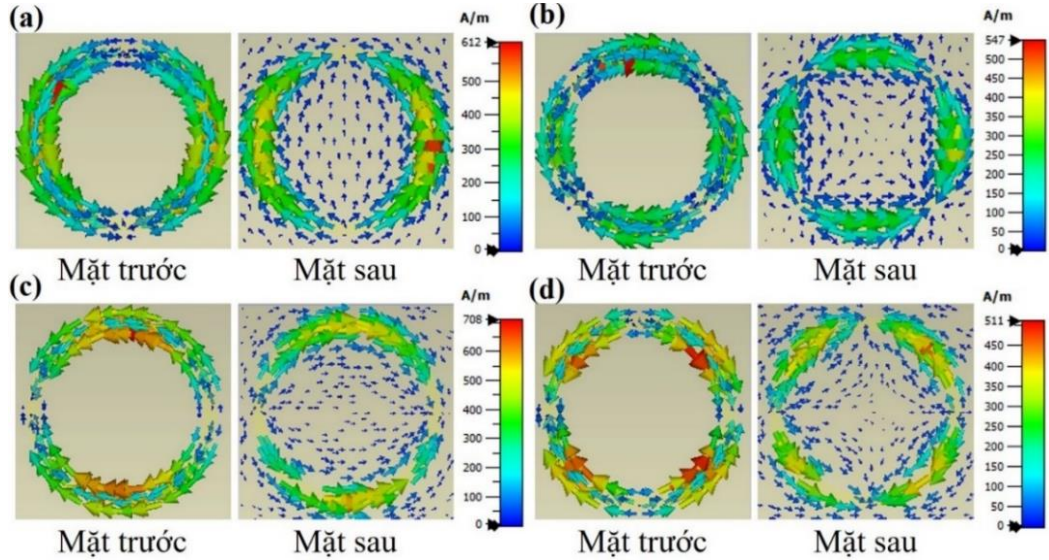
đến 80° . Như vậy, H-MPA được đang xét có đặc trưng hấp thụ không phụ thuộc vào phân cực của sóng điện từ tới do cấu trúc hình học có tính đối xứng cao. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của góc tới được trình bày trong Hình 4.6(b) (phân cực TE) và 4.6(c) (phân cực TM). Với trường hợp sóng phân cực TE, khi góc tới tăng từ 0° đến 60° , đỉnh hấp thụ tại 4,3 GHz vẫn được duy trì tốt với độ hấp thụ trên 90%. Bên cạnh đó, có một đỉnh hấp thụ mới xuất hiện tại 8,6 GHz với độ hấp thụ đạt 63% khi góc tới là 60° . Sự xuất hiện của đỉnh hấp thụ mới này có thể giải thích do hiện tượng lệch pha trên bề mặt cấu trúc vòng cộng hưởng, gây ra bởi sóng tới bề mặt vật liệu theo phương xiên góc [43,115]. Khi sóng tới không vuông góc với bề mặt H-MPA, nó trở nên là bất đối xứng với sóng điện từ. Khi đó, trường phân bố sẽ không cùng pha trên toàn bộ bề mặt của cấu trúc cộng hưởng nữa. Kết quả là mode cộng hưởng bậc cao ở 8,6 GHz được kích thích. Đối với sóng phân cực TM, khi góc tới tăng từ 0 đến 60° , đỉnh hấp thụ cơ bản tại 4,3 GHz vẫn được duy trì tốt với độ hấp thụ trên 96%, và có thêm một đỉnh hấp thụ mới xuất hiện tại vị trí 8,7 GHz với độ hấp thụ đạt đến 98%.



Hình 4.6. Phổ hấp thụ mô phỏng khi góc phân cực tăng từ 0° đến 80° (a) và khi thay đổi góc tới từ 0° đến 75° với sóng phân cực (b) TE và (c) TM.

Cơ chế vật lý của các đỉnh hấp thụ mới được khảo sát thông qua việc mô phỏng phân bố dòng điện trên bề mặt kim loại tại các tần số hấp thụ. Với góc tới $\theta = 60^\circ$ của

sóng tới phân cực TE và TM, kết quả mô phỏng được trình bày trên Hình 4.7. Tại 4,3 GHz, các dòng điện cảm ứng trên vòng cộng hưởng và tấm kim loại liên tục có chiều ngược nhau và có dạng lưỡng cực. Điều này chứng tỏ cơ chế hấp thụ tại tần số này là cộng hưởng từ cơ bản được kích thích. Hình 4.7(b) và (d) lần lượt minh họa phân bố dòng điện bề mặt ở tần số hấp thụ mới cho trường hợp sóng phân cực TE và TM. Kết quả cho thấy các dòng điện ở hai bề mặt kim loại trên và dưới vẫn ngược chiều nhau, xác nhận rằng sự hấp thụ tại tần số này cũng do cộng hưởng từ. Đặc biệt, dòng điện ở cả hai mặt kim loại đều được chia thành bốn vùng khác nhau, trong đó dòng điện ở hai vùng lân cận ngược chiều nhau. Từ những kết quả này có thể kết luận rằng đỉnh hấp thụ ở tần số 8,6 GHz là do hiện tượng cộng hưởng từ bậc hai [40,125]. Cộng hưởng từ bậc hai về cơ bản là khó nhận được trong các cấu trúc đối xứng. Mặc dù H-MPA được đề xuất có tính đối xứng cao, nhưng dưới sự bất đối xứng được tạo ra ở góc tới lớn, cộng hưởng từ bậc hai đã được quan sát thấy [118].



Hình 4.7. Phân bố dòng điện tại (a) 4,3 GHz và (b) 8,6 GHz với sóng phân cực TE, (c) 4,3 GHz và (d) 8,7 GHz ở phân cực TM.

Để kiểm chứng sự xuất hiện của đỉnh hấp thụ bậc cao, mạch điện LC tương đương đã được xây dựng để tính toán giá trị tần số cộng hưởng. Dựa trên phân bố điện trường [Hình 4.8 (a) và (b)], mạch điện LC tương đương cho cộng hưởng từ bậc hai được xây dựng như Hình 4.8(c). Độ tự cảm của vòng cộng hưởng trong trường hợp này được tính như sau:

$$\begin{aligned}
 L' &= \int_{-(t+2t_m)/2}^{(t+2t_m)/2} dz \left[\int_{R_2}^{R_1} \frac{\mu}{2\sqrt{R_1^2 - y^2}} dy + \int_0^{R_2} \frac{\mu\sqrt{R_1^2 - y^2}}{2(R_1 - R_2)R_1} dy \right] \\
 &= \frac{1}{2}(t + 2t_m)\mu \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_1}{R_1 - R_2} \left(\frac{1}{2} \arcsin \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{2} \frac{R_2}{R_1} \sqrt{\frac{R_1^2 - R_2^2}{R_1^2}} \right) \right]. \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

Suy ra độ tự cảm hiệu dụng của vật liệu là:

$$L'_m = \frac{L'}{2} = \frac{1}{4}(t + 2t_m) \mu \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_1}{R_1 - R_2} \left(\frac{1}{2} \arcsin \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{2} \frac{R_2}{R_1} \sqrt{\frac{R_1^2 - R_2^2}{R_1^2}} \right) \right]. \quad (4.7)$$

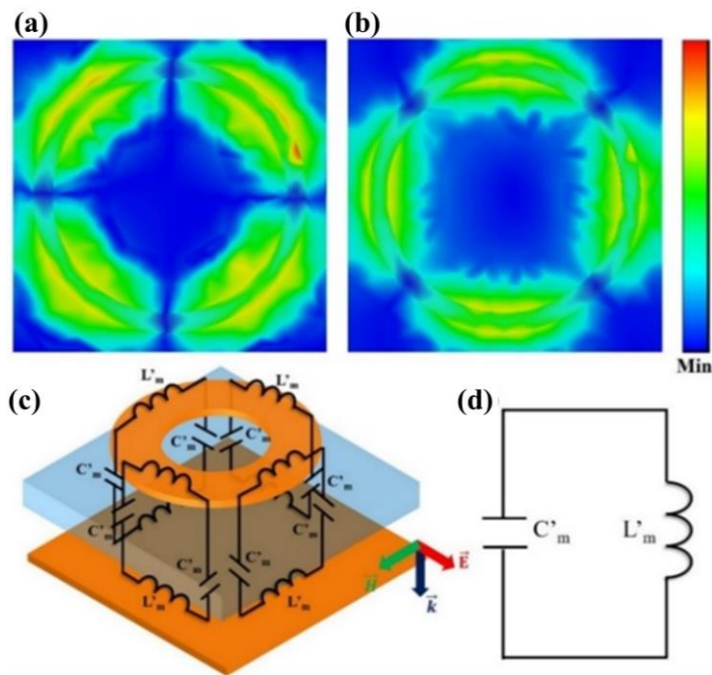
Tương tự như ở cộng hưởng từ cơ bản, điện dung hiệu dụng của vòng cộng hưởng là:

$$C'_m = \varepsilon_0 \varepsilon c_1 \frac{S'}{t} = \varepsilon_0 \varepsilon c_1 \frac{\pi(R_1^2 - R_2^2)}{2t}, \quad (4.8)$$

và giá trị của tần số cộng hưởng được tính bởi:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L'_m C'_m}}. \quad (4.9)$$

Từ các công thức (4.7), (4.8) và (4.9), giá trị của f_2 tính toán được là $f_2 = 8,7$ GHz với giá trị $c_1 = 0,25$. Kết quả này phù hợp tốt với giá trị tần số quan sát được trong mô phỏng.

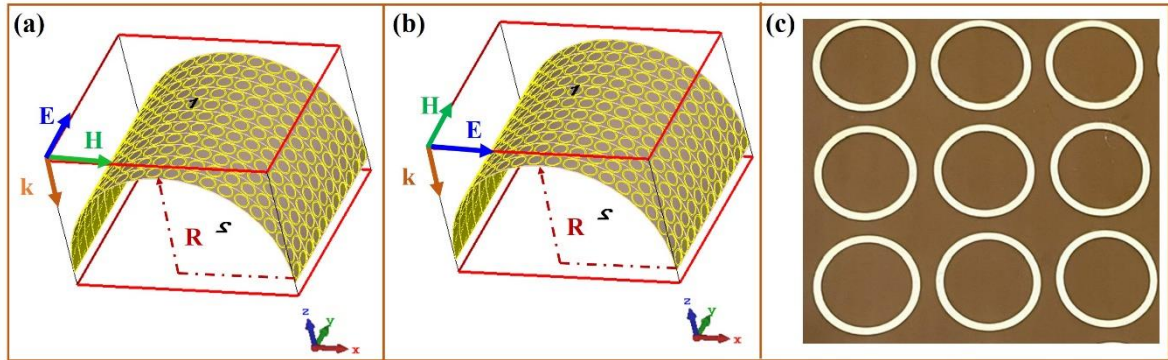


Hình 4.8. Phân bố điện trường tại (a) 8,6 GHz dưới sóng phân cực TE, (b) 8,7 GHz dưới sóng phân cực TM, (c) mạch điện LC tương đương và (d) mạch điện LC rút gọn.

4.1.3. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc hai ở trạng thái uốn cong

H-MPA được đề xuất có lớp điện môi được làm từ Polyimide, một polymer có khả năng uốn dẻo tốt. Do đó, H-MPA chế tạo được có khả năng uốn cong một cách dễ dàng và gắn lên bề mặt hình trụ với các bán kính uốn có thể thay đổi linh hoạt. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA ở trạng thái uốn cong đã được mô phỏng và đo

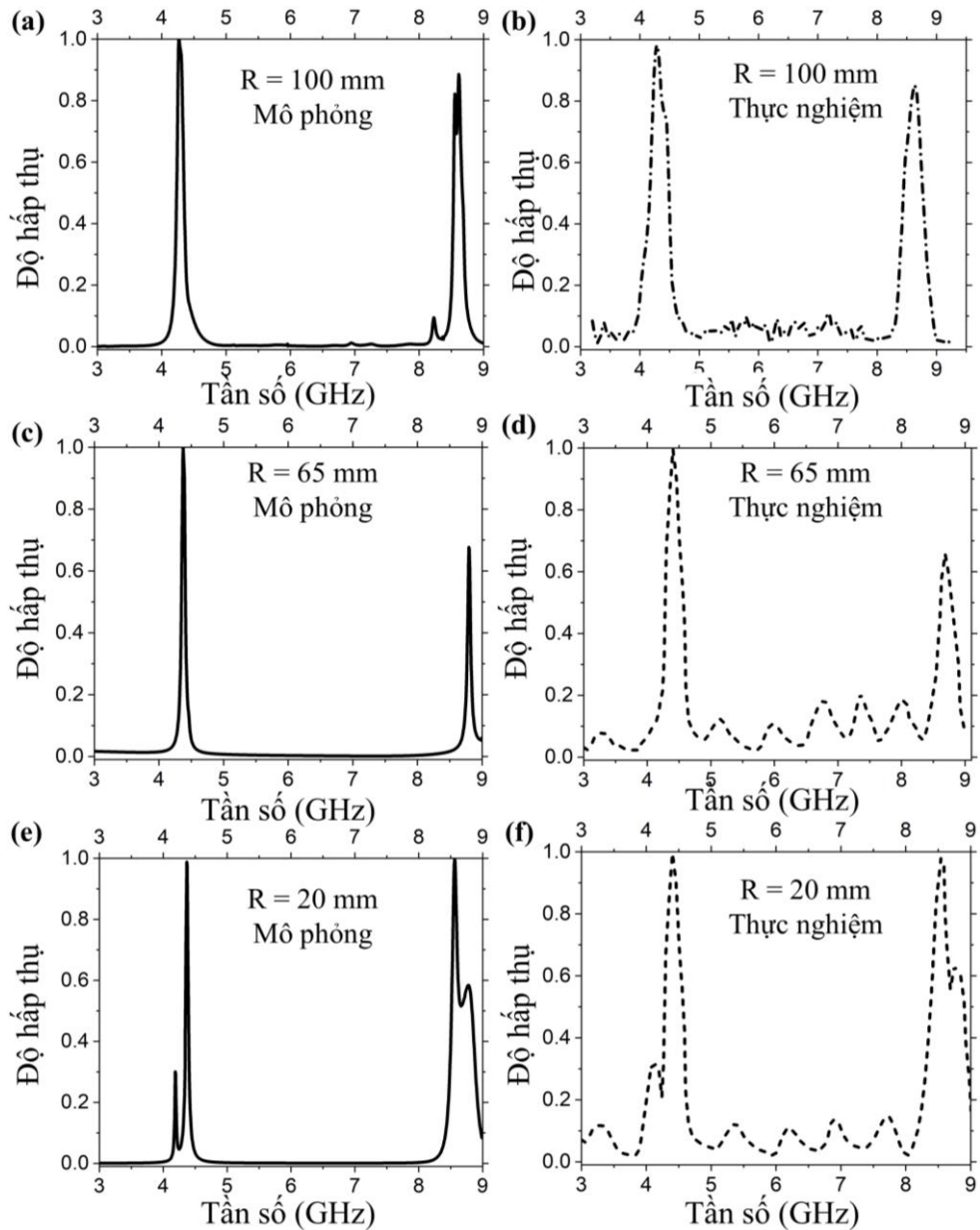
đặc với bán kính uốn cong thay đổi từ 100 mm đến 20 mm cho cả hai trường hợp sóng phân cực TE và phân cực TM.



Hình 4.9. Minh họa cấu hình uốn cong và định nghĩa bán kính uốn cho các trường hợp sóng tới phân cực (a) TE, (b) TM và (c) mẫu vật liệu chế tạo được.

Tính chất điện từ của mẫu đã chế tạo được đo bởi máy phân tích mạng vectơ R&S ZNB20. Máy phân tích được kết nối với hai ăng-ten hoạt động như một máy phát và một máy thu sóng điện từ. Đối với cấu hình đo phản xạ, các ăng ten được đặt ở cùng một phía, phía trên mặt phẳng mẫu. Một tấm đồng có kích thước bằng với kích thước của mẫu H-MPA được sử dụng để hiệu chuẩn và hoạt động như một mặt phản xạ hoàn toàn sóng điện từ tới. Các kết quả đo đạc được trình bày trên Hình 4.10 (b), (d), (f) cho trường hợp sóng phân cực TE và trên Hình 4.11 (b), (d), (f) cho trường hợp sóng phân cực TM.

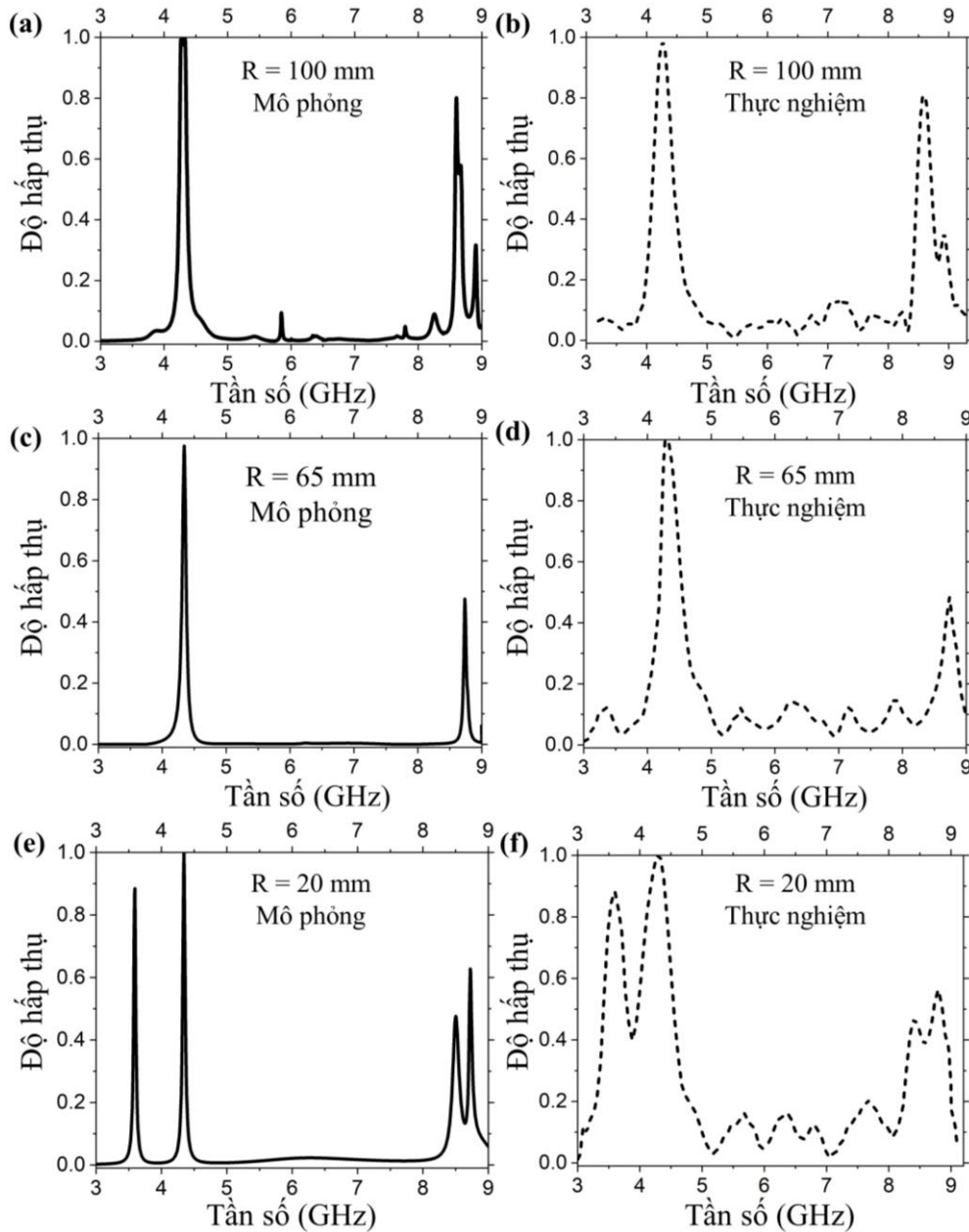
Đối với trường hợp sóng tới phân cực TE, khi uốn cong, vật liệu vẫn duy trì tốt đỉnh hấp thụ cơ bản tại khoảng 4,3 GHz với độ hấp thụ mô phỏng luôn đạt trên 99%. Ngoài ra, vật liệu còn cho thấy có sự xuất hiện của các đỉnh hấp thụ mới. Số lượng đỉnh hấp thụ, vị trí và cường độ của chúng phụ thuộc vào độ uốn cong của vật liệu. Cụ thể, khi $R = 100$ mm, phổ hấp thụ mô phỏng cho thấy hai đỉnh hấp thụ mới xuất hiện tại 8,56 GHz (82,1%) và 8,62 GHz (87,3%), trong khi đó, phổ thực nghiệm quan sát thấy một đỉnh hấp thụ mới tại 8,64 GHz với độ hấp thụ là 81,6%. Khi $R = 65$ mm, phổ hấp thụ mô phỏng cho thấy một đỉnh hấp thụ mới xuất hiện tại khoảng 8,8 GHz với độ hấp thụ đạt 67,5%, phổ thực nghiệm có đỉnh hấp thụ mới tại 8,7 GHz có độ hấp thụ 66,7%. Tiếp tục giảm bán kính uốn cong xuống còn $R = 20$ mm, phổ hấp thụ mô phỏng cho thấy có sự xuất hiện ba đỉnh hấp thụ mới ở 4,2 GHz, 8,6 GHz và 8,8 GHz, với độ hấp thụ lần lượt là 30%, 99% và 58%, trong khi đó phổ thực nghiệm quan sát thấy ba đỉnh hấp thụ tại các vị trí 4,1 GHz (độ hấp thụ 31,5%), 8,5 GHz (độ hấp thụ 97,8%) và 8,7 GHz (độ hấp thụ 62,8%).



Hình 4.10. Phổ hấp thụ mô phỏng (a), (c), (e) và thực nghiệm (b), (d), (f) của H-MPA với bán kính uốn cong thay đổi từ $R = 100$ mm đến $R = 20$ mm đối với phân cực TE.

Đối với sóng phân cực TM, khi vật liệu bị uốn cong, phổ hấp thụ cũng có sự xuất hiện của các đỉnh hấp thụ mới. Với $R = 100$ mm, phổ hấp thụ mô phỏng có hai đỉnh hấp thụ mới hình thành tại 8,6 và 8,9 GHz với độ hấp thụ lần lượt là 80,08% và 32% và phổ thực nghiệm cũng quan sát thấy hai đỉnh hấp thụ mới tại 8,6 GHz (80,1%) và 8,9 (33,7%). Khi $R = 65$ mm, đỉnh hấp thụ mới xuất hiện tại 8,73 GHz (46,67%) (mô phỏng) và tại 8,7 GHz (45,4%) (thực nghiệm). Khi $R = 20$ mm, có ba đỉnh hấp thụ mới được xuất hiện ở xung quanh tần số 3,6 GHz, 8,5 và 8,7 GHz, với độ hấp thụ lần lượt là 88%, 47% và 62% (mô phỏng) và tại các vị trí 3,6 GHz (87%), 8,4 GHz (46%) và 8,8 GHz (55,9%) (thực nghiệm). Cả kết quả mô phỏng và thực nghiệm đều cho thấy độ hấp thụ của đỉnh ban đầu ở 4,3 GHz có thể đạt tới 99,9% khi uốn cong. Với cả hai trường hợp sóng phân cực TE và TM, kết quả thực nghiệm và mô phỏng

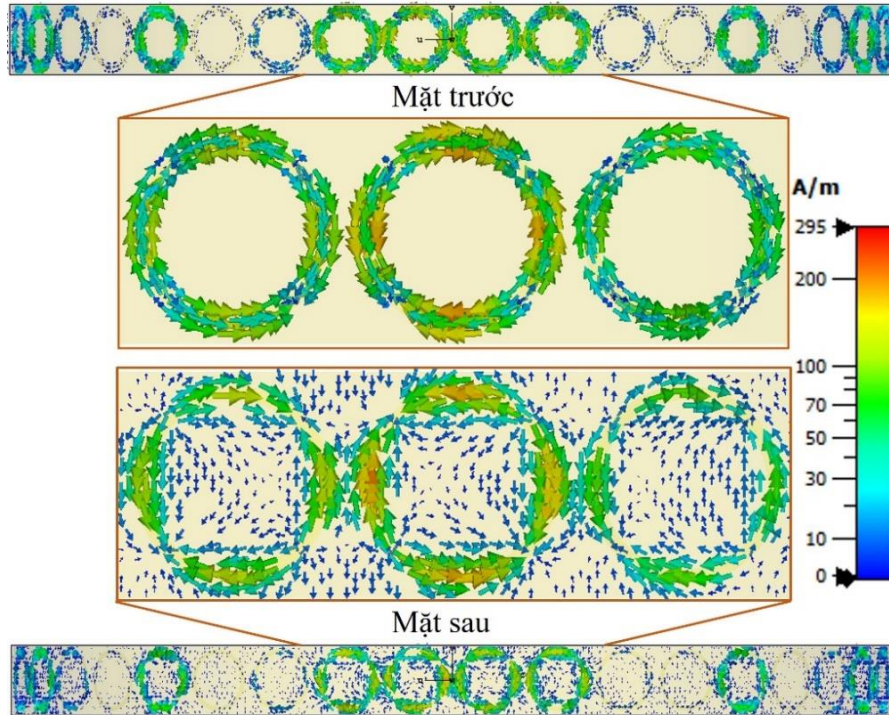
có sự phù hợp khá tốt với nhau, cụ thể thực nghiệm đã đạt được thông số về số lượng đỉnh hấp thụ, vị trí đỉnh hấp thụ có sự sai lệch nhỏ. Tuy nhiên, độ hấp thụ thực nghiệm nhỏ hơn so với kết quả mô phỏng. Nguyên nhân gây ra sự sai khác này là do các thông số về hằng số điện môi và tổn hao điện môi của nhà sản xuất sai khác với thông số mô phỏng. Ngoài ra, quá trình chế tạo có thể gặp phải một số sai hỏng.



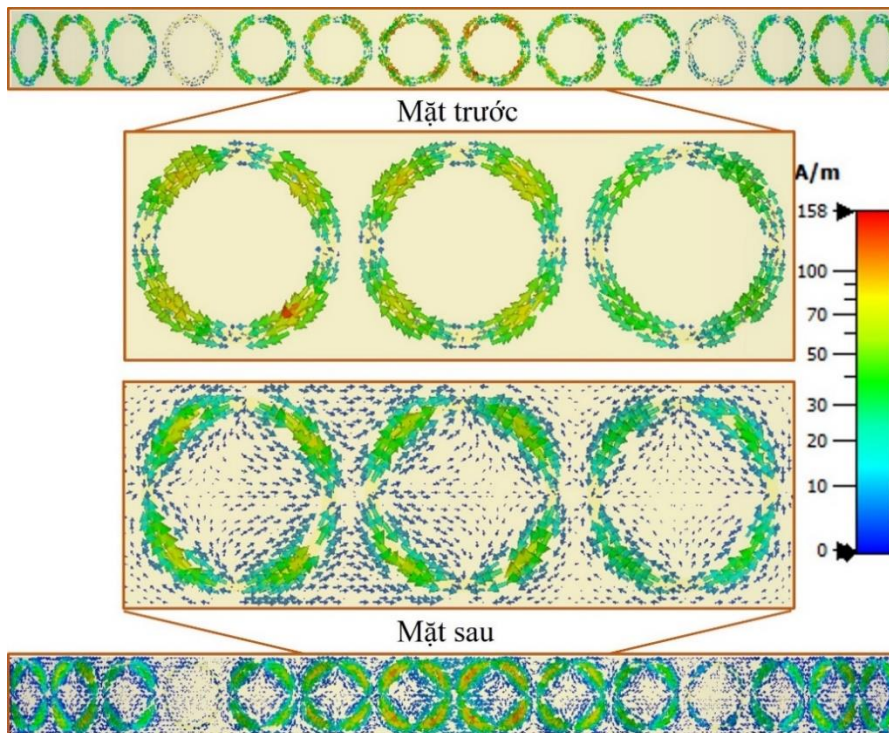
Hình 4.11. Phổ hấp thụ mô phỏng (a), (c), (e) và thực nghiệm (b), (d), (f) của H-MPA với bán kính uốn cong thay đổi từ $R = 100$ mm đến $R = 20$ mm đối với phân cực TM.

Để tìm hiểu cơ chế vật lý của các đỉnh hấp thụ, phân bố dòng điện bề mặt của mẫu H-MPA uốn cong với phân cực TE và TM của sóng tới ở các tần số khác nhau được mô phỏng. Phân bố dòng điện tại 8,56 GHz dưới sóng tới TE được minh họa trong Hình 4.12. Có thể quan sát thấy rằng, dòng điện bề mặt tại mỗi vòng cộng

hường được chia thành hai vùng mà các dòng điện trong hai vùng này ngược chiều với nhau, tương tự như hiện tượng quan sát được khi mẫu vật liệu ở dạng phẳng. Đồng thời, dòng điện ở hai mặt của cấu trúc có chiều ngược nhau tạo nên dao động dạng tứ cực. Điều này khẳng định rằng cộng hưởng từ bậc hai đã được kích thích.



Hình 4.12. Phân bố dòng điện bề mặt với sóng phân cực TE tại 8,56 GHz khi vật liệu uốn cong với $R = 100$ mm.



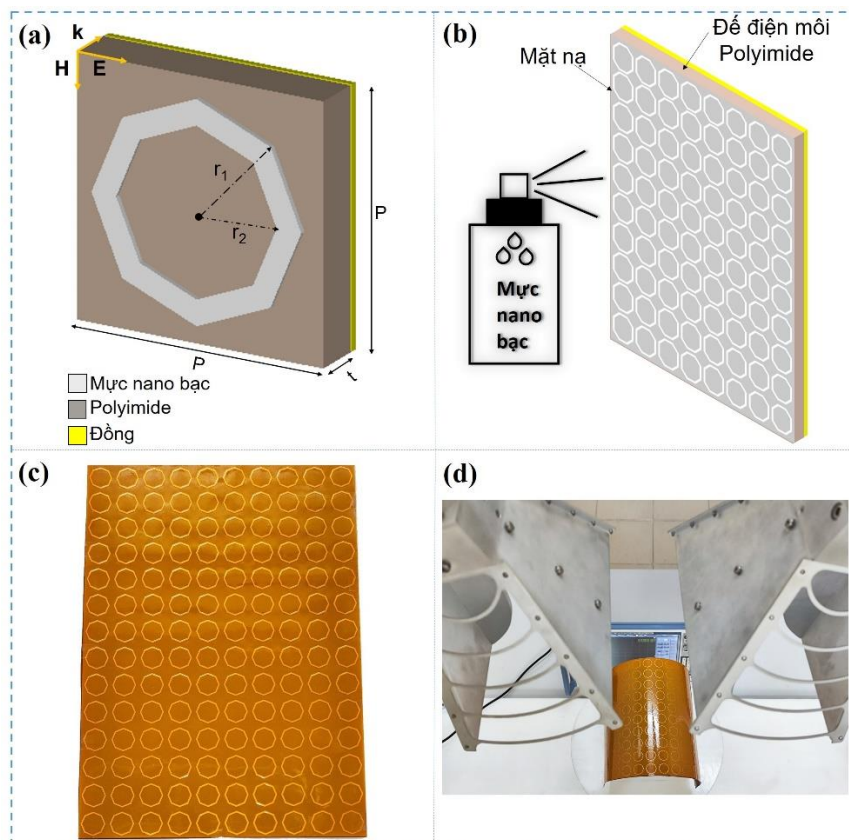
Hình 4.13. Phân bố dòng điện bề mặt với sóng phân cực TM tại 8,6 GHz khi vật liệu uốn cong với $R = 100$ mm.

Phân bố dòng điện bề mặt 8,6 GHz dưới sóng tới TM được biểu diễn trong Hình 4.13. Tại tần số này các dòng điện tại mặt trước và mặt sau có chiều ngược nhau và dao động theo dạng tứ cực tương tự như trường hợp sóng tới phân cực TE. Điều này chứng tỏ rằng đỉnh hấp thụ bậc cao xuất hiện khi mẫu được uốn cong trong cả hai trường hợp sóng phân cực TE và TM, có nguồn gốc từ cộng hưởng từ bậc hai. Như đã trình bày ở trên, cộng hưởng từ bậc hai chỉ được kích thích khi có vật liệu bất đối xứng đối với sóng điện từ. Khi vật liệu bị uốn cong, cấu trúc H-MPA cũng trở nên bất đối xứng, dẫn đến cả hai mode cộng hưởng cơ bản và bậc hai đều được kích thích [118,125].

4.2. Cộng hưởng từ bậc hai trong cấu trúc cộng hưởng dạng gấp khúc

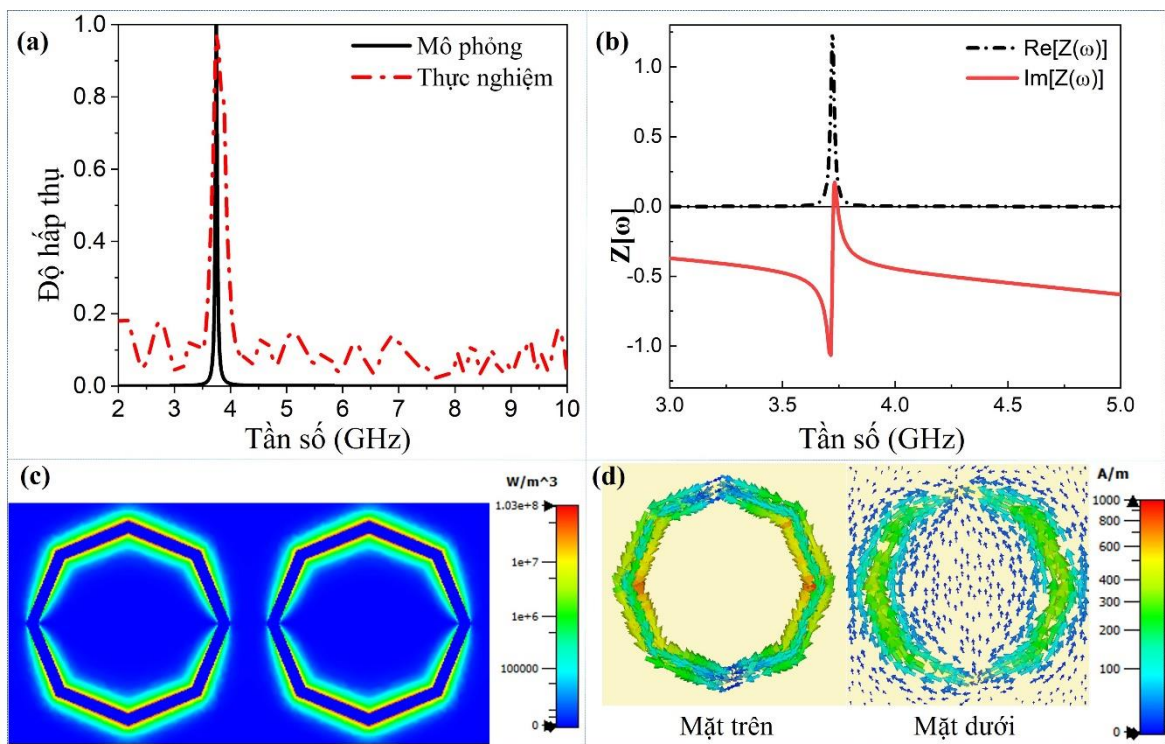
Hiệu ứng cộng hưởng từ bậc hai là một mode tối, chỉ xuất hiện trong một số trường hợp cấu trúc bị phá vỡ tính đối xứng. Ở phần 4.1, hiệu ứng cộng hưởng từ bậc hai trong cấu trúc cộng hưởng dạng vòng tròn đã được quan sát thấy khi sóng điện từ tới xiên góc hoặc khi cấu trúc bị bẻ cong. Trong mục này, đặc trưng của đỉnh hấp thụ cộng hưởng từ bậc hai tiếp tục được khảo sát cho trường hợp vòng cộng hưởng có dạng gấp khúc.

4.2.1. Thiết kế và chế tạo vật liệu



Hình 4.14. (a) Sơ đồ cấu trúc ô cơ sở của H-MPA đề xuất, (b) sơ đồ quy trình chế tạo vật liệu, (c) mẫu H-MPA được chế tạo và (d) thiết lập phép đo phản xạ của mẫu vật liệu khi ở trạng thái uốn cong.

Vật liệu đề xuất được thiết kế với ba lớp, kim loại - điện môi - kim loại, tương tự như các MPA truyền thống khác [Hình 4.14(a)]. Lớp trên cùng bao gồm các cấu trúc cộng hưởng gấp khúc thành dạng bát giác đều, được chế tạo từ mực nano bạc có độ dẫn điện 10^7 S/m và có độ dày 0,035 mm, sắp xếp tuần hoàn. Các vòng cộng hưởng này có bán kính ngoài là $r_1 = 8,5$ mm và bán kính trong là $r_2 = 7,5$ mm. Các kích thước này đã được tối ưu để đảm bảo điều kiện phối hợp trở kháng. Để đạt được khả năng uốn cong tốt trong khi vẫn bảo toàn tính toàn vẹn của cấu trúc, lớp điện môi được chế tạo từ Polyimide có độ dày được tối ưu là $t = 0,5$ mm. Cuối cùng là tấm kim loại đồng có độ dày 0,035 mm. Vật liệu được chế tạo sử dụng phương pháp in lưới [Hình 4.14(c)].



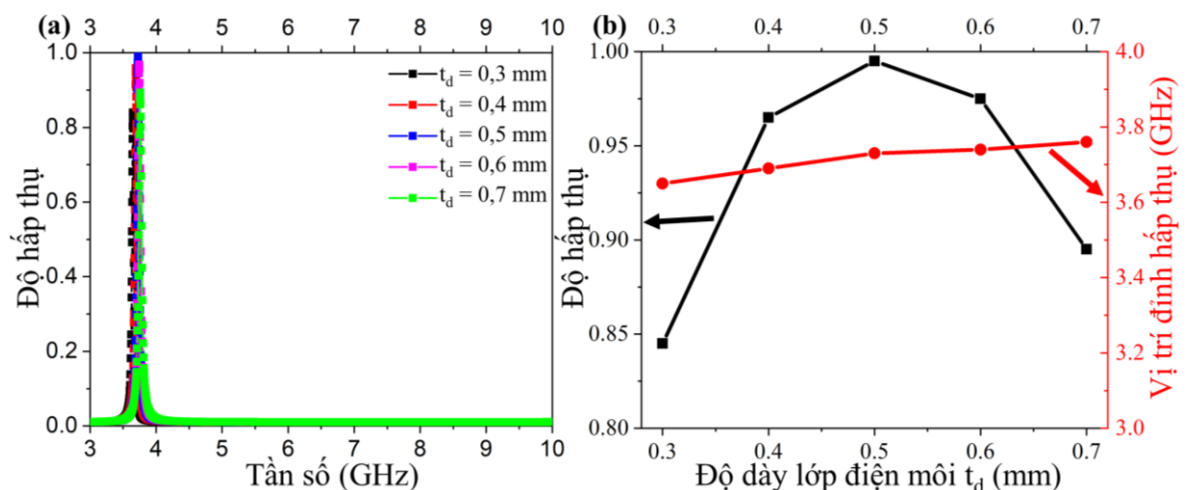
Hình 4.15. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng và thực nghiệm, (b) trở kháng hiệu dụng của H-MPA đề xuất, (c) mật độ tổn thất năng lượng và (d) dòng điện bề mặt ở tần số 3,7 GHz.

Hình 4.15(a) trình bày phổ hấp thụ mô phỏng và thực nghiệm của vật liệu ở dạng cấu hình phẳng dưới sóng điện từ phân cực TE trong khoảng tần số từ 3 đến 10 GHz. Sóng điện từ truyền dọc tới bề mặt của cấu trúc theo phương vuông góc. Theo mô phỏng, ở tần số 3,7 GHz, độ hấp thụ xấp xỉ 99,9%. Theo thực nghiệm, trong khoảng tần số khảo sát, phổ hấp thụ có một đỉnh tại 3,7 GHz với độ hấp thụ 98%. Trở kháng hiệu dụng của cấu trúc đề xuất được tính toán và trình bày trong Hình 4.15(b). Ở tần số 3,7 GHz, trở kháng có phần thực là 1,009 và phần ảo bằng 0, xác nhận rằng tại tần số này trở kháng của vật liệu xấp xỉ trở kháng của không khí. Do đó, hầu như toàn bộ sóng điện từ truyền qua bề mặt phân cách giữa không khí và H-MPA mà

không bị phản xạ trở lại. Sau đó, năng lượng sóng điện từ chủ yếu bị tiêu tán trong lớp điện môi, như được mô tả trong phân bố mật độ tổn thất điện năng như trong Hình 4.15(c). Để hiểu rõ hơn về nguồn gốc của đỉnh hấp thụ này, phân bố dòng điện bề mặt tại 3,7 GHz đã được khảo sát và trình bày trong Hình 4.15(d), trong đó dòng điện trên hai bề mặt kim loại ngược chiều nhau, tạo thành lưỡng cực từ. Hiện tượng quan sát được chứng tỏ rằng cộng hưởng từ cơ bản đã được kích thích ở 3,7 GHz.

4.2.2. Ảnh hưởng của các tham số cấu trúc và sự phân cực sóng điện từ lên đặc trưng hấp thụ của vật liệu ở trạng thái phẳng

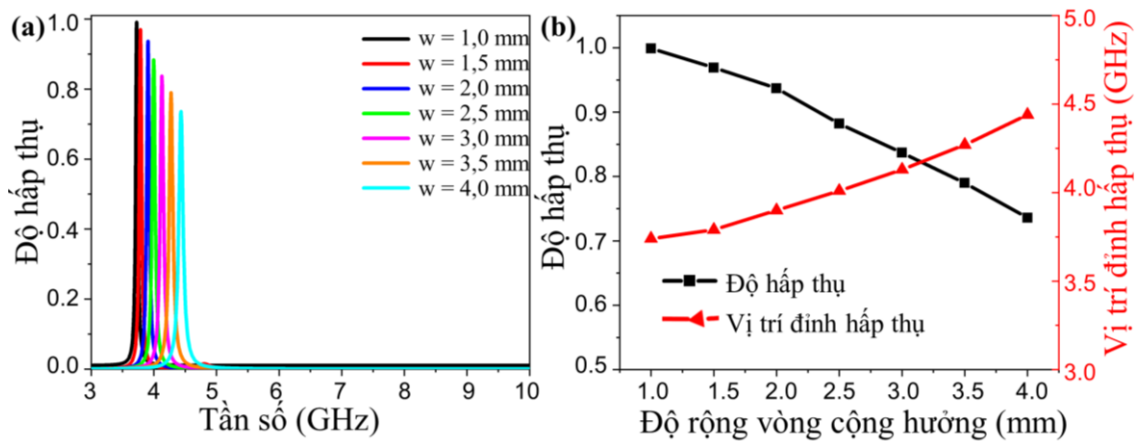
Ảnh hưởng của các tham số cấu trúc lên đặc trưng hấp thụ của vật liệu được khảo sát bằng mô phỏng. Đầu tiên là ảnh hưởng của độ dày lớp điện môi t_d . Giá trị của t_d được thay đổi từ 0,3 đến 0,7 mm, trong khi đó bán kính ngoài và bán kính trong của vòng cộng hưởng được giữ không đổi, lần lượt là 8,5 và 7,5 mm. Kết quả được minh họa trong Hình 4.16. Có thể nhận thấy rằng, khi độ dày lớp điện môi tăng từ 0,3 đến 0,7 mm, vị trí của đỉnh hấp thụ có sự dịch chuyển về phía tần số cao hơn, tuy nhiên sự dịch chuyển này là không đáng kể. Sự dịch chuyển này có thể giải thích theo lý thuyết mạch LC tương đương. Khi độ dày lớp điện môi thay đổi sẽ làm thay đổi giá trị của độ tự cảm và điện dung của các thành phần cuộn dây và tụ điện trong mạch LC tương đương. Điều này dẫn đến đỉnh cộng hưởng bị dịch chuyển. Ngoài ra, khi thay đổi độ dày điện môi, cường độ hấp thụ thay đổi rõ rệt. Khi $t_d = 0,3$ mm, độ hấp thụ của vật liệu là 83,01%, khi tăng độ dày lên, độ hấp thụ tăng lên và đạt cực đại khoảng 99,5% khi $t_d = 0,5$ mm. Nếu tiếp tục tăng t_d thì độ hấp thụ lại giảm xuống. Khi $t_d = 0,7$ mm, độ hấp thụ giảm xuống còn 88,33%.



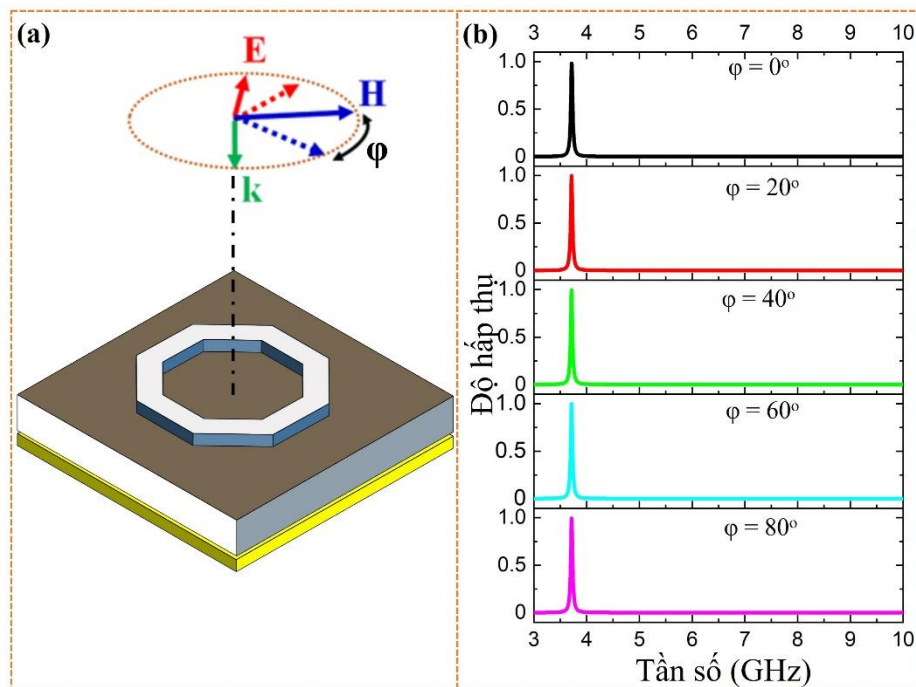
Hình 4.16. (a) Ảnh hưởng của độ dày lớp điện môi lên phổ hấp thụ, (b) sự thay đổi cường độ và vị trí đỉnh hấp thụ khi độ dày điện môi thay đổi từ 0,3 đến 0,7 mm.

Tiếp theo, ảnh hưởng của tham số độ rộng vòng cộng hưởng ($w = R_1 - R_2$) được khảo sát, trong khi giữ nguyên giá trị của bán kính ngoài $R_1 = 8,5$ mm và độ dày

điện môi là $t_d = 0,5$ mm. Kết quả mô phỏng được minh họa trên Hình 4.17. Khi R_2 giảm từ 7,5 mm đến 4,5 mm, tức là độ rộng vòng cộng hưởng tăng từ 1,0 mm đến 4,0 mm, ta có thể quan sát thấy sự giảm độ hấp thụ: độ hấp thụ giảm dần từ 99,5% ứng với $w = 1,0$ mm đến 73,5 % khi $w = 4,0$ mm. Ảnh hưởng của độ rộng vòng cộng hưởng lên độ hấp thụ được giải thích do khi thay đổi độ rộng vòng cộng hưởng đã làm thay đổi trở kháng hiệu dụng của vật liệu, điều kiện phối hợp trở kháng không được thỏa mãn. Kết quả là một phần sóng điện từ bị phản xạ lại môi trường tới và độ hấp thụ bị suy giảm. Bên cạnh sự giảm độ hấp thụ, ta còn quan sát thấy đỉnh hấp thụ bị dịch chuyển về phía tần số cao hơn khi tăng độ rộng vòng cộng hưởng.



Hình 4.17. (a) Ảnh hưởng của độ rộng vòng cộng hưởng lên phổ hấp thụ, (b) sự thay đổi cường độ và vị trí đỉnh hấp thụ khi độ rộng vòng cộng hưởng thay đổi từ 1,0 đến 4,0 mm.

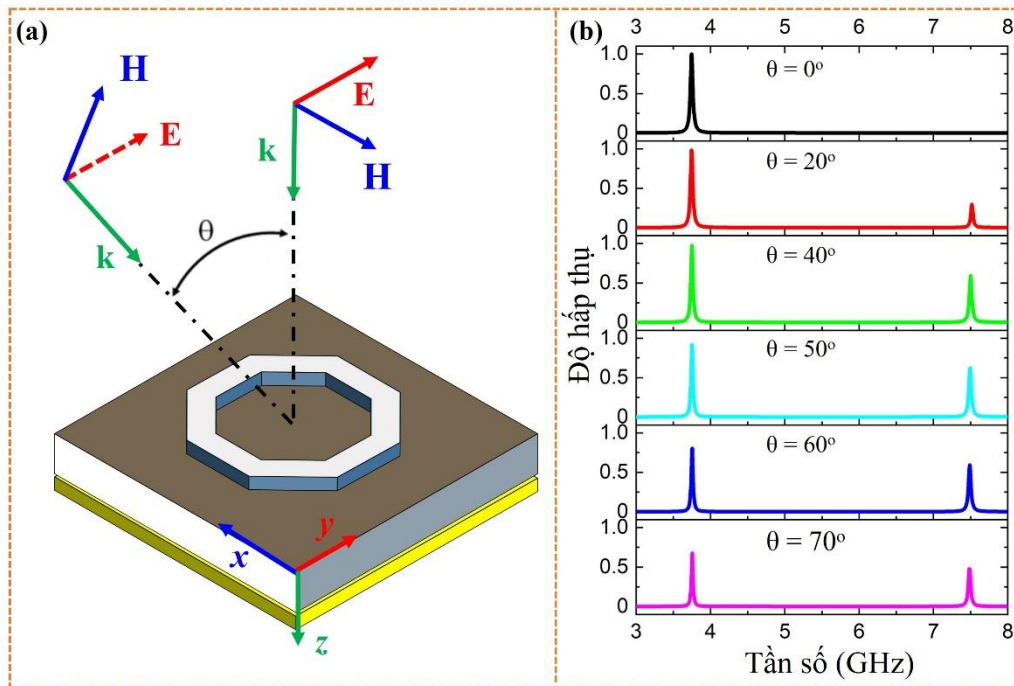


Hình 4.18. (a) Minh họa góc phân cực sóng điện từ ϕ , (b) ảnh hưởng của góc phân cực lên phổ hấp thụ của vật liệu.

Cuối cùng, ảnh hưởng của góc phân cực sóng điện từ lên phổ hấp thụ của vật liệu cũng được khảo sát. Kết quả mô phỏng được minh họa trên Hình 4.18. Có thể nhận thấy rằng, khi góc phân cực sóng điện từ thay đổi từ 0° đến 80° , phổ hấp thụ của vật liệu hầu như không thay đổi. Điều này được giải thích là do cấu trúc cộng hưởng của vật liệu được thiết kế có tính đối xứng cao, dẫn đến phổ hấp thụ của vật liệu không phụ thuộc vào sự phân cực của sóng điện từ.

4.2.3. Cộng hưởng từ bậc hai khi sóng điện từ tới bề mặt cấu trúc theo hướng xiên góc

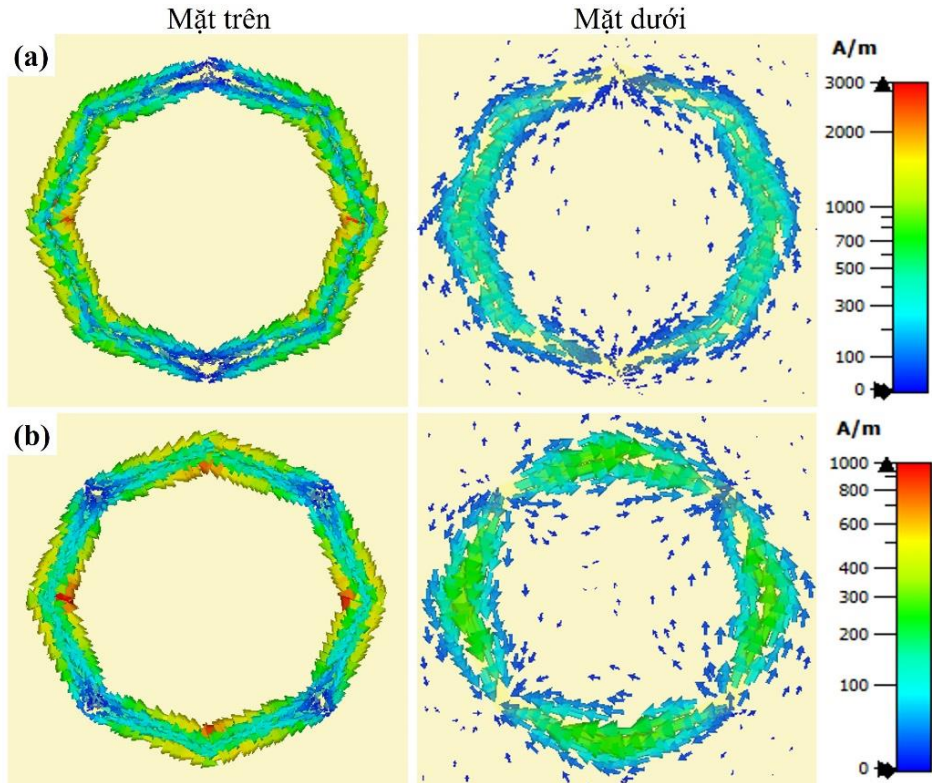
Để đánh giá đặc trưng hấp thụ của vật liệu hoạt động dưới góc tới khác nhau của sóng điện từ, ảnh hưởng của góc tới lên phổ hấp thụ của vật liệu đã được mô phỏng. Với trường hợp sóng phân cực TE, kết quả được minh họa trên Hình 4.19(b). Kết quả cho thấy rằng khi góc tới tăng từ 0° đến 60° , đỉnh hấp thụ cơ bản ở 3,7 GHz vẫn duy trì cường độ trên 80%. Đặc biệt, có thể quan sát thấy một đỉnh hấp thụ mới được tạo ra ở 7,5 GHz. Đỉnh hấp thụ mới xuất hiện này đạt được độ hấp thụ cao nhất là 62,6% khi góc tới là 50° .



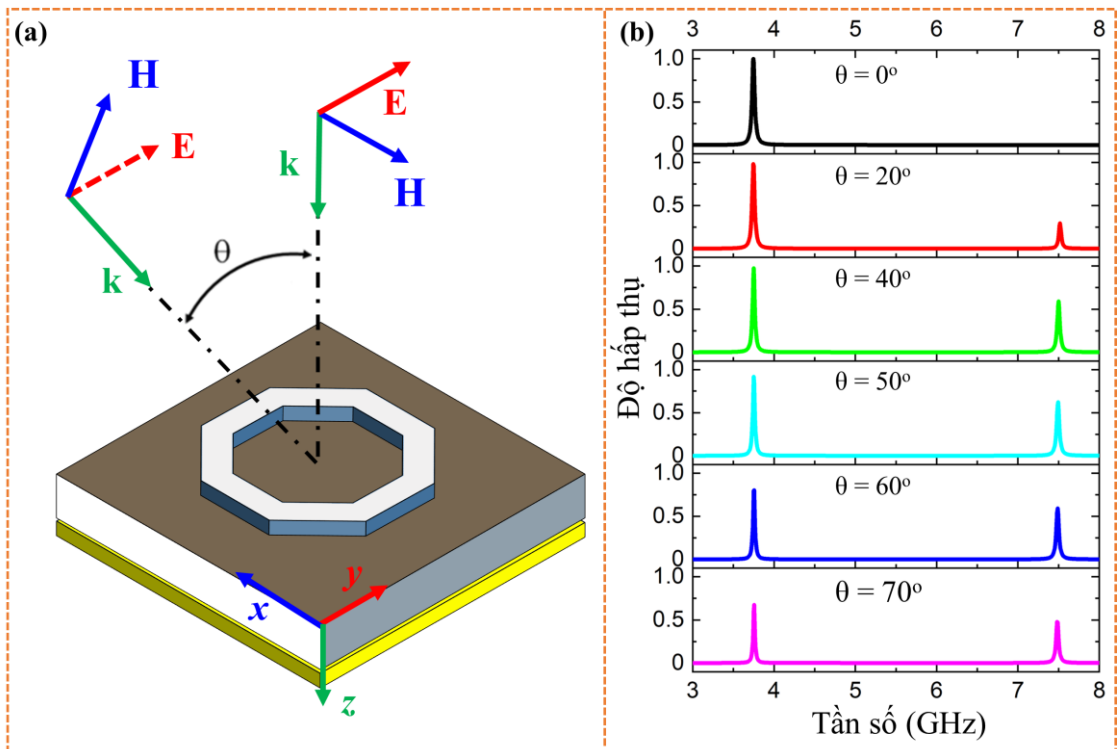
Hình 4.19. (a) Minh họa góc tới θ , (b) ảnh hưởng của góc tới lên phổ hấp thụ của vật liệu dưới sóng điện từ phân cực TE.

Nguồn gốc của đỉnh hấp thụ mới này được làm rõ dựa trên phân bố dòng điện bề mặt tại 7,5 GHz (Hình 4.20). Có thể thấy, trong cả hai trường hợp này, dòng điện trên bề mặt hai lớp kim loại được chia thành hai vùng, trong đó dòng điện trong các vùng lân cận là ngược chiều nhau. Hơn nữa, trong mỗi vùng, dòng điện tại mặt trên và mặt dưới có chiều ngược nhau. Từ đó, có thể kết luận rằng đỉnh hấp thụ mới ở tần

số cao hơn bắt nguồn từ cộng hưởng từ bậc hai [118,125], tương tự như trường hợp vòng cộng hưởng hình tròn đã được bàn luận ở phần trên.



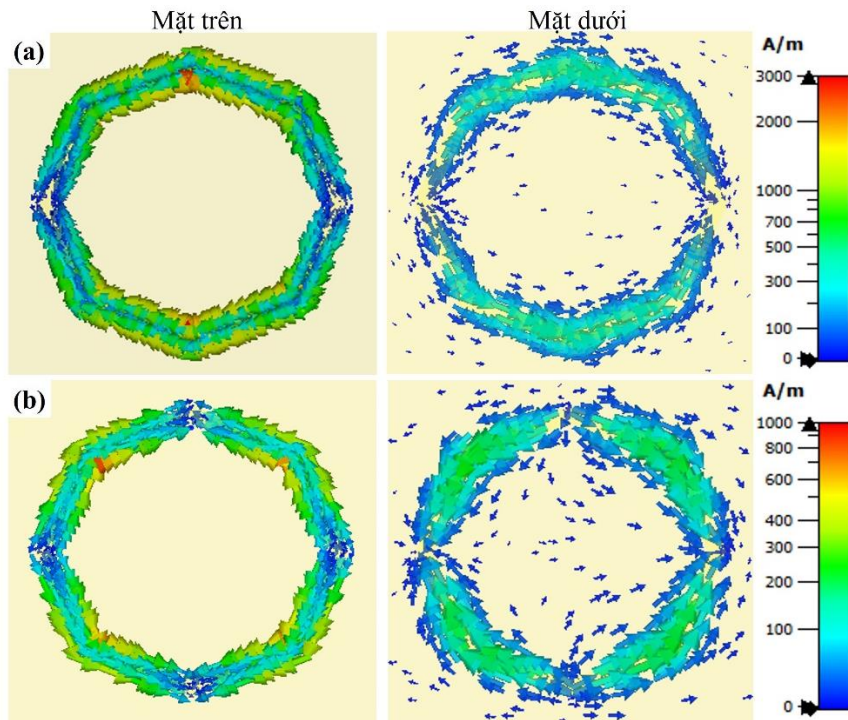
Hình 4.20. Phân bố dòng điện bề mặt tại tần số (a) 3,7 GHz và (b) 7,5 GHz dưới sóng phân cực TE.



Hình 4.21. (a) Minh họa góc tới θ và (b) ảnh hưởng của góc tới lên phổ hấp thụ của vật liệu dưới sóng điện từ phân cực TM.

Với sóng điện từ phân cực TM, ảnh hưởng của góc tới của sóng điện từ lên phổ hấp thụ của vật liệu được khảo sát và trình bày trên Hình 4.21. Kết quả cho thấy khi sóng điện từ tới bề mặt vật liệu theo phương xiên góc, đỉnh hấp thụ cơ bản tại 3,7 GHz có cường độ và vị trí gần như không thay đổi khi góc tới tăng lên 70° . Bên cạnh đó, một đỉnh hấp thụ mới xuất hiện ở tần số 7,5 GHz, tương tự như trường hợp sóng điện từ phân cực TE. Khi tăng góc tới lên 70° , đỉnh mới này có độ hấp thụ tăng lên và đạt tới 99%.

Nguồn gốc của đỉnh hấp thụ mới này được làm rõ dựa trên phân bố dòng điện bề mặt tại 7,5 GHz (Hình 4.22). Có thể thấy, trong trường hợp này, dòng điện trên bề mặt các lớp kim loại cũng được chia thành hai vùng, trong đó dòng điện trong các vùng lân cận là ngược chiều nhau. Hơn nữa, có hai vòng dòng điện đối song song giữa các lớp kim loại trên và dưới. Do đó, quan sát cho thấy rằng đỉnh mới ở tần số cao hơn bắt nguồn từ cộng hưởng từ bậc hai [118,125].

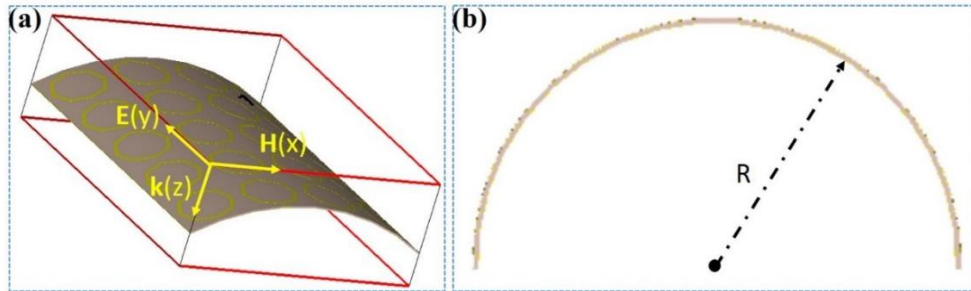


Hình 4.22. Phân bố dòng điện bề mặt tại tần số (a) 3,7 GHz và (b) 7,5 GHz dưới sóng phân cực TM.

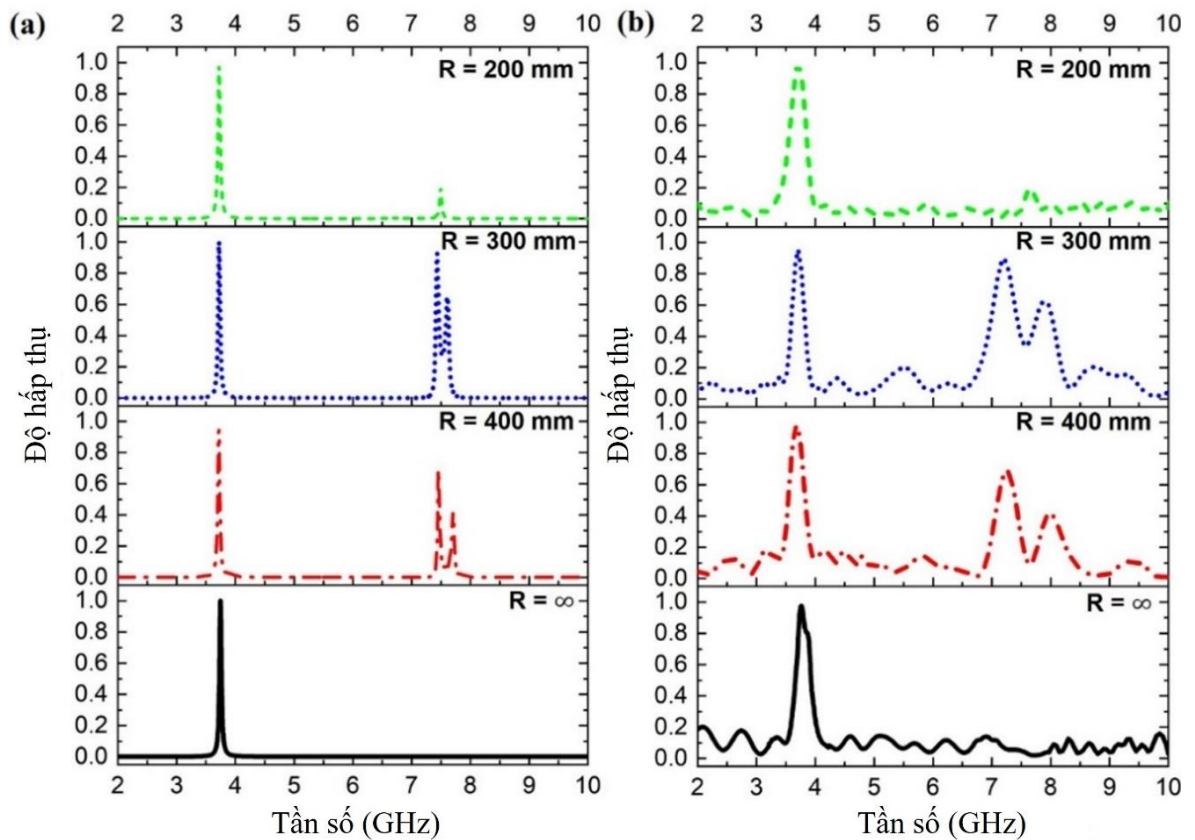
4.2.4. Cộng hưởng từ bậc hai khi cấu trúc bị uốn cong

H-MPA đề xuất được thiết kế với lớp điện môi Polyimide có khả năng uốn cong rất tốt, nên vật liệu sau khi chế tạo được dễ dàng uốn cong và che phủ trên các bề mặt hình trụ có bán kính khác nhau. Để đánh giá khả năng điều khiển đỉnh hấp thụ bậc cao của H-MPA được đề xuất, độ hấp thụ của H-MPA được mô phỏng và đo đạc cho các trường hợp uốn cong theo các bán kính khác nhau. Các giá trị của bán kính uốn được khảo sát là 400 mm, 300 mm và 200 mm. Để mô phỏng đặc trưng hấp thụ của vật liệu ở trạng thái uốn cong, H-MPA có kích thước $100\text{mm} \times 100\text{mm}$, tức là

bao gồm 5 ô cơ sở cho mỗi chiều kích thước được xây dựng, và sóng phẳng được thiết lập lan truyền dọc theo hướng của trục z . Ở trạng thái uốn cong, chúng tôi chỉ tập trung nghiên cứu hiệu suất hấp thụ của H-MPA dưới sóng phân cực TE, trong đó điện trường và từ trường lần lượt được định hướng dọc theo hướng y và x . Hình 4.23 mô tả cấu hình uốn và xác định bán kính uốn R .



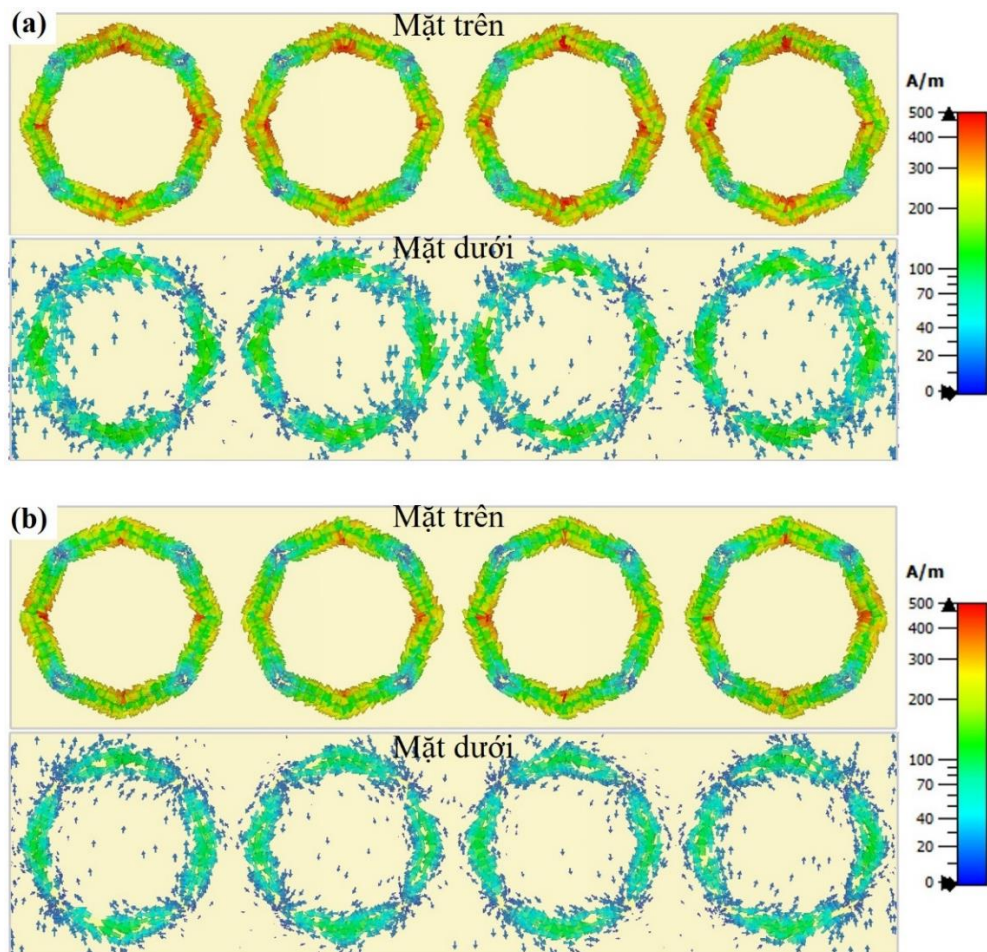
Hình 4.23. (a) Cấu hình uốn cong và (b) định nghĩa bán kính uốn R của H-MPA



Hình 4.24. Phổ hấp thụ (a) mô phỏng và (b) thực nghiệm của H-MPA với bán kính uốn giảm dần từ $R = \infty$ (trạng thái phẳng) đến $R = 200$ mm.

Kết quả mô phỏng và đo đạc phổ hấp thụ của H-MPA với bán kính uốn khác nhau được trình bày trong Hình 4.24. Có thể thấy rằng khi H-MPA được đề xuất thay đổi từ cấu hình phẳng sang cấu hình uốn cong với các bán kính uốn khác nhau, định cơ bản gần như không thay đổi cho cả mô phỏng (độ hấp thụ 99,9 % tại 3,7 GHz) và thực nghiệm (độ hấp thụ 98% tại 3,7 GHz). Tuy nhiên, có hai đỉnh hấp thụ mới xuất

hiện ở tần số cao hơn. Cụ thể, khi R giảm xuống 400 mm, có hai đỉnh hấp thụ xuất hiện trong phổ mô phỏng ở tần số 7,43 GHz và 7,6 GHz, độ hấp thụ lần lượt là 69% và 41%. Trong phổ thực nghiệm quan sát thấy hai đỉnh hấp thụ tại tần số 7,26 GHz với độ hấp thụ 69% và ở tần số 8,0 GHz, độ hấp thụ 40,8%. Tiếp tục giảm thêm R xuống 300 mm, hai đỉnh hấp thụ được quan sát thấy ở 7,43 GHz (độ hấp thụ 92,6%) và 7,6 GHz (độ hấp thụ 65%) trong mô phỏng và ở 7,2 GHz (độ hấp thụ 91%) và 7,9 GHz (độ hấp thụ 64,1%) trong thực nghiệm. Nếu tiếp tục giảm R xuống tới 200 mm, hai đỉnh hấp thụ mới này bị hợp nhất thành một đỉnh duy nhất có vị trí 7,5 GHz (mô phỏng) và ở 7,6 GHz (thực nghiệm), dẫn đến độ hấp thụ bị giảm xuống chỉ còn khoảng 20%. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm có sự phù hợp về xu hướng và số lượng các đỉnh hấp thụ. Tuy nhiên, có sự sai lệch nhỏ về vị trí đỉnh và độ hấp thụ giữa thực nghiệm và mô phỏng. Điều này có thể được giải thích do có sự xuất hiện các sai hỏng khi chế tạo mẫu bằng phương pháp in lưới, kích thước và hình dạng của cấu trúc cộng hưởng không đồng đều và hoàn hảo như quá trình mô phỏng. Ngoài ra, có thể có sự sai khác giữa thông số của tấm điện môi của nhà sản xuất với các thông số trong phần mềm mô phỏng CST.



Hình 4.25. Phân bố dòng điện bề mặt khi $R = 300$ mm tại (a) 7,43 GHz và (b) 7,6 GHz.

Phân bố dòng điện bề mặt tại các tần số 7,43 và 7,6 GHz trong trường hợp bán kính uốn $R = 300$ mm được trình bày trên Hình 4.25. Có thể quan sát thấy rằng, tại cả hai tần số trên, dòng điện cảm ứng được sinh ra trên tất cả các ô cơ sở. Tuy nhiên, chiều của dòng điện ở 7,43 và 7,6 GHz ngược pha với nhau. Ngoài ra, trên mỗi ô cơ sở, các dòng điện bề mặt được tách thành hai vùng, trong mỗi vùng đó chúng có chiều ngược nhau. Hiện tượng này chỉ ra rằng các đỉnh mới ở tần số cao hơn bắt nguồn từ cộng hưởng từ bậc hai, gây ra bởi trạng thái uốn cong của H-MPA làm cho điện từ trường phân bố không đồng nhất trên bề mặt của H-MPA [118].

4.3. Kết luận chương 4

Trong chương này, chúng tôi đã làm rõ cơ chế, thiết kế và chế tạo thành công hai mẫu vật liệu H-MPA đàn hồi, hấp thụ đa đỉnh có hiệu ứng cộng hưởng từ bậc hai, hoạt động trong băng tần C-X:

1) H-MPA có cấu trúc cộng hưởng dạng vòng tròn: ở trạng thái phẳng và sóng điện từ tới vuông góc, phổ hấp thụ chỉ có một đỉnh duy nhất tại 4,3 GHz với cường độ 96%. Khi sóng tới xiên góc hoặc uốn cong có sự xuất hiện của đỉnh hấp thụ bậc hai xuất hiện tại tần số xung quanh 8,6 GHz.

2) H-MPA đàn hồi có cấu trúc cộng hưởng dạng vòng gấp khúc: tương tự như trường hợp vòng cộng hưởng tròn, khi phá vỡ tính đối xứng đối với sóng điện từ của cấu trúc bằng cách thay đổi góc tới hoặc uốn cong cấu trúc, cộng hưởng từ bậc hai đã được kích thích, tạo ra đỉnh hấp thụ bậc cao. Ở trạng thái phẳng, sóng tới vuông góc, vật liệu có một đỉnh hấp thụ tại 3,7 GHz (99 %). Khi sóng tới xiên góc hoặc vật liệu bị uốn cong, có thêm một đỉnh hấp thụ bậc hai hình thành tại tần số xung quanh 7,5 GHz.

Cộng hưởng từ bậc hai trong các cấu trúc H-MPA đề xuất được hình thành do tác động uốn cong đã làm cho điện trường và từ trường phân bố không đồng nhất trên bề mặt H-MPA.

KẾT LUẬN

Luận án “*Nghiên cứu đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa cộng hưởng bậc cao có tính năng đàn hồi ở vùng tần số GHz*” đã được thực hiện tại Viện Khoa học vật liệu và Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Những kết quả của luận án đã được công bố trên các tạp chí bao gồm: 02 bài trên tạp chí Quốc tế thuộc danh mục ISI, 02 bài trên tạp chí Quốc gia, 01 bài báo đăng trong kỷ yếu hội thảo chuyên ngành.

Luận án đã hoàn thành các mục tiêu đặt ra và thu được một số kết quả chính như sau:

1. Đã làm rõ cơ chế hoạt động của các H-MPA hấp thụ đa đỉnh dựa trên cộng hưởng từ bậc cao và H-MPA đa đỉnh, có tính năng đàn hồi.

2. Đã thiết kế và chế tạo thành công một số mẫu vật liệu H-MPA đa đỉnh sử dụng hiệu ứng cộng hưởng từ bậc cao:

+ Vật liệu H-MPA có cấu trúc tích hợp tụ điện lên trên bề mặt mẫu: có hai đỉnh hấp thụ cơ bản trong băng tần VHF (0,03 – 0,3 GHz) và hai đỉnh hấp thụ bậc năm trong băng tần S (2,0 - 4,0 GHz) với độ hấp thụ trên 90%.

+ Vật liệu H-MPA có cấu trúc cộng hưởng dạng gấp khúc, hấp thụ đa đỉnh có tính năng đàn hồi: đỉnh cộng hưởng từ cơ bản trong băng tần UHF (0,3 – 1,0 GHz) và đỉnh cộng hưởng từ bậc ba trong băng tần L (1,0 - 2,0 GHz), với độ hấp thụ đạt tới 99%. Tính chất hấp thụ của đỉnh hấp thụ bậc cao được duy trì tốt trong cả hai trường hợp: vật liệu ở cấu hình phẳng và uốn cong.

+ Vật liệu H-MPA đàn hồi hoạt động trong băng tần C (4,0 – 8,0 GHz) và X (8,0 – 12,0 GHz) có hiệu ứng cộng hưởng từ bậc chẵn: bậc hai khi cấu trúc ở trạng thái uốn cong.

3. Đã mở rộng nghiên cứu cấu trúc H-MPA hoạt động trên vùng tần số THz để làm rõ sự phụ thuộc phổ hấp thụ vào trạng thái đàn hồi. Ở trạng thái phẳng, độ hấp thụ đạt trên 96% ở 34,9 THz (cộng hưởng từ cơ bản) và 97,2 THz (cộng hưởng từ bậc ba). Ở trạng thái đàn hồi khác nhau (bán kính uốn cong thay đổi từ 50 μm đến 5 μm), H-MPA này duy trì tốt đỉnh hấp thụ cơ bản với độ hấp thụ trên 90%. Đặc biệt có đỉnh cộng hưởng bậc hai mới ở tần số 54,5 THz với độ hấp thụ khoảng 80% khi bán kính uốn giảm xuống 5 μm .

KIẾN NGHỊ

1. Tiếp tục cải tiến các cấu trúc cộng hưởng nhằm thu được vật liệu H-MPA đa đỉnh/dải rộng sử dụng đồng thời cộng hưởng bậc chẵn và lẻ, ổn định dưới tác động uốn cong.
2. Nghiên cứu tích hợp các vật liệu điện môi tiên tiến khác có tính đàn hồi cao vào trong cấu trúc H-MPA.
3. Nghiên cứu các định hướng ứng dụng của H-MPA trong thực tiễn như: Bộ lọc tần số và cảm biến.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

* Tạp chí thuộc danh mục SCIE

1. **Duong Thi Ha**, Vu Thi Hong Hanh, Bui Son Tung, Nguyen Thi Hien, Dinh Ngoc Dung, Bui Xuan Khuyen, Liang Yao Chen, YoungPak Lee and Vu Dinh Lam, “*Ultrathin hybrid absorber based on high-order metamaterial*”, Journal of Optics **23**, 095101 (2021).

2. **Duong Thi Ha**, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Thanh Son Pham, Nguyen Thanh Tung, Nguyen Hoang Tung, Nguyen Thi Hoa, Vu Dinh Lam, Haiyu Zheng, Liangyao Chen and YoungPak Lee, “*Dual-Band, Polarization-Insensitive, Ultrathin and Flexible Metamaterial Absorber Based on High-Order Magnetic Resonance*”, Photonics **8**, 574 (2021).

* Tạp chí Quốc gia

3. **Duong Thi Ha**, Vankham Boudthaly, Soulima Khamsadeth, Vu Thi Hong Hanh, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Vu Dinh Lam, “*Mechanically tunable dual-band metamaterial absorber at ultra-high frequency*”, Tạp chí nghiên cứu KH&CN quân sự **84**, 93-100 (2022)

4. **Duong Thi Ha**, Bui Xuan Khuyen, Bui Son Tung, Pham Thanh Son, Vu Thi Hong Hanh, Trinh Thi Giang, Nguyen Thanh Tung and Vu Dinh Lam, “*Mechanically-tunable metamaterial for multi-band absorption*”, TNU Journal of Science and Technology **228**(14): 142 – 151 (2023).

* Kỹ yếu Hội nghị Quốc gia

5. **Dương Thị Hà**, Soulima KHAMSADETH, Vũ Thị Hồng Hạnh, Nguyễn Vân Ngọc, Bùi Sơn Tùng, Bùi Xuân Khuyển, Vũ Đình Lãm, “*Tối ưu hóa sự phát xạ nhiệt dải hẹp dựa trên vật liệu biến hóa có tính năng đàn hồi*”, Hội nghị Vật lý chất rắn và Khoa học vật liệu toàn quốc lần thứ 13 (SPMS 2023), 5-7/11, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam, Quyển 2, 690-697 (2023). ISBN 978-604-471-703-6.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Zheludev N. I., 2010, The Road Ahead for Metamaterials, *Science*, 328(5978) pp. 582-583.
2. Yannopapas V., Paspalakis E., Vitanov N. V., 2009, Electromagnetically induced transparency and slow light in an array of metallic nanoparticles, *Physical Review B*, 80(3), pp. 035104.
3. Shelby R. A., Smith D. R., Schultz S., 2001, Experimental Verification of a Negative Index of Refraction, *Science*, 292(5514), pp. 77–9.
4. Ebbesen T. W., Lezec H.J., Ghaemi H.F., Thio T., Wolff P.A., 1998, Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays, *Nature*, 391(6668), pp. 667–9.
5. Seddon N., Bearpark T., 2003, Observation of the Inverse Doppler Effect, *Science*, 302(5650), pp. 1537–40.
6. Pendry J. B., 2000, Negative Refraction Makes a Perfect Lens, *Physical Review Letters*, 85(18), pp. 3966–9.
7. Haxha S., AbdelMalek F., Ouerghi F., Charlton M. D. B., Aggoun A., Fang X., 2018, Metamaterial Superlenses Operating at Visible Wavelength for Imaging Applications, *Scientific Reports*, 8(1), pp. 16119.
8. Ma C., Liu Z., 2010, A super resolution metalens with phase compensation mechanism, *Applied Physics Letters*, 96(18), pp. 183103.
9. Landy N. I., Sajuyigbe S., Mock J. J., Smith D. R., Padilla W. J., 2008, Perfect Metamaterial Absorber, *Physical Review Letters*, 100(20), pp. 207402.
10. Brückner J. B., Le Rouzo J., Escoubas L., Berginc G., Calvo-Perez O., Vukadinovic N., Flory F., 2013, Metamaterial filters at optical-infrared frequencies, *Optics Express*, 21(14), pp. 16992.
11. Liang J., Chen Y., Zhou Z., Chen S., 2022, Multiband-switchability and high-absorptivity of a metamaterial perfect absorber based on a plasmonic resonant structure in the near-infrared region, *RSC Advances*, 12(48), pp. 30871–8.
12. Yang W., Lin Y. S., 2020, Tunable metamaterial filter for optical communication in the terahertz frequency range, *Optics Express*, 28(12), pp. 17620.

13. Chi D. T., Khuyen B. X., Tung B. S., Lam V. D., Chen L.Y., Lee Y, 2020, Progresses in metamaterials for advanced low-frequency perfect absorbers: a brief review, *Journal Electromagnetics Waves Applications*, 34(17), pp. 2251–65.
14. Chen Z., Guo B., Yang Y., Cheng C., 2014, Metamaterials-based enhanced energy harvesting: A review, *Physica B Condensed Matter*, 438, pp. 1–8.
15. Zuo W., Yang Y., He X., Zhan D., Zhang Q., 2017, A Miniaturized Metamaterial Absorber for Ultrahigh-Frequency RFID System, *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 16, pp. 329–32.
16. Koohestani M., Ghaneizadeh A., 2021, An ultra-thin double-functional metasurface patch antenna for UHF RFID applications, *Scientific Reports*, 11(1), pp. 857.
17. Zuo W., Yang Y., He X., Mao C., Liu T., 2017, An Ultrawideband Miniaturized Metamaterial Absorber in the Ultrahigh-Frequency Range, *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 16, pp. 928–31.
18. Ghosh S., Bhattacharyya S., Chaurasiya D., Srivastava K. V., 2015, An Ultrawideband Ultrathin Metamaterial Absorber Based on Circular Split Rings, *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 14, pp. 1172–5.
19. Namai A., Sakurai S., Nakajima M., Suemoto T., Matsumoto K., Goto M., 2009, Synthesis of an Electromagnetic Wave Absorber for High-Speed Wireless Communication, *Journal of the American Chemical Society*, 131(3), pp. 1170–3.
20. Xu X., Xu R., Lin Y.-S., 2022, A voltage-controllable VO₂ based metamaterial perfect absorber for CO₂ gas sensing application, *Nanoscale*, 14(7), pp. 2722–2728.
21. Monfared Y. E. and Qasymeh M., 2021, Graphene-assisted infrared plasmonic metamaterial absorber for gas detection, *Results Physics*, 23, p. 103986.
22. Zhou Y., Qin Z., Liang Z., Meng D., Xu H., Smith D. R., Liu Y., 2021, Ultra-broadband metamaterial absorbers from long to very long infrared regime, *Light: Science & Applications*, 10(1), 138.
23. Li Z., Stan L., Czaplewski D. A., Yang X., Gao J., 2018, Wavelength-selective mid-infrared metamaterial absorbers with multiple tungsten cross resonators, *Optics express*, 26(5), 5616-5631.
24. Liang S., Xu F., Yang H., Cheng S., Yang W., Yi Z., Song Q., Wu P., Chen J., Tang, C., 2023, Ultra long infrared metamaterial absorber with high absorption

- and broad band based on nano cross surrounding, *Optics & Laser Technology*, 158, 108789.
25. Nguyen H. T., Bui T. S., Yan S., Vandenbosch G. A. E., Lievens P., Vu L. D., 2016, Broadband negative refractive index obtained by plasmonic hybridization in metamaterials, *Applied Physics Letters*, 109(22), pp. 221902.
 26. Hai L. D., Qui V. D., Tung N. H., Huynh T. V., Dung N. D., Binh N. T., 2018, Conductive polymer for ultra-broadband, wide-angle, and polarization-insensitive metamaterial perfect absorber, *Optics Express*, 26(25), pp. 33253.
 27. Pham T. S., Nguyen T. D., Tung B. S., Khuyen B. X., Hoang T. T., Ngo Q. M., 2021, Optimal frequency for magnetic resonant wireless power transfer in conducting medium, *Scientific Reports*, 11(1), pp. 18690.
 28. 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., 2018, Ultra-subwavelength thickness for dual/triple-band metamaterial absorber at very low frequency, *Scientific Reports*, 8(1), pp. 11632.
 29. Van Long L., Dung D. N., Son P. T., Tung N. T., Hanh V. T. H., Ha D. T., Chi D. T., Tung B. S., Khuyen B. X., Lam V. D., 2023, Robust Reversion of Dual-band Polarization Conversion and Absorption Based on Flexible Metamaterial, *Journal of the Physical Society of Japan*, 92(2), pp. 024801.
 30. 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.
 31. 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.
 32. 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.
 33. 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.
 34. Đặng Hồng Lưu, 2018, *Nghiên cứu vật liệu biến hóa (metamaterials) hấp thụ sóng điện từ ở vùng tần số THz*, Học viện Khoa học và Công nghệ.

35. 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.
36. Wang B. X., He Y., Lou P., Xu N., Wang X., Wang Y., 2020, Multiple-Band Terahertz Metamaterial Absorber Using Multiple Separated Sections of Metallic Rectangular Patch, *Frontiers in Physics*, 8, pp. 308.
37. Park J. W., Van Tuong P., Rhee J. Y., Kim K. W., Jang W. H., Choi E. H., Chen L. Y., Lee Y. P., 2013, Multi-band metamaterial absorber based on the arrangement of donut-type resonators, *Optics Express*, 21(8), pp. 9691.
38. Bağmancı M., Karaaslan M., Altıntaş O., Karadağ F., Tetik E., Bakır M., 2018, Wideband metamaterial absorber based on CRRs with lumped elements for microwave energy harvesting, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 52(1), pp. 45–59.
39. Nguyen T. Q. H., Nguyen T. K. T., Cao T. N., Nguyen H., Bach L. G., 2020, Numerical study of a broadband metamaterial absorber using a single split circle ring and lumped resistors for X-band applications, *AIP Advances*, 10(3), pp. 035326.
40. Cheng Y., Cheng Z., Mao X., Gong R., 2017, Ultra-Thin Multi-Band Polarization-Insensitive Microwave Metamaterial Absorber Based on Multiple-Order Responses Using a Single Resonator Structure, *Materials*, 10(11), pp. 1241.
41. Yoo Y. J., Kim Y. J., Van Tuong P., Rhee J. Y., Kim K. W., Jang W. H., Cheong H., Lee Y., 2013, Polarization-independent dual-band perfect absorber utilizing multiple magnetic resonances, *Optics Express*, 21(26), pp. 32484.
42. Jung S., Kim Y. J., Yoo Y. J., Hwang J. S., Khuyen B. X., Chen L. Y., Chen L. Y., Lee Y., 2020, High-order resonance in a multiband metamaterial absorber, *Journal of Electronic Materials*, 49(3), pp. 1677-1688.
43. Assimonis S. D., Fusco V., 2019, Polarization Insensitive, Wide-Angle, Ultra-wideband, Flexible, Resistively Loaded, Electromagnetic Metamaterial Absorber using Conventional Inkjet-Printing Technology, *Scientific Reports*, 9(1), pp. 12334.
44. Chen H., Yang X., Wu S., Zhang D., Xiao H., Huang K., Zhu Z., Yuan J., 2018, Flexible and conformable broadband metamaterial absorber with wide-angle

- and polarization stability for radar application, *Materials Research Express*, 5(1), pp. 015804.
45. Kang J., Qu Z., Duan J., Jing H., Hao J., Song C., Wang J., Zhang B., 2023, Multispectral flexible ultrawideband metamaterial absorbers for radar stealth and visible light transparency, *Optical Materials*, 135, 113351
 46. Gao B., Yuen M. M. F., Ye T. T., 2017, Flexible frequency selective metamaterials for microwave applications, *Scientific Reports*, 7(1), pp. 45108.
 47. Huang Q., Zhong L., Dong J., Xu O., Zheng Z., Huang T., 2022, All-optical light manipulation based on graphene-embedded side-polished fiber, *Optics Letters*, 47(6), pp. 1478.
 48. De Tommasi E., Esposito E., Romano S., Crescitelli A., Di Meo V., Mocella V., 2021, Frontiers of light manipulation in natural, metallic, and dielectric nanostructures., *La Rivista del Nuovo Cimento*, 44(1):1–68.
 49. Chen H., Chen M., 2011, Flipping photons backward: reversed Cherenkov radiation, *Materials Today*, 14(1–2), pp. 34–41.
 50. Duan Z., Tang X., Wang Z., Zhang Y., Chen X., Chen M., Gong Y., 2017, Observation of the reversed Cherenkov radiation, *Nature Communications*, 8(1), pp. 14901.
 51. Veselago V. G., 1968, The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ , *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), pp. 509–14.
 52. Pendry J. B., Holden A. J., Stewart W. J., Youngs I., 1996, Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures, *Physical review letters*, 76(25), 4773.
 53. Pendry J. B., Holden A. J., Robbins D. J., Stewart W. J. 1999, Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 47(11), 2075-2084.
 54. Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., Schultz S, 2000, Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, *Physical review letters*, 84(18), pp. 4184-7.
 55. Fang N., Lee H., Sun C., Zhang X., 2005, Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens, *Science*, 308(5721), pp. 534-537.
 56. Manzoor Z., 2021, Aperiodic hyperbolic metamaterial superlens with random distribution, *Optik*, 242, pp. 167290.

57. Ferrari J. A. and Perciante C. D., 2009, Superlenses, metamaterials, and negative refraction, *Journal of the Optical Society of America*, 26(1), pp. 78.
58. Islam M. R., Islam M. T., Bais B., Almalki S. H., Alsaif H., Islam M. S., 2022, Metamaterial sensor based on rectangular enclosed adjacent triple circle split ring resonator with good quality factor for microwave sensing application, *Scientific Reports*, 12(1), pp. 6792.
59. Liang J., Ding F., Fu Y., Huang X., Jin, J., Yang H., 2023, Metamaterial microwave sensor with ultrahigh Q-factor based on narrow-band absorption, *Sensors and Actuators A: Physical*, 364, pp. 114779.
60. Maleki A., Singh A., Jaber A., Cui W., Xin Y., Sullivan B. T., Boyd R. W., Ménard J. M., 2023, Metamaterial-based octave-wide terahertz bandpass filters, *Photonics Research*, 11(4), pp. 526-532.
61. Anwar S., Khan Q., Ali G., Khan M., Maqbool M., 2023, Triple-band terahertz metamaterial absorber with enhanced sensing capabilities, *European Physical Journal D*, 77(4), pp. 69.
62. Pham T. L., Dinh H. T., Le D. H., Bui X. K., Bui S. T., Dang H. L., Phan A. D., Le D. T, Vu D. L., 2020, Dual-band isotropic metamaterial absorber based on near-field interaction in the Ku band, *Current Applied Physics*, 20(2), pp. 331-336.
63. Wang Y., Zhu D., Cui Z., Hou L., Lin L., Qu F., Liu X., Nie P., 2019, All-dielectric terahertz plasmonic metamaterial absorbers and high-sensitivity sensing, *ACS omega*, 4(20), pp. 18645-18652.
64. Pan M., Su Z., Yu Z., Wu P., Jile H., Yi Z., Chen Z., 2020, A narrowband perfect absorber with high Q-factor and its application in sensing in the visible region, *Results in Physics*, 19, pp. 103415.
65. Ullah N., Islam M. S., Hoque A., Yong W. H., Soliman M. S., Albadran S., Islam M. T., 2023, A coMPAct complementary split ring resonator (CSRR) based perfect metamaterial absorber for energy harvesting applications, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 45, pp. 101473.
66. Pan W., Yu X., Zhang J., Zeng W., 2016, A novel design of broadband terahertz metamaterial absorber based on nested circle rings, *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(21), pp. 2335-2338.

67. Vu D. L., Pham V. T., Do T. V., Nguyen T. T., Vu T. T. T., Le V. H., Lee Y. P., 2010, The electromagnetic response of different metamaterial structures, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 1(4), pp. 045016.
68. Viet D. T., Hieu N., Lam V. D., Tung N. T., 2015, Isotropic metamaterial absorber using cut-wire-pair structures, *Applied Physics Express*, 8(3), pp. 032001.
69. Fan K., Suen J. Y., Liu X., Padilla W. J., 2017, All-dielectric metasurface absorbers for uncooled terahertz imaging, *Optica*, 4(6), pp. 601.
70. Xie J., Quader S., Xiao F., He C., Liang X., Geng J., Jin R., Zhu W., Rukhlenko I. D., 2019, Truly All-Dielectric Ultrabroadband Metamaterial Absorber: Water-Based and Ground-Free, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(3), pp. 536–40.
71. Mostufa S., Yari P., Rezaei B., Xu K., Sun J., Shi Z., Wu K., 2023, Metamaterial as perfect absorber for high sensitivity refractive index based biosensing applications at infrared frequencies, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 56(44), pp. 445104.
72. Sharma A., Singh H., Gupta A., 2023, Design and development of high-performance metamaterial absorber for moisture-sensing application, *Applied Physics A*, 129(5), pp. 377
73. Bakır M., Karaaslan M., Unal E., Akgol O., Sabah C., 2017, Microwave metamaterial absorber for sensing applications, *Opto-Electronics Review*, 25(4), pp. 318-325.
74. Zhu H., Zhang Y., Ye L., Dang Z., Wei H., Zhang B., Fan C., Xu R., Yan B., 2023, Dual-Band Terahertz Metamaterial Absorber and Its Refractive-Index-Sensing Application for Material Films, *ACS Applied Optical Materials*, 1(7):1281–8.
75. Xi Y., Jiang W., Hong T., Wei K., Gong S., 2021, Wideband and wide-angle radar cross section reduction using a hybrid mechanism metasurface, *Optics Express*, 29(14), pp. 22427-22441
76. Ramachandran T., Faruque M. R. I., Islam M. T., Khandaker M. U., Al-Mugren K. S., 2022, Development of diverse coding metamaterial structure for radar cross section reduction applications, *Scientific Reports*, 12(1), pp. 10958

77. Li W., Zhang Y., Wu T., Cao J., Chen Z., Guan J., 2019, Broadband radar cross section reduction by in-plane integration of scattering metasurfaces and magnetic absorbing materials, *Results in Physics*, 12, pp. 1964-1970.
78. Chen B., Sun S. N., Zhao Y. T., Wu B., 2022, Ultra-miniaturized Narrow-band Metamaterial Absorber for L-band, *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, pp. 1029-1032.
79. Liao Y. L., Zhao Y., 2020, Ultra-narrowband dielectric metamaterial absorber for sensing based on cavity-coupled phase resonance, *Results in Physics*, 17, pp. 103072
80. Tran C. M., Van Pham H., Nguyen H. T., Nguyen T. T., Vu L. D., Do T. H., 2019, Creating Multiband and Broadband Metamaterial Absorber by Multiporous Square Layer Structure, *Plasmonics*, 14(6), pp.1587–92.
81. Shen G., Zhang M., Ji Y., Huang W., Yu H., Shi J., 2018, Broadband terahertz metamaterial absorber based on simple multi-ring structures, *Aip Advances*, 8(7), pp. 075206.
82. Dewangan L., Patinavalasa M. S., Acharjee J., Solunke Y., Ghosh S., Mishra N. K., 2023, Broadband metamaterial absorber for stealth applications at K-band, *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 170, pp. 154828.
83. Cheng D., Ma X., Liu Y., Qiu Y., Zhou Y., Deng L., 2024, Challenges and solutions in designing broadband metamaterial absorbers based on coplanar arrangement of resonators, *Optics & Laser Technology*, 169, pp. 110134.
84. Long C., Yin S., Wang W., Li W., Zhu J., Guan J., 2016, Broadening the absorption bandwidth of metamaterial absorbers by transverse magnetic harmonics of 210 mode, *Scientific reports*, 6(1), pp. 21431.
85. Chaudhuri K., Alhabeab M., Wang Z., Shalaev V. M., Gogotsi Y., Boltasseva A., 2018, Highly broadband absorber using plasmonic titanium carbide (MXene)., *Acs Photonics*, 5(3), 1pp. 115-1122.
86. Gao H., Peng W., Liang Y., Chu S., Yu L., Liu Z., Zhang Y., 2020, Plasmonic broadband perfect absorber for visible light solar cells application, *Plasmonics*, 15, pp. 573-580.
87. Zhang H., Guan C., Luo J., Yuan Y., Song N., Zhang Y., Fang J., Liu H., 2019, Facile film-nanooctahedron assembly route to plasmonic metamaterial absorbers

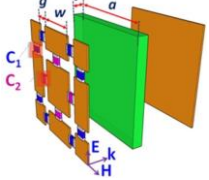
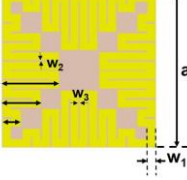
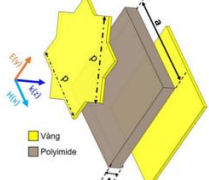
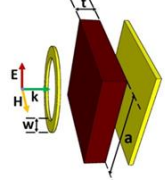
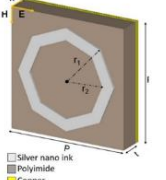
- at visible frequencies, *ACS applied materials & interfaces*, 11(22), pp. 20241-20248.
88. Perdana N., Drewes J., Pohl F., Vahl A., Strunskus T., Elbahri M., Rockstuhl C., Faupel F., 2022, A thin-film broadband perfect absorber based on plasmonic copper nanoparticles, *Micro and Nano Engineering*, 16, pp. 100154.
 89. Balanis C. A., 2012, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons.
 90. Tuong P. V., Park J. W., Lam V. D., Kim K. W., Cheong H., Jang W. H., Lee Y. P., 2012, Simplified perfect absorber structure, *Computational materials science*, 61, 243-247
 91. Lee Y. P., Rhee J. Y., Yoo Y. J., Kim K. W., 2016, *Metamaterials for perfect absorption*. Springer Singapore.
 92. Chen H. T., 2012, Interference theory of metamaterial perfect absorbers, *Optics Express*, 20(7), pp. 165-7172.
 93. Duan G., Schalch J., Zhao X., Li A., Chen C., Averitt R. D., Zhang X., 2019, A survey of theoretical models for terahertz electromagnetic metamaterial absorbers, *Sensors and Actuators A: Physical*, 287, pp. 21-28.
 94. Duan G., Schalch J., Zhao X., Zhang J., Averitt R. D., Zhang X., 2018, Identifying the perfect absorption of metamaterial absorbers, *Physical Review B*, 97(3), pp. 035128.
 95. Zhou J., Economou E. N., Koschny T., Soukoulis C. M., 2006, Unifying approach to left-handed material design, *Optics Letters*, 31(24), pp. 3620.
 96. Nguyen T. H., Nguyen T. A. H., Dinh T. N., Bui X. K., Bui S. T., Nguyen X. C., Vu D. L., 2021, Multiband metamaterial absorber in a ring structure base on high-order magnetic resonance, *Communications in Physics*, 31(2), pp. 199.
 97. Saadeldin A. S., Hameed M. F. O., Elkaramany E. M., Obayya S. S., 2019, Highly sensitive terahertz metamaterial sensor, *IEEE Sensors Journal*, 19(18), pp. 7993-7999.
 98. Ding J., Li B., Chen L., Qin W., 2016, A three-dimensional Origami paper-based device for potentiometric biosensing, *Angewandte Chemie International Edition*, 55(42), pp. 13033-13037.
 99. Abdulkarim Y. I., Deng L., Luo H., Huang S., Karaaslan M., Altıntaş O., Bakir M., Muhammadsharif F. F., Awl H. N., Sabah C., Al-badri K. S. L., 2020,

- Design and study of a metamaterial based sensor for the application of liquid chemicals detection, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), pp. 10291-10304.
100. Gao Z., Xu C., Tian X., Wang J., Tian C., Yang B., Qu S., Fan Q., 2021, Ultra-wideband flexible transparent metamaterial with wide-angle microwave absorption and low infrared emissivity, *Optics Express*, 29(14), pp. 22108-22116.
 101. Long L. V., Khiem N. S., Tung B. S., Tung N. T., Giang T. T., Son P. T., Khuyen B. X, Lam V. D., Chen L., Zheng H., Lee Y. P., 2021, Flexible broadband metamaterial perfect absorber based on graphene-conductive inks, *Photonics*, 8(10), pp. 440.
 102. Deng G., Lv K., Sun H., Yang J., Yin Z., Li Y., Chi B., Li X., 2020, An Ultrathin, Triple-Band Metamaterial Absorber with Wide-Incident-Angle Stability for Conformal Applications at X and Ku Frequency Band, *Nanoscale Research Letters*, 15(1), pp. 217.
 103. Rogers J. A., Nuzzo R. G., 2005, Recent progress in soft lithography, *Materials today*, 8(2), 50-56.
 104. Ling K., Kim K., Lim S., 2015, Flexible liquid metal-filled metamaterial absorber on polydimethylsiloxane (PDMS), *Optics Express*, 23(16), pp. 21375-21383.
 105. Xu Z., Lin Y. S., 2019, A stretchable terahertz parabolic-shaped metamaterial, *Advanced Optical Materials*, 7(19), pp. 1900379.
 106. Zhu K., Hao S., Chen K., Jiang T., Zhao J., Feng Y., 2022, Directly drawing metamaterials on paper based on an automatic drawing machine, *Optical Materials Express*, 12(11), pp. 4299-4309.
 107. Zhang Z., Zhao Y., Fan G., Zhang W., Liu Y., Liu J., Fan R., 2021, Paper-based flexible metamaterial for microwave applications, *EPJ Applied Metamaterials*, 8, pp. 6.
 108. Alam T., Ashraf F. B., Islam M. T., 2018, Flexible paper substrate based wide band NRI metamaterial for X-band application, *Microwave and Optical Technology Letters*, 60(5), pp. 1309-1312.

109. Yoo M., Kim H. K., Kim S., Tentzeris M., Lim S., 2015, Silver nanoparticle - based inkjet - printed metamaterial absorber on flexible paper, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, pp. 1718-1721.
110. Saadeldin A. S., Sayed A. M., Amr A. M., Sayed M. O., Hameed M. F. O., Obayya S. S. A., 2023, Wideband ultrathin and polarization insensitive metamaterial absorber for Ku-band applications, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(26), pp. 1797.
111. Saadeldin A. S., Sayed A. M., Amr A. M., Sayed M. O., Hameed M. F. O., Obayya S. S. A., 2023, Broadband polarization insensitive metamaterial absorber, *Optical and Quantum Electronics*, 55(7), pp. 652.
112. Weiland T., 1977, A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields: Electronics and Communication, *AEÜ*, 31, pp. 116–120.
113. Tung N. T., Tanaka T., 2018, Characterizations of an infrared polarization-insensitive metamaterial perfect absorber and its potential in sensing applications, *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 28, pp. 100-105.
114. Chen X., Grzegorzczak T. M., Wu B. I., Pacheco Jr J., Kong J. A., 2004, Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials, *Physical Review E*, 70(1), pp. 016608.
115. Khuyen B. X., Tung B. S., Tung N. T., Hien N. T., Kim Y. J., Chen L. Y., Lee Y. P., Linh P. T., Lam V. D., 2019, Realization for dual-band high-order perfect absorption, based on metamaterial, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(10), pp. 105502.
116. Wang L., Xia D., Fu Q., Ding X., Wang Y., 2021, A switchable ultra-wideband metamaterial absorber with polarization-insensitivity and wide-incident angle at THz band, *Frontiers in Materials*, 8, pp. 729495.
117. Huang X., Pan K., Hu Z., 2016, Experimental demonstration of printed graphene nano-flakes enabled flexible and conformable wideband radar absorbers, *Scientific Reports*, 6(1), pp. 38197.
118. Aksyuk V., Lahiri B., Holland G., Centrone A., 2015, Near-field asymmetries in plasmonic resonators, *Nanoscale*, 7(8), pp. 3634-3644.

119. Bui S. T., Yoo Y., Kim K. W., Vu D. L., Lee Y., 2014, Small-size metamaterial perfect absorber operating at low frequency, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 5(4), 045008.
120. Hasan Md. M., Islam M. T., Almalki S. H., Alharbi A. G., Alsaif H., Islam M. S., Samsuzzaman M., 2022, Polarization insensitive dual band metamaterial with absorptance for 5G sub-6 GHz applications, *Scientific Reports*, 12(1), pp. 8495.
121. Hwang J. S., Kim Y. J., Yoo Y. J., Kim K. W., Rhee J. Y., Chen L. Y., Lee Y. P., 2017, Switching and extension of transmission response, based on bending metamaterials, *Scientific Reports*, 7(1), pp. 3559.
122. Ordal M. A., Long L. L., Bell R. J., Bell S. E., Bell R. R., Alexander R. W., Ward C. A., 1983, Optical properties of the metals al, co, cu, au, fe, pb, ni, pd, pt, ag, ti, and w in the infrared and far infrared, *Applied optics*, 22(7), 1099-1119.
123. Dayal G., Ramakrishna S. A., 2014, Multipolar localized resonances for multi-band metamaterial perfect absorbers, *Journal of Optics*, 16(9), pp. 094016.
124. Guddala S., Kumar R., Ramakrishna S. A., 2015, Thermally induced nonlinear optical absorption in metamaterial perfect absorbers, *Applied Physics Letters*, 106(11), pp. 111901.
125. Huang X., Lu C., Rong C., Hu Z., Liu M., 2018, Multiband ultrathin polarization-insensitive terahertz perfect absorbers with complementary metamaterial and resonator based on high-order electric and magnetic resonances, *IEEE Photonics Journal*, 10(6), pp. 1-11.

PHỤ LỤC

<p>Đặc trưng</p>	 <p>H-MPA1: Tích hợp tụ điện</p>	 <p>H-MPA2: Vòng cộng hưởng gấp khúc</p>	 <p>H-MPA3: Hình vuông xoay 45°</p>	 <p>H-MPA4: Vòng cộng hưởng tròn</p>	 <p>H-MPA5: Vòng cộng hưởng tròn</p>
<p>Vùng tần số hoạt động</p>	<p>VHF (0,03 – 0,3GHz) S (2.0 – 4.0 GHz)</p>	<p>UHF (0,3 – 1,0 GHz) L (1,0 – 2,0 GHz)</p>	<p>THz (30 – 100 THz)</p>	<p>C (4 – 8 GHz) X (8 – 12 GHz)</p>	<p>C (4 – 8 GHz) X (8 – 12 GHz)</p>
<p>Khả năng đàn hồi</p>	<p>Tính đàn hồi kém</p>	<p>Uốn cong tốt</p>	<p>Uốn cong tốt</p>	<p>Uốn cong tốt</p>	<p>Uốn cong tốt</p>
<p>Đỉnh cộng hưởng cơ bản</p>	<p>0,106 GHz và 0,1234 GHz – (A > 99%).</p>	<p>- 450 MHz (99,4%). - Độ hấp thụ giảm mạnh khi bị uốn cong. - Xuất hiện đỉnh hấp thụ mới tại 556 MHz.</p>	<p>- Đỉnh cơ bản: 34,9 THz (96,4 %). - Ổn định khi bị uốn cong.</p>	<p>- 4.3 GHz (98%) - Ổn định khi bị uốn cong</p>	<p>- 3,7 GHz (99 %). - Ổn định khi bị uốn cong.</p>
<p>Đỉnh cộng hưởng bậc cao</p>	<p>Đỉnh cộng hưởng bậc năm tại 3,13 (96,6%) và 3,77 (49,8%).</p>	<p>- Cộng hưởng từ bậc ba: 1,47 GHz (99,8%). - Ổn định khi bị uốn cong, xuất hiện đỉnh hấp thụ mới tại 1,48 GHz.</p>	<p>- Cộng hưởng từ bậc ba: 97,2 THz (99,2%). - Ổn định khi bị uốn cong</p>	<p>- Cộng hưởng từ bậc hai: khoảng 8,6 GHz, xuất hiện khi sóng tới xiên góc và khi uốn cong</p>	<p>- Cộng hưởng từ bậc hai: 7,5 GHz xuất hiện khi sóng tới xiên góc và khi uốn cong</p>