

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

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

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Ngô Như Việt

**NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ
DỰA TRÊN TƯƠNG TÁC CỘNG HƯỞNG TRONG
CẤU TRÚC VẬT LIỆU BIẾN HOÁ ĐA LỚP**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Hà Nội - 2025

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

Ngô Như Việt

NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ
DỰA TRÊN TƯƠNG TÁC CỘNG HƯỞNG TRONG
CẤU TRÚC VẬT LIỆU BIẾN HOÁ ĐA LỚP

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Vật liệu điện tử

Mã số: 9 44 01 23

Xác nhận của Học viện
Khoa học và Công nghệ

Người hướng dẫn 1

Người hướng dẫn 2

TS. Bùi Sơn Tùng

GS.TS. Vũ Đình Lâm

Hà Nội - 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan rằng luận án với đề tài "*Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ dựa trên tương tác cộng hưởng trong cấu trúc vật liệu biến hoá đa lớp*" 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 tháng năm 2025

Tác giả luận án

Ngô Như Việt

LỜI CẢM ƠN

Đầu tiên, nghiên cứu sinh xin gửi lời cảm ơn chân thành và sâu sắc tới tập thể giáo viên hướng dẫn là thầy GS. TS. Vũ Đình Lãm và thầy TS. Bùi Sơn Tùng. Các thầy đã định hướng và tận tình hướng dẫn về nội dung, phương pháp cũng như hỗ trợ tôi trong suốt quá trình nghiên cứu và hoàn thành luận án này.

Nghiên cứu sinh muốn bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến Ban Lãnh đạo, các phòng chức năng và cán bộ, giảng viên của Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Khoa học vật liệu đã truyền dạy những kiến thức, hỗ trợ các thủ tục, tạo điều kiện thuận lợi trong suốt quá trình học tập và thực hiện luận án của nghiên cứu sinh.

Nghiên cứu sinh xin trân trọng cảm ơn toàn thể các thầy cô và đồng nghiệp tại Nhóm nghiên cứu Vật liệu biến hóa cũng như Phòng Vật liệu biến hoá và cảm biến. Sự hỗ trợ, tạo điều kiện thuận lợi và động viên khích lệ từ phía các thầy cô và đồng nghiệp đã góp phần quan trọng, tạo nên môi trường thích hợp cho quá trình học tập và nghiên cứu của nghiên cứu sinh.

Nghiên cứu sinh cũng xin bày tỏ lòng biết ơn đặc biệt đến Thường vụ Đảng uỷ, Ban Giám đốc Học viện Cảnh sát nhân dân, Lãnh đạo khoa Kỹ thuật hình sự đã tạo mọi điều kiện thuận lợi cho nghiên cứu sinh được tham gia học tập và thực hiện luận án.

Cuối cùng, nghiên cứu sinh muốn dành những lời cảm ơn chân thành tới gia đình và bạn bè đã giúp đỡ, động viên đạt được thành công trong hành trình thực hiện luận án này.

Hà Nội, ngày tháng năm 2025

Tác giả luận án

Ngô Như Việt

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	3
LỜI CẢM ƠN	4
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU	iii
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	Error! Bookmark not defined.
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ	vi
MỞ ĐẦU	1
1. Lý do chọn đề tài	1
2. Mục tiêu nghiên cứu	2
3. Nội dung nghiên cứu	3
3.1. Phương pháp nghiên cứu	3
3.2. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu	3
4. Cơ sở khoa học và thực tiễn của đề tài	3
5. Những đóng góp mới	3
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU BIẾN HOÁ HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CÓ CẤU TRÚC ĐA LỚP	5
1.1. Tổng quan về vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ	5
1.1.1. Giới thiệu chung về vật liệu biến hoá	5
1.1.2. Định nghĩa, phân loại và sự phát triển của vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ	6
1.2. Cơ chế hoạt động của vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ	7
1.2.1. Cộng hưởng điện và từ trong vật liệu biến hoá	7
1.2.2. Lý thuyết phối hợp trở kháng	8
1.2.3. Tiêu tán năng lượng trong vật liệu biến hoá	10
1.3. Vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp hấp thụ sóng điện từ	11
1.3.1. Vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp hấp thụ sóng điện từ dải rộng	12
1.3.2. Vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp đa chức năng	18
1.3.3. Một số ứng dụng của vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp hấp thụ sóng điện từ.	26
1.4. Kết luận chương 1	35
2.1. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết	36
2.1.1. Phương pháp mô phỏng	36
2.1.2. Mô hình tính toán mạch LC tương đương	38
2.1.3. Dao động từ tương tác	41
2.2. Phương pháp chế tạo	44
2.3. Phương pháp đo đặc tính chất điện từ của vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp	46

2.3.1. Đánh giá thực nghiệm đặc trưng phản xạ của các mẫu vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp	47
2.3.2. Đánh giá thực nghiệm đặc trưng truyền qua của các mẫu vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp	47
2.4. Kết luận chương 2	48
CHƯƠNG 3. SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA TƯƠNG TÁC GIỮA CÁC LỚP ĐẾN TÍNH CHẤT HẤP THỤ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HOÁ CÓ CẤU TRÚC ĐA LỚP TRONG VÙNG TẦN SỐ GHz	49
3.1. Ảnh hưởng của kim loại lên tương tác	49
3.1.1. MMA có tổn hao Ohmic nhỏ	49
3.1.2. MMA có độ tổn hao Ohmic lớn	65
3.2. Ảnh hưởng của tổn hao điện môi lên tương tác.....	81
3.3. Kết luận chương 3	86
CHƯƠNG 4. SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA TƯƠNG TÁC GIỮA CÁC LỚP ĐẾN TÍNH CHẤT HẤP THỤ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HOÁ CÓ CẤU TRÚC ĐA LỚP TRONG VÙNG TẦN SỐ THz.....	87
4.1. Ảnh hưởng của kim loại lên tương tác	87
4.1.1. MMA có tổn hao Ohmic lớn	87
4.1.2. MMA có tổn hao Ohmic nhỏ	92
4.2. Ảnh hưởng của điện môi lên tương tác	95
4.3. Ứng dụng MMA trong phát xạ hồng ngoại	102
4.4. Kết luận chương 4	105
CHƯƠNG 5. NGHIÊN CỨU VẬT LIỆU BIẾN HOÁ CÓ CẤU TRÚC ĐA LỚP ĐA CHỨC NĂNG.....	107
5.1. Nghiên cứu vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp đa chức năng hoạt động tại vùng tần số GHz.....	107
5.1.1. Thiết kế và mô phỏng cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số GHz....	107
5.1.2. Kết quả mô phỏng cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số GHz	110
5.2. Nghiên cứu vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz	118
5.2.1. Thiết kế và mô phỏng cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz	118
5.2.2. Kết quả mô phỏng cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz.....	120
5.3. Kết luận chương 5	127
KẾT LUẬN CHUNG	128
KIẾN NGHỊ NHỮNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO.....	130
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN.....	131
TÀI LIỆU THAM KHẢO	132

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU

1. Danh mục các ký hiệu viết tắt

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

2. Danh mục chữ viết tắt

Viết tắt	Nguyên bản tiếng Anh	Tạm dịch
CST MWS	Computer Simulation Technology, Microwave studio	Phần mềm mô phỏng tương tác điện từ
CW	Cut wire	Dây bị cắt
CWP	Cut-wire pair	Cặp dây bị cắt
EIA	Electromagnetically Induced Absorption	Hấp thụ cảm ứng điện từ
EIT	Electromagnetically Induced Transparency	Truyền qua cảm ứng điện từ
FIT	Finite integration technique	Kỹ thuật tích phân hữu hạn
FBW	Fractional Bandwidth	Độ bán rộng
FWHM	Full width at half maximum	Độ rộng phổ được đo tại điểm cường độ bằng một nửa cường độ cực đại
MA	Metamaterial absorber	Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ
MM	Metamaterial	Vật liệu biến hóa
MMA	Multilayer metamaterial absorber	Vật liệu biến hóa đa lớp hấp thụ sóng điện từ
SRR	Split-ring resonator	Vòng cộng hưởng có rãnh
TE	Transverse electric	Điện trường ngang
TL	Transmission line	Đường truyền
TM	Transverse magnetic	Từ trường ngang
VNA	Vector Network Analyzer	Máy phân tích mạng vector

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

<i>Bảng 1.1. Kích thước hình học của vật liệu biến hoá EIT một lớp</i>	22
<i>Bảng 1.2. Kích thước hình học chi tiết của vật liệu biến hoá EIA ba lớp</i>	25
<i>Bảng 3.1. Thông số cấu trúc MA và MMA với lớp hấp thụ mực dẫn điện graphene</i>	67
<i>Bảng 3.2. So sánh các cấu trúc MMA được đề xuất với một số nghiên cứu khác trong vùng tần số GHz</i>	86
<i>Bảng 4.1. So sánh cấu trúc MMA được đề xuất với một số MA, MMA trong vùng tần số THz trong một số nghiên cứu khác</i>	105
<i>Bảng 5.1. Thông số cấu trúc EIT-MM hoạt động tại vùng GHz</i>	108
<i>Bảng 5.2. Thông số cấu trúc MMA đa chức năng chuyển đổi EIT và EIA hoạt động tại vùng GHz</i>	110
<i>Bảng 5.3. Thông số cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz</i>	120

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

Hình 1.1. Các ứng dụng của vật liệu biến hoá	5
Hình 1.2. Phân bố dòng điện trường và dòng điện bề mặt ở tần số 9.2 GHz và 16.0 GHz, a, c phân bố điện trường; b, d phân bố từ trường; e, g phân bố trường tổn thất; f, h phân bố dòng điện bề mặt của mẫu kim loại và tấm đế kim loại trong cấu trúc MA	7
Hình 1.3. (a) Phổ trở kháng đầu vào và phản xạ của vật liệu biến hoá. (b) Kết quả phổ hấp thụ mô phỏng trên phần mềm FDTD Solutions và lý thuyết. (c) Sơ đồ cấu trúc vật liệu biến hoá.	9
Hình 1.4. Mô hình cấu trúc vật liệu biến hoá gồm các lớp kim loại – điện môi – kim loại (a) và mô hình mạch điện tương đương (b)	10
Hình 1.5. Tổn thất điện môi và tổn thất Ohmic trong vật liệu biến hoá	11
Hình 1.6. Sơ đồ thiết kế của MMA. (b) Hình ảnh nhìn từ bên ô cơ sở của MMA. (c) Thiết kế MMA dạng xoắn. (d) Hình ảnh nhìn từ trên xuống của MMA dạng xoắn	13
Hình 1.7. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng của MMA và MMA dạng xoắn, (b) Hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực chéo của MMA dạng xoắn, (c) Phổ hấp thụ của MMA dạng xoắn với các góc phân cực khác nhau	14
Hình 1.8. Thiết kế MMA băng thông rộng.	15
Hình 1.9. Phổ hấp thụ của MMA ở (a) TE mode; (b) TM mode.	15
Hình 1.10. Phổ hấp thụ mô phỏng của MMA băng thông rộng với các góc phân cực khác nhau.	16
Hình 1.11. Mô phỏng cấu trúc vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp được đề xuất. Các thông số hình học của cấu trúc là: $P = 5 \mu\text{m}$, $w = 0.3 \mu\text{m}$, $g = 0.15 \mu\text{m}$, $m = 0.8 \mu\text{m}$, $h = 0.4 \mu\text{m}$.	17
Hình 1.12. (a) Phổ hấp thụ của cấu trúc vật liệu biến hoá được thiết kế với các lớp graphene khác nhau; (b) Với các lớp trên cùng khác nhau.	17
Hình 1.13. Sơ đồ mẫu và hình ảnh hiển vi. (a) Sơ đồ của ô cơ sở vật liệu biến hoá EIA ba lớp. (b) Hình ảnh của mẫu EIA được chế tạo trên một chất nền silicon và điện môi được làm từ polyimide. (c) Mô hình của từng cấu trúc cộng hưởng. $P_x = P_y = 120 \mu\text{m}$, $t_1 = t_2 = 10 \mu\text{m}$, $l_1 = 110 \mu\text{m}$, $l_2 = 83 \mu\text{m}$, $t = 42 \mu\text{m}$, $w = 10 \mu\text{m}$, $a = 47 \mu\text{m}$, $d = 13 \mu\text{m}$ và $g = 10 \mu\text{m}$.	19
Hình 1.14. Phổ truyền qua, phản xạ và hấp thụ. (a) Phổ thực nghiệm, (b) phổ mô phỏng và (c) phổ lý thuyết về truyền qua (màu tím), phản xạ (màu cam) và hấp thụ (màu xanh lá cây) dưới sóng phân cực y.	20
Hình 1.15. Kết quả mô phỏng của các cấu trúc cộng hưởng riêng lẻ và nối tiếp. Phổ truyền qua (màu tím), phản xạ (màu cam) và hấp thụ (màu xanh lá cây) của các cấu trúc cộng hưởng riêng lẻ (a–c) và ba trường hợp của hai cấu trúc cộng hưởng kết hợp (d–f). Tần số cộng hưởng của các cấu trúc cộng hưởng trong (a–c) lần lượt là 0,6, 0,6 và 0,62 THz. Tất cả các đường cong liền đều thu được dưới sóng phân cực y tới theo phương	21

<i>vuông góc, trong khi các đường cong đứt nét trong (b) thu được dưới sóng phân cực x tới theo phương vuông góc.</i>	
<i>Hình 1.16. Sơ đồ của vật liệu biến hoá EIT một lớp, (a) góc nhìn ba chiều của cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc, (b) góc nhìn từ trên xuống của cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc, (c) góc nhìn ba chiều của cấu trúc cộng hưởng hình vuông, (d) góc nhìn từ trên xuống của cấu trúc cộng hưởng hình vuông và (e) góc nhìn ba chiều của vật liệu biến hoá EIT một lớp.</i>	22
<i>Hình 1.17. Phổ truyền qua của (a) cấu trúc cộng hưởng vuông (đường màu đen) và bốn cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc (đường màu đỏ) và (b) vật liệu biến hoá EIT có cấu trúc một lớp.</i>	23
<i>Hình 1.18. Vật liệu biến hoá EIA hai lớp, (a) góc nhìn từ bên cạnh và (b) góc nhìn ba chiều.</i>	23
<i>Hình 1.19. Phổ truyền qua và hấp thụ của vật liệu biến hoá EIA hai lớp ($h_3=2\text{ }\mu\text{m}$), (a) truyền qua và (b) hấp thụ.</i>	24
<i>Hình 1.20. Sơ đồ của vật liệu biến hoá EIA ba lớp, (a) góc nhìn từ bên của vật liệu biến hoá EIA ba lớp, (b) góc nhìn từ trên xuống của bốn SRR lồng nhau, (c) góc nhìn từ trên xuống của cấu trúc cộng hưởng hình vuông, (d) góc nhìn từ trên xuống của cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc và (e) góc nhìn ba chiều của vật liệu biến hoá EIA ba lớp.</i>	24
<i>Hình 1.21. Phổ phản xạ, truyền qua và hấp thụ của vật liệu biến hoá EIA ba lớp khi $h_5=27\text{ }\mu\text{m}$, $h_6=3\text{ }\mu\text{m}$, (a) phản xạ và truyền qua, và (b) hấp thụ.</i>	25
<i>Hình 1.22 (A) Góc nhìn 3D của bộ hấp thụ, (B) góc nhìn bên của bộ hấp thụ và kích thước ô đơn vị (hình chèn bên phải) và (C) điều chỉnh mô phỏng làm điều kiện biên. Kích thước của một ô cơ sở là $a=5\text{ mm}$, $b=8.99\text{ mm}$, $c=11\text{ mm}$, $h=5\text{ mm}$, $tr=0.05\text{ mm}$ và $t_f=0,2\text{ mm}$.</i>	27
<i>Hình 1.23 Phổ phản xạ và hấp thụ của bộ hấp thụ được đề xuất</i>	27
<i>Hình 1.24. Cấu trúc đề xuất với các tải điện trở (A) ô cơ sở và (B) điều kiện biên</i>	28
<i>Hình 1.25. Công suất tổn thất, công suất được chấp nhận, công suất tính toán và công suất hấp thụ</i>	29
<i>Hình 1.26. Phổ hấp thụ của cấu trúc sau khi thay đổi kích thước đối với chế độ TE và TM</i>	30
<i>Hình 1.27. Quá trình chuyển đổi từ EIT đến EIA và phổ hấp thụ tương ứng</i>	31
<i>Hình 1.28. Sơ đồ mô phỏng sự phân bố của tính thể lỏng khi áp dụng trường ngoài E.</i>	31
<i>Hình 1.29. (a) Độ hấp thụ của OMST ở các θ khác nhau và (b) chế độ xem được phóng to một phần trong (a) (khu vực màu vàng).</i>	32
<i>Hình 1.30. (a) và (b) Năng lượng hấp thụ ở hai trạng thái, (c) khả năng hấp thụ liên quan đến θ, từ 0 đến 150°, được ghi lại mỗi 10°, và (d) độ lệch của tần số cộng hưởng theo sự thay đổi của θ.</i>	33

Hình 1.31 (a) Mối quan hệ S của OMST và (b) các đường cong hệ số Q của OMST với các góc θ khác nhau.	33
Hình 1.32. (a) Khả năng hấp thụ của OMST đối với CS trong hai trạng thái tinh thể lỏng và (b) mối quan hệ $S-K$ của OMST đối với CS trong hai trạng thái tinh thể lỏng	34
Hình 2.1 a) Giao diện chương trình mô phỏng – CST Microwave Studio, b) Chia lưới Tetrahedrons khi mô phỏng cấu trúc	37
Hình 2.2 Dòng điện mô phỏng và mô hình hóa cũng như sự phân bố trường điện của (a) vật liệu biến hoá đơn lớp và (b) vật liệu biến hoá đa lớp.	39
Hình 2.3. (a) Sơ đồ tương tác với 2 nguồn phát khác nhau trong hiệu ứng EIT lượng tử, phổ truyền qua (b) cấu trúc cộng hưởng vuông (đường màu đen) và bốn cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc (đường màu đỏ) và (c) vật liệu biến hoá EIT.	42
Hình 2.4. Phổ hấp thụ của vật liệu biến hoá EIT/EIA đối với các hệ số liên kết khác nhau. (a) Được mô phỏng bởi mô hình hai dao động bức xạ với các tham số $\omega_d = 2\pi \times 10.58$ GHz, $\gamma_d = 0.0035$, $\omega_r = 2\pi \times 10.12$ GHz, $\gamma_r = 0.01$ và $\beta = 0.33 / (\omega_r \eta_0)$. (b) Phổ thực nghiệm đối với vật liệu biến hoá trong băng tần X với khoảng cách của sợi dây đến tâm là d khác nhau	43
Hình 2.5. Hệ thiết bị quang khắc được chia làm 4 phần chính: 1) bộ phận chiếu sáng, 2) hệ thống bơm hút, 3) bể dung dịch ăn mòn và 4) bể dung dịch hiện hình.	44
Hình 2.6. Quy trình chế tạo vật liệu biến hoá hoạt động trong vùng tần số GHz sử dụng phương pháp quang khắc	45
Hình 2.7. Máy phân tích mạng véc tơ VNA	46
Hình 2.8. Thiết lập đo MA và MMA trên hệ thiết bị VNA	47
Hình 2.9. Phép đo đặc trưng truyền qua của vật liệu sử dụng thiết bị VNA	48
Hình 3.1 Mô phỏng cấu trúc MA (a) đơn lớp và (b) hai lớp	50
Hình 3.2. (a) Phổ hấp thụ của MMA và MA đơn lớp với độ dày lớp điện môi khác nhau. (b) Trở kháng hiệu dụng của MMA và MA đơn lớp với $t_d =$ (c) 0.35 và (d) 0.735 mm.	50
Hình 3.3. Phân bố dòng điện bề mặt tại (a)-(d) 4.97 và (e)-(h) 4.89 GHz của MMA. (i)-(n) Phân bố dòng điện bề mặt tại 5.02 GHz của MA đơn lớp.	51
Hình 3.4. Phân bố từ trường tại (a)-(d) 4.97 và (e)-(h) 4.89 GHz của MMA. (i-n) Phân bố từ trường tại 5.02 GHz của MA đơn lớp.	52
Hình 3.5. Mô phỏng phân bố năng lượng tổn hao giữa các lớp MMA.	53
Hình 3.6. Phổ hấp thụ của MMA khi đặt thêm các đầu nối giữa các lớp.	54
Hình 3.7. Sự thay đổi của phổ hấp thụ của cấu trúc MMA với các góc tới khác nhau trong các mode (a) TE và (b) TM.	55
Hình 3.8. Phổ hấp thụ của các cấu trúc MMA với số lớp khác nhau.	56
Hình 3.9. Cấu trúc MA (a) đơn lớp, (b) đa lớp. (c) Quy trình chế tạo vật liệu biến hoá có cấu trúc 2 lớp. Mẫu chế tạo (d) và (e) sơ đồ cấu hình thử nghiệm.	57

Hình 3.10. (a) Mô hình mạch tương đương của MMA. (b) Tính toán tổng dòng điện chuẩn hóa trong MA đơn lớp và MMA, theo mô hình mạch LC. Phổ hấp thụ được đo và mô phỏng của (c) MA đơn lớp và (d) MMA.	58
Hình 3.11. Sơ đồ thiết kế MA (a) và MMA (b)	59
Hình 3.12. Mô phỏng (a) phổ hấp thụ và (c) trở kháng hiệu dụng của MA đơn lớp; (b) phổ hấp thụ và (d) trở kháng hiệu dụng của cấu trúc MMA.	60
Hình 3.13. Phân bố dòng điện bề mặt trên (a) MA đơn lớp và (b) MMA tại các đỉnh hấp thụ.	61
Hình 3.14. Sự thay đổi của phổ hấp thụ và đỉnh hấp thụ của MA dưới sóng phân cực TE (a), (b) và dưới sóng phân cực TM (c), (d) ở các góc tới khác nhau	62
Hình 3.15. Mẫu chế thực nghiệm MMA (a), đo đặc tính chất MMA (b)	62
Hình 3.16. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng và (b) thực nghiệm của MMA ở các góc tới khác nhau dưới sóng phân cực TE, bao gồm 10° , 30° , 50° và 70° .	63
Hình 3.17. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng và (b) thực nghiệm của MMA ở các góc tới khác nhau dưới sóng phân cực TM, bao gồm 10° , 30° , 50° và 70° .	65
Hình 3.18. Cấu trúc vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ được đề xuất (a) MA graphene, (b) thiết kế lớp cộng hưởng, (c) MMA graphene, (d) phổ hấp thụ của MA và MMA với lớp hấp thụ Graphene ($2\Omega/\text{sq}$).	67
Hình 3.19. Phân bố dòng điện bề mặt (a) và phân bố từ trường (b) của MA đơn lớp graphene ($2\Omega/\text{sq}$) với độ dày lớp điện môi $t_d = 1.7\text{ mm}$ ở tần số 9.1 GHz	67
Hình 3.20. Phân bố dòng điện bề mặt (a) và phân bố từ trường (b) của MMA graphene 2 lớp ($2\Omega/\text{sq}$) có độ dày lớp điện môi $t_d = 1.7\text{ mm}$ ở $f_1 = 6.57\text{ GHz}$.	68
Hình 3.21. Phân bố dòng điện bề mặt (a) và phân bố từ trường (b) của MMA graphene 2 lớp ($2\Omega/\text{sq}$) có độ dày lớp điện môi $t_d = 1.7\text{ mm}$ ở $f_2 = 8.92\text{ GHz}$.	69
Hình 3.22. Phân bố dòng điện bề mặt (a) và phân bố từ trường (b) của MMA graphene 2 lớp ($2\Omega/\text{sq}$) có độ dày lớp điện môi $t_d = 1.7\text{ mm}$ ở $f_3 = 15.21\text{ GHz}$.	69
Hình 3.23. Phổ hấp thụ của MMA 2 lớp graphene có điện trở bề mặt khác nhau	70
Hình 3.24. Phổ hấp thụ của MA đơn lớp ($t_d = 3.5\text{ mm}$) và MMA hai lớp ($t_{d1} = t_{d2} = 1.7\text{ mm}$) với lớp hấp thụ graphene ($100\Omega/\text{sq}$).	71
Hình 3.25. (a) Phổ trở kháng của MA đơn lớp có $t_d = 3.5\text{ mm}$ và (b) MMA hai lớp với $t_{d1} = t_{d2} = 1.7\text{ mm}$.	72
Hình 3.26. Phân bố dòng điện bề mặt của MMA graphene đơn lớp với $t_d = 3.5\text{ mm}$ tại tần số 9.57 GHz .	73
Hình 3.27. Phân bố từ trường của MA graphene đơn lớp với $t_d = 3.5\text{ mm}$ tại tần số 9.57 GHz .	73
Hình 3.28. Phân bố dòng điện bề mặt của MMA graphene có $t_{d1} = t_{d2} = 1.7\text{ mm}$ tại tần số $f_1 = 8\text{ GHz}$: (a)-(d) dòng điện bề mặt ở lớp graphene trên cùng; (e)-(h) dòng điện bề mặt phía trên của lớp graphene giữa; (i)-(l) dòng điện bề mặt phía dưới của lớp graphene giữa; (m)-(p) dòng điện bề mặt của tám kim loại liên tục dưới cùng.	74

Hình 3.29. Phân bố từ trường của MMA graphene hai lớp với độ dày lớp điện môi $t_{d1} = t_{d2} = 1.7\text{mm}$ tại tần số $f_1 = 8\text{ GHz}$	74
Hình 3.30. Phân bố dòng điện bề mặt của MMA graphene với $t_{d1} = t_{d2} = 1.7\text{mm}$ tại tần số $f_2 = 12.16\text{ GHz}$: (a)-(d) dòng điện bề mặt ở lớp graphene trên cùng; (e)-(h) dòng điện bề mặt phía trên của lớp graphene ở giữa; (i)-(l) dòng điện bề mặt phía dưới của lớp graphene ở giữa; (m)-(p) dòng điện bề mặt của tấm kim loại liên tục dưới cùng.	75
Hình 3.31. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA graphene ($40\text{ }\Omega/\text{sq}$): (a) ở tần số $f_1 = 6.66\text{ GHz}$, (b) ở tần số $f_2 = 15.17\text{ GHz}$. (c) Phân bố từ trường ở tần số $f_1 = 6.66\text{ GHz}$.	76
Hình 3.32. Phân bố dòng điện bề mặt của MMA graphene ($5\text{ }\Omega/\text{sq}$): (a) ở tần số $f_1 = 6.6\text{ GHz}$, (b) ở tần số $f_2 = 8.88\text{ GHz}$, (c) ở tần số $f_3 = 15.1\text{ GHz}$. (d) Phân bố từ trường ở tần số $f = 6.6\text{ GHz}$ và 8.88 GHz	76
Hình 3.33. Sơ đồ ghép nối các lớp trong cấu trúc nhiều lớp được đề xuất.	77
Hình 3.34. Mô phỏng phân bố năng lượng tổn hao trên từng lớp của MMA.	78
Hình 3.35. Mô phỏng phân bố năng lượng tổn hao trên bề mặt từng lớp của MMA.	79
Hình 3.36. (a) Ảnh hưởng của góc phân cực (φ) đến phổ hấp thụ của MMA graphene. (b) Phổ hấp thụ của MMA graphene hai lớp với các góc tới khác nhau (θ).	80
Hình 3.37. (a) Mẫu MA được chế tạo. (b) Nghiên cứu tính chất điện từ trên hệ thống phân tích mạng VNA.	80
Hình 3.38. (a) Phổ hấp thụ được thực nghiệm và mô phỏng của MMA graphene. (b) Phổ hấp thụ thực nghiệm của MMA graphene với các góc tới khác nhau.	81
Hình 3.39. (a) Sơ đồ cấu trúc MMA, (b) phổ hấp thụ của MMA với sự thay đổi hệ số tán xạ của điện môi	82
Hình 3.40. Sơ đồ cấu trúc (a) MA đơn lớp, (b) MMA, (c) Phổ hấp thụ của MA và MMA	82
Hình 3.41. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MA ($t_d = 0.35\text{mm}$) tại tần số 6.3 GHz	83
Hình 3.42. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA tại tần số $f_1 = 6.06\text{ GHz}$	84
Hình 3.43. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA tại tần số $f_2 = 6.28\text{ GHz}$	84
Hình 3.44. Phổ hấp thụ của MMA với (a) các góc phân cực φ khác nhau, (b) các góc tới θ khác nhau	85
Hình 4.1. Sơ đồ cấu trúc (a) MA đơn lớp, (b) MMA hai lớp với lớp hấp thụ VO_2	88
Hình 4.2. Phổ hấp thụ của MMA với VO_2 có độ dẫn khác nhau	89
Hình 4.3. Phổ hấp thụ của MA và MMA với VO_2 có độ dẫn 17500 S/m	89
Hình 4.4. Phân bố từ trường và điện trường trên MA với $t_d = 2.9\text{ }\mu\text{m}$ tại tần số 8.5 THz	90
Hình 4.5. Phân bố từ trường và điện trường của MMA ở các tần số cộng hưởng	90
Hình 4.6. Phân bố tổn hao năng lượng của MMA ở các tần số cộng hưởng khác nhau	91

Hình 4.7. Phổ hấp thụ của MMA với lớp hấp thụ VO_2 với (a) góc phân cực và (b) góc tới khác nhau	91
Hình 4.8. Phổ hấp thụ của MA và MMA với lớp hấp thụ VO_2 ($\sigma = 25000$ S/m)	92
Hình 4.9. Phân bố từ trường và điện trường của MA $t_d = 2.1$ μm với lớp hấp thụ VO_2 ($\sigma = 25000$ S/m)	93
Hình 4.10. Phân bố từ trường và điện trường của MMA với lớp hấp thụ VO_2 ($\sigma = 25000$ S/m)	94
Hình 4.11. Phân bố tổn hao năng lượng của MMA với lớp hấp thụ VO_2 (25000 S/m) ở các tần số cộng hưởng khác nhau	94
Hình 4.12. Phổ hấp thụ của MMA với lớp hấp thụ VO_2 ($\sigma = 25000$ S/m) với (a) góc phân cực và (b) góc tới khác nhau	95
Hình 4.13. (a) Sơ đồ cấu trúc MA Au-SiC, (b) MMA	96
Hình 4.14. Phổ hấp thụ của MA và MMA Al-SiC	97
Hình 4.15. Phân bố từ trường và điện trường của MA tại các tần số 23.08 THz	97
Hình 4.16. Phân bố từ trường của MMA tại các tần số 22.84 THz	98
Hình 4.17. Phân bố từ trường, điện trường của MMA tại tần số 23.06 THz	98
Hình 4.18. Ảnh hưởng của (a) góc phân cực và (b) góc tới đến tính chất hấp thụ của MMA	99
Hình 4.19. Ảnh hưởng của hệ số tổn hao điện môi γ đến tính chất hấp thụ của MMA	99
Hình 4.20. Ảnh hưởng của hệ số tổn hao điện môi γ đến tính chất hấp thụ của MMA và MA đơn lớp	100
Hình 4.21. Phân bố từ trường và điện trường của MA tại các tần số 23.08 và 23.61 THz	100
Hình 4.22. Phân bố từ trường của MMA tại các tần số 23.09 và 23.4 THz	101
Hình 4.23. Phổ hấp thụ của MMA với (a) các góc phân cực sóng điện từ và (b) góc tới khác nhau	102
Hình 4.24. Mô phỏng cấu trúc ô cơ sở của MA hình lục giác đơn lớp (phía dưới) và MA nhiều lớp (phía trên) hoạt động trong vùng tần số THz.	102
Hình 4.25. Phổ hấp thụ của MA lục giác đơn lớp có độ dày khác nhau và MMA.	103
Hình 4.26. Phân bố từ trường ở tần số hấp thụ 58.6(a) và 64.8 THz(b)	104
Hình 4.27. So sánh cường độ phát xạ của MA với các nhiệt độ khác nhau với cường độ phát xạ của vật đen tuyệt đối	104
Hình 5.1. Sơ đồ thiết kế ô cơ sở của EIT-MM hoạt động tại vùng tần số GHz	108
Hình 5.2. (a) Phổ truyền qua của các cấu trúc hình vuông lỗ tròn, đường uốn khúc và đường chéo riêng lẻ; Phổ truyền của EIT-MM được đề xuất và các cấu trúc kết hợp của từng cấu trúc riêng lẻ. (b) Mẫu MMA chế tạo được và kết quả thực nghiệm	109

Hình 5.3. Sơ đồ thiết kế cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số GHz với (a) lớp phía trên cùng, (b) lớp ở giữa, (c) lớp dưới cùng và (d) tổng thể cấu trúc	110
Hình 5.4. Phổ truyền qua của các cấu trúc (a) MA và (b) MMA với $d_1 = d_2 = 0$	111
Hình 5.5. Phổ truyền qua (a) và phổ hấp thụ (b) của các cấu trúc MMA với $d_2 = 0$ mm và d_1 thay đổi	111
Hình 5.6. Phổ truyền qua (a) và phổ hấp thụ (b) của các cấu trúc MMA với $d_1 = 2$ mm và d_2 thay đổi	112
Hình 5.7. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA với $d_1 = 2$ mm và $d_2 = 0$ tại tần số 4.36 GHz ở chế độ EIA	112
Hình 5.8. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA với $d_1 = 2$ mm và $d_2 = 0$ tại tần số 6.67 GHz ở chế độ EIA	113
Hình 5.9. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA với $d_1 = 2$ mm và $d_2 = 0$ tại tần số 8.11 GHz ở chế độ EIA	114
Hình 5.10. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA với $d_1 = d_2 = 0$ tại tần số 3.69 GHz ở chế độ EIT	114
Hình 5.11. Mô phỏng sự lan truyền năng lượng qua MMA đa chức năng chuyển đổi EIT và EIA hoạt động tại vùng GHz	115
Hình 5.12. Ảnh hưởng của góc phân cực và góc tới đến phổ hấp thụ của MMA với $d_1 = 2$ mm, $d_2 = 0$	116
Hình 5.13. Phổ hấp thụ của MMA với góc tới $\theta = 60^\circ$, (a) d_1 thay đổi, $d_2 = 0.5$ mm; (b) $d_1 = 2$ mm, d_2 thay đổi	117
Hình 5.14. Ảnh hưởng của góc tới đến phổ truyền qua của MMA với $d_1 = d_2 = 0$	118
Hình 5.15. Phổ truyền qua của MMA với góc tới $\theta = 60^\circ$, (a) d_1 thay đổi, $d_2 = 0.5$ mm; (b) $d_1 = 0$ mm, d_2 thay đổi	118
Hình 5.16. Sơ đồ thiết kế cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz với (a) lớp phía trên cùng, (b) lớp ở giữa, (c) lớp dưới cùng và (d) tổng thể cấu trúc	119
Hình 5.17. Phổ truyền qua của các cấu trúc (a) MA và (b) MMA có $d_1 = d_2 = 0$ hoạt động tại vùng THz	120
Hình 5.18. Phổ truyền qua (a) và phổ hấp thụ (b) của các cấu trúc MMA với $d_2 = 0.5$ μ m và d_1 thay đổi	121
Hình 5.19. Phổ truyền qua (a) và phổ hấp thụ (b) của các cấu trúc MMA với $d_1 = 2.5$ μ m và d_2 thay đổi	121
Hình 5.20. Phân bố điện trường của cấu trúc MMA với $d_1 = 2.5$ μ m và $d_2 = 0.5$ μ m tại tần số 5.09 THz ở chế độ EIA	122
Hình 5.21. Phân bố điện trường của cấu trúc MMA với $d_1 = 2.5$ μ m và $d_2 = 0.5$ μ m tại tần số 7.48 THz ở chế độ EIA	122
Hình 5.22. Phân bố điện trường của cấu trúc MMA với $d_1 = 2.5$ μ m và $d_2 = 0.5$ μ m tại tần số 10.43 THz ở chế độ EIA	123

Hình 5.23. Phân bố điện trường của cấu trúc MMA với $d_1 = d_2 = 0.5$ tại tần số 4.06, 6.47 và 8.85 THz ở chế độ EIT	123
Hình 5.24. Mô phỏng sự lan truyền năng lượng qua MMA đa chức năng chuyển đổi EIT và EIA hoạt động tại vùng THz	124
Hình 5.25. Ảnh hưởng của góc phân cực và góc tới đến phổ hấp thụ của cấu trúc MMA với $d_1 = 2.5 \mu\text{m}$ và $d_2 = 0.5 \mu\text{m}$.	125
Hình 5.26. Phổ hấp thụ của cấu trúc MMA tại góc tới $\theta = 80^\circ$ với (a) d_1 thay đổi và $d_2 = 4 \mu\text{m}$; (b) $d_1 = 4 \mu\text{m}$ và d_2 thay đổi.	125
Hình 5.27. Ảnh hưởng của góc tới đến phổ truyền qua của cấu trúc MMA với $d_1 = d_2 = 0$	126
Hình 5.28. Phổ hấp thụ của cấu trúc MMA tại góc tới $\theta = 80^\circ$ với (a) d_1 thay đổi và $d_2 = 4 \mu\text{m}$; (b) $d_1 = 4 \mu\text{m}$ và d_2 thay đổi.	126

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Vật liệu biến hoá (MM) là loại vật liệu được con người thiết kế và chế tạo, có những đặc tính riêng biệt mà vật liệu tự nhiên không có. Những tính chất này không bắt nguồn từ đặc tính của vật liệu cơ bản và từ các cấu trúc mới được thiết kế của chúng. MM có khả năng đảo ngược định luật khúc xạ Snell [1], hiệu ứng Doppler [2] và bức xạ Cherenkov [3]. Bắt đầu từ công trình nghiên cứu của V.G. Veselago năm 1968 [4], MM ngày càng nhận được nhiều sự quan tâm. Veselago đã chỉ ra rằng, về mặt lý thuyết chứng minh rằng có một loại vật liệu nhân tạo có đồng thời độ điện thẩm và độ từ thẩm âm tại một dải tần số. Từ công trình nghiên cứu của Veselago, Pendry và các cộng sự đã đề xuất một cấu trúc được làm từ đồng và điện môi FR-4 và thu được độ từ thẩm hiệu dụng âm [5]. Dựa trên nghiên cứu này, Smith và các cộng sự đã tiến hành thực nghiệm trên vật liệu có chiết suất âm [6]. Nghiên cứu này đã mở ra các hướng nghiên cứu mới và tiềm năng ứng dụng khác nhau của MM như siêu thấu kính [7], tàng hình [8], và vật liệu hấp thụ sóng âm [9]...

Trong những năm gần đây, vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ (Metamaterial absorber-MA) trở thành chủ đề nghiên cứu nổi bật bởi vai trò then chốt của chúng trong nhiều lĩnh vực khoa học, công nghệ cũng như ứng dụng đời sống. MA là một loại vật liệu được con người chế tạo với thiết kế đặc biệt để hấp thụ hiệu quả sóng điện từ trong một dải tần số cụ thể [10-12]. MA bắt đầu xuất hiện trong nghiên cứu của Landy và các cộng sự [13]. Xuất phát từ nghiên cứu này, ngày càng có nhiều nghiên cứu về MA trên thế giới. Trong đó, MA được nghiên cứu trong cả tần số THz [14] và vùng GHz [15]. Cơ chế hấp thụ sóng điện từ của MA được giải thích thông qua mô hình mạch điện tương đương [16]. Mặc dù các MA đơn lớp được thiết kế với độ hấp thụ tốt, trong một khoảng tần số cố định, tuy nhiên, thường giới hạn xung quanh một tần số hấp thụ chính và khả năng điều hướng các đặc tính như vị trí, số lượng và cường độ các đỉnh hấp thụ bị hạn chế do số bậc tự do cấu trúc ít. Ngoài ra, việc thay đổi góc tới, góc phân cực cũng ảnh hưởng đến tính chất hấp thụ của MA [17]. Việc sử dụng cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ có cấu trúc đa lớp (Multilayer metamaterial absorber - MMA) mang lại nhiều lợi thế so với MA đơn lớp, đặc biệt trong việc mở rộng dải tần hấp thụ, tăng cường hiệu suất cộng hưởng và đa chức năng chuyển đổi giữa hiệu ứng truyền qua cảm ứng điện từ (Electromagnetically Induced Transparency – EIT) và hấp thụ cảm ứng điện từ (Electromagnetically Induced Absorption – EIA). Về mặt vật lý, sự tương tác giữa các lớp cộng hưởng gần nhau về tần số có thể sinh ra các chế độ cộng hưởng mới, khác biệt

so với cộng hưởng riêng lẻ của từng lớp. Hiện tượng này cho phép hình thành các đỉnh hấp thụ bổ sung hoặc mở rộng dải tần hoạt động, từ đó cải thiện khả năng hấp thụ sóng điện từ trong các ứng dụng như tàng hình, giảm phản xạ radar, và thu năng lượng [18], [19]. Việc sử dụng cấu trúc đa lớp còn giải quyết tốt bài toán điều khiển linh hoạt tính chất điện từ và chính xác hơn nhờ sự kết hợp giữa các hiệu ứng cộng hưởng ở từng lớp cấu trúc [20-21]. Đồng thời, cấu trúc MMA có thể dễ dàng thay đổi khoảng cách các phần tử cộng hưởng để làm thay đổi sự tương tác giữa các lớp. Tuy nhiên, MMA cũng tồn tại một số hạn chế nhất định. Việc chồng nhiều lớp kim loại–điện môi có thể làm tăng độ dày tổng thể của vật liệu, gây khó khăn trong chế tạo và ảnh hưởng đến tính ứng dụng trong các hệ thống yêu cầu độ mỏng hoặc trọng lượng nhẹ. Do đó, cần có sự cân nhắc giữa hiệu quả hoạt động và yêu cầu về kích thước khi lựa chọn cấu trúc phù hợp cho từng ứng dụng cụ thể.

Trên thế giới, đã có một số nghiên cứu về MMA có thể giúp đạt được các tính chất như hấp thụ băng thông rộng [22-24], hấp thụ đa đỉnh [25-26], từ đó mở ra nhiều cơ hội ứng dụng loại vật liệu này trong thu năng lượng, che chắn sóng điện từ, cảm biến,... Mặc dù đã có những nghiên cứu về MMA với khả năng hấp thụ tốt, tuy nhiên, các nghiên cứu này chỉ tập trung vào việc cải thiện tính chất hấp thụ mà không đề cập đến các cơ chế hấp thụ cũng như sự tương tác giữa các lớp. Ở trong nước, đề tài luận án cho thấy các điểm khác, các điểm mới so với các nghiên cứu về MA trước đây [17], [27-30]. Những nghiên cứu này gồm nhiều đối tượng MM khác nhau, tuy nhiên các nghiên cứu này chủ yếu đề cập đến MM có cấu trúc đơn lớp. Từ các lý do trên, nghiên cứu sinh đã lựa chọn đề tài: **“Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ dựa trên tương tác cộng hưởng trong cấu trúc vật liệu biến hoá đa lớp”**. Luận án trình bày về các tính chất của MMA, cơ chế hấp thụ, sự đóng góp của các lớp, đồng thời làm rõ vai trò của các thành phần tổn hao trong MMA.

2. Mục tiêu nghiên cứu

- Thiết kế MMA với khả năng hấp thụ đa dải tần, dải rộng và có thể chuyển đổi giữa truyền qua và hấp thụ sóng điện từ
- Làm rõ cơ chế tương tác giữa các lớp
- Làm rõ vai trò của các thành phần tổn hao trong vật liệu

3. Nội dung nghiên cứu

3.1. Phương pháp nghiên cứu

Luận án kết hợp các phương pháp nghiên cứu như tính toán, mô phỏng, chế tạo và thực nghiệm

MMA được thiết kế trên phần mềm chuyên dụng, đồng thời các tính chất điện từ như: tính chất hấp thụ, phản xạ, truyền qua cũng được mô phỏng lại trên phần mềm. Các kết quả mô phỏng này sau đó được so sánh với các kết quả ghi nhận được thông qua tính toán. Sau khi được tối ưu cấu trúc, MMA được chế tạo theo các phương pháp như: quang khắc, in lưới,... Sau đó, tính chất điện từ của MMA sẽ được thực nghiệm và kiểm chứng thông qua các kết quả đo đạc.

3.2. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp

Sự tương tác giữa các lớp trong MMA trong vùng tần số GHz và THz

4. Cơ sở khoa học và thực tiễn của đề tài

Ý nghĩa khoa học:

- Góp phần xây dựng các mô hình vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ có cấu trúc đa lớp

- Làm rõ về cơ chế hoạt động, sự đóng góp, tương tác giữa các lớp trong cấu trúc vật liệu biến hoá đa lớp.

Ý nghĩa thực tiễn:

Các kết quả trong luận án đóng góp vào việc sử dụng MMA ứng dụng trong các bộ thu giữ năng lượng, cảm biến, che chắn sóng điện từ,...

5. Những đóng góp mới

- Làm rõ sự tương tác giữa các lớp và vai trò của các thành phần tổn hao trong MMA ở vùng tần số GHz và THz.

- Thiết kế một số cấu trúc MMA đa dải tần, dải rộng và đa chức năng có khả năng chuyển đổi hiệu ứng EIT và EIA ở vùng GHz và THz dựa trên tương tác cộng hưởng giữa các lớp.

Bố cục của luận án

Luận án gồm có 140 trang, bao gồm phần mở đầu, 5 chương nội dung và các kết luận, bao gồm:

Mở đầu

Chương 1. Tổng quan về vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ có cấu trúc đa lớp

Giới thiệu tổng quan về MA, cơ chế hoạt động, MMA hấp thụ dải rộng, vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp đa chức năng

Chương 2. Phương pháp nghiên cứu

Trình bày các phương pháp lý thuyết và thực nghiệm được sử dụng trong luận án đề nghiên cứu MMA.

Chương 3. Sự ảnh hưởng của tương tác giữa các lớp đến tính chất hấp thụ của vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp trong vùng tần số GHz

Trình bày sự ảnh hưởng của tương tác giữa các lớp đến tính chất hấp thụ của MMA trong vùng tần số GHz

Chương 4. Sự ảnh hưởng của tương tác giữa các lớp đến tính chất hấp thụ của vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp trong vùng tần số THz

Trình bày sự ảnh hưởng của tương tác giữa các lớp đến tính chất hấp thụ của MMA trong vùng tần số THz

Chương 5. Nghiên cứu vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp đa chức năng

Trình bày thiết kế và các kết quả mô phỏng liên quan đến MMA đa chức năng

Kết luận

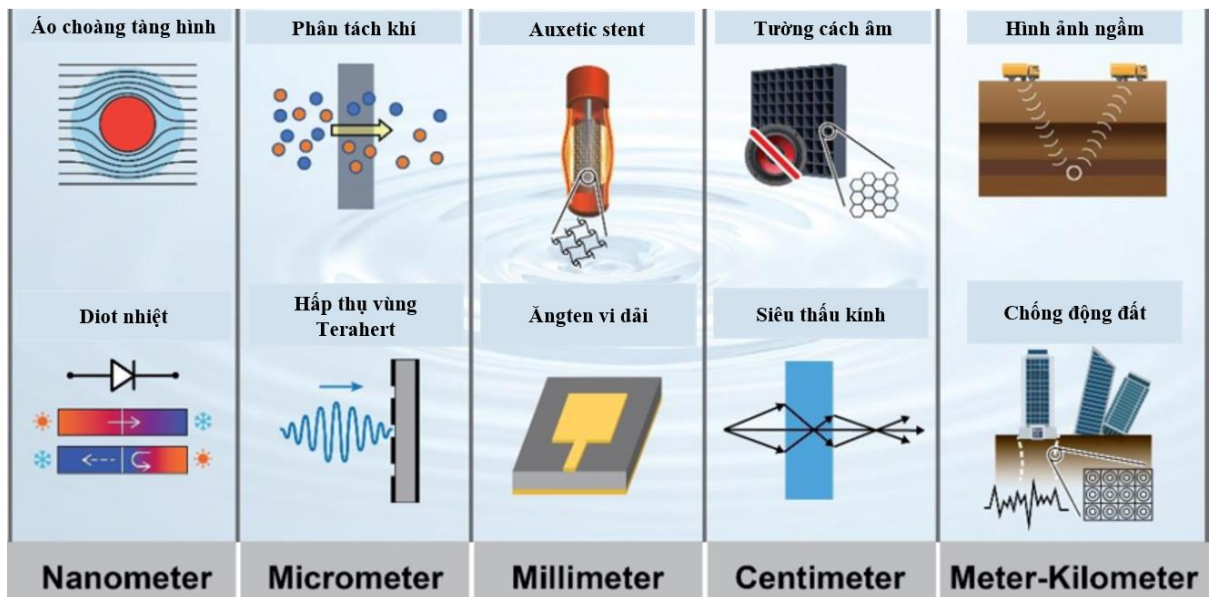
Luận án này được thực hiện và sử dụng trang thiết bị chủ yếu tại Viện Khoa học vật liệu và Học viện Khoa học và Công nghệ. Kết quả chính của luận án được công bố trên 04 bài báo quốc tế thuộc tạp chí SCIE, 01 bài báo trên tạp chí khoa học chuyên ngành trong nước và 01 bài báo thuộc kỷ yếu hội nghị quốc tế.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU BIẾN HOÁ HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CÓ CẤU TRÚC ĐA LỚP

1.1. Tổng quan về vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ

1.1.1. Giới thiệu chung về vật liệu biến hoá

MM là cấu trúc được chế tạo nhân tạo từ các ô đơn vị có kích thước dưới bước sóng làm việc và được sắp xếp theo dạng tuần hoàn [31]. Sự quan tâm lớn dành cho MM xuất phát từ những đặc tính dị thường mà không thể tìm thấy trong các vật liệu tự nhiên.. Những đặc tính này bao gồm chiết suất âm [32], trong suốt/truyền qua cảm ứng điện từ [33], và hiệu ứng Doppler ngược [2]...



Hình 1.1. Các ứng dụng của vật liệu biến hoá [34]

MM (metamaterial) có nguồn gốc từ tiếng Hy Lạp có nghĩa là vượt trội. Đây là vật liệu tổng hợp nhân tạo với các thành phần bao gồm điện môi và kim loại, được sắp xếp, thiết kế để đạt được các đặc tính điện từ có lợi và khác thường. Khác với vật liệu truyền thống, đặc tính của MM không chỉ phụ thuộc vào thành phần hóa học mà còn chủ yếu đến từ cấu trúc hình học của các ô cơ sở có kích thước nhỏ hơn bước sóng của sóng tương tác. Với việc thiết kế cấu trúc tuần hoàn theo những hình dạng và tỷ lệ nhất định, người ta có thể điều chỉnh các thông số hiệu dụng như độ điện thẩm (ϵ), độ từ thẩm (μ), và chiết suất (n). Nhờ những đặc tính nổi bật đó, hiện nay, MM đang được sử dụng trong nhiều lĩnh vực như siêu thấu kính [7], [35-36], áo choàng tàng hình [8], [37-38], và vật liệu hấp thụ sóng điện từ (MA) [9], [39-40], cảm biến [41-43]... Dù vẫn còn nhiều thách thức trong chế tạo và thương mại hóa, nhưng với khả năng "thiết kế tính chất theo ý

muôn", metamaterial là một trong những vật liệu tiên phong dẫn đầu xu hướng vật liệu của thế kỷ 21.

1.1.2. Định nghĩa, phân loại và sự phát triển của vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ

MA là một dạng MM được thiết kế đặc biệt nhằm đạt khả năng hấp thụ năng lượng điện từ hiệu quả trong một hoặc nhiều dải tần số xác định. Khả năng hấp thụ của MA chủ yếu bắt nguồn từ cấu trúc vi mô được sắp đặt nhân tạo, thay vì thành phần hóa học. Với đặc tính này, MA có nhiều tiềm năng ứng dụng trong đời sống dân sự lẫn lĩnh vực quân sự. Các thiết kế MA có thể hấp thụ gần như toàn bộ năng lượng của sóng tới trong một hoặc nhiều dải tần, vượt trội hơn hẳn so với vật liệu hấp thụ truyền thống. Đặc biệt, nhờ cấu trúc nhỏ gọn chỉ chiếm một phần nhỏ so với bước sóng, MA có thể đạt hiệu suất hấp thụ rất cao, trên 90%.

Nguyên lý hấp thụ của MA dựa trên sự kết hợp giữa cộng hưởng điện hoặc từ và sự phối hợp trở kháng, giúp trở kháng của vật liệu tương ứng với môi trường xung quanh. Thông qua thiết kế hình học và lựa chọn vật liệu thích hợp, các thông số hiệu dụng như độ điện môi và độ từ thẩm có thể được điều chỉnh linh hoạt. Các vật liệu này có thể hoạt động ở nhiều dải tần, từ vi ba (microwave) đến terahertz (THz), thậm chí cả vùng hồng ngoại và quang học. Với những ưu điểm như cấu trúc nhỏ, khả năng thiết kế đa dạng, hiệu suất hấp thụ mạnh và tần số hoạt động tùy ý, MA đã thu hút sự quan tâm lớn của các nhà khoa học trong các ứng dụng như tàng hình radar, che chắn bức xạ điện từ, cảm biến tần số cao và thiết bị viễn thông thế hệ mới.

MA có thể được phân loại theo nhiều căn cứ khác nhau. Trong đó, nó có thể được chia thành MA băng tần rộng và MA băng tần hẹp phụ thuộc vào băng thông hấp thụ [44-45]. Ngoài ra, vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ còn có thể được phân loại dựa trên tần số hoạt động bao gồm: MA hoạt động trong vùng vi sóng, vùng THz và vùng quang học. Băng thông hấp thụ của MA có vai trò quan trọng trong nghiên cứu khoa học, nó có nhiều tiềm năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực trong cuộc sống. Các MA hoạt động ở các vùng tần số khác nhau, băng thông hấp thụ khác nhau sẽ đáp ứng các nhu cầu ứng dụng khác nhau. Nhiều nghiên cứu khoa học đã tập trung vào việc mở rộng hoặc thu hẹp băng thông hấp thụ nhằm mục đích đạt được hiệu suất cao. Việc mở rộng hoặc thu hẹp băng thông hấp thụ giúp MA có nhiều ứng dụng như: thiết kế bộ tách sóng quang và pin mặt trời [46], thiết kế bộ phát nhiệt và cảm biến [47]. MMA thể hiện ưu thế vượt trội so với cấu trúc đơn lớp trong việc mở rộng dải tần, tăng cường hiệu suất cộng hưởng và linh hoạt chuyển đổi giữa hiệu ứng EIT và EIA nhờ cơ chế tương tác giữa

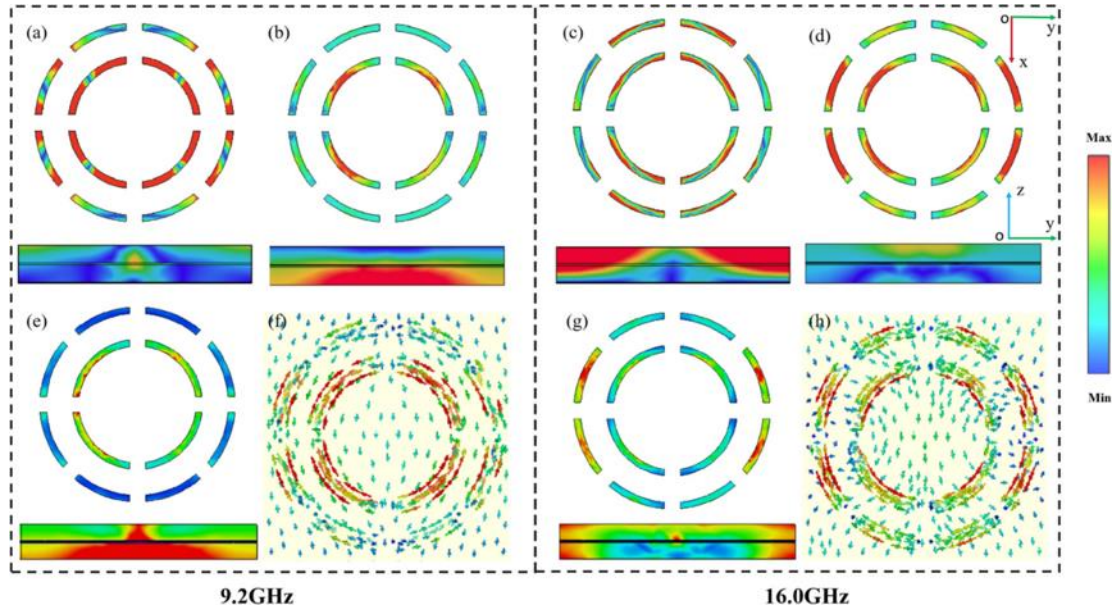
các lớp cộng hưởng. Tuy nhiên, sự phức tạp trong việc thiết kế và chế tạo cấu trúc đa lớp dẫn đến chi phí sản xuất cao và khó khăn trong việc đạt được độ chính xác ở kích thước nano/micro. Hơn nữa, khả năng điều khiển linh hoạt của các đặc tính hấp thụ sau chế tạo vẫn còn hạn chế, đặt ra thách thức lớn trong việc phát triển các thiết bị MMA trong ứng dụng thực tế.

1.2. Cơ chế hoạt động của vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ

1.2.1. Cộng hưởng điện và từ trong vật liệu biến hoá

MM mở ra một hướng phát triển mới trong kỹ thuật điều khiển sóng điện từ, nhờ khả năng tạo ra các tính chất điện từ đặc biệt mà vật liệu tự nhiên không có. Các cấu trúc MM được thiết kế và khai thác hiện tượng cộng hưởng điện và cộng hưởng từ trong cấu trúc vi mô của vật liệu, nhằm biến đổi hiệu quả các đại lượng như hằng số điện môi ϵ và từ thẩm μ .

Cộng hưởng điện (electric resonance) xuất phát từ việc các phần tử dẫn điện (như thanh kim loại) tương tác mạnh với thành phần điện trường trong sóng điện từ tới. Khi thiết kế cấu trúc với kích thước nhỏ hơn bước sóng tác động, dòng điện cưỡng bức được tạo ra dao động mạnh tại tần số cộng hưởng nhất định, dẫn tới việc hằng số điện môi hiệu dụng có thể âm ở một số dải tần số nhất định [48-49]. Nhờ điều này, vật liệu có thể hấp thụ, ngăn chặn hoặc dẫn truyền sóng điện từ một cách tùy chỉnh, là nền tảng của các ứng dụng như vật liệu hấp thụ siêu mỏng và thiết bị điều hướng sóng.



Hình 1.2. Phân bố dòng điện trường và dòng điện bề mặt ở tần số 9.2 GHz và 16.0 GHz, a, c phân bố điện trường; b, d phân bố từ trường; e, g phân bố trường tổn thất; f, h phân bố dòng điện bề mặt của mẫu kim loại và tấm đế kim loại trong cấu trúc MA [50].

Cộng hưởng từ (magnetic resonance) hình thành nhờ sự xuất hiện của dòng điện cảm ứng quay trong các phần tử hình vòng, đặc biệt là các cấu trúc như SRR, mạch vòng kín hoặc bán kín, khi tương tác với thành phần từ trường của sóng điện từ. Tại tần số cộng hưởng, các dòng xoáy này được khuếch đại mạnh, tạo ra từ trường cảm ứng thứ cấp đối kháng hoặc cùng chiều với từ trường ngoài, dẫn đến hiện tượng từ thẩm μ âm – một tính chất chưa từng xuất hiện ở vật liệu tự nhiên [51-52]. Khai thác cộng hưởng từ giúp tạo ra những hiệu ứng như chiết suất âm, truyền dẫn năng lượng không dây, hoặc hấp thụ hoàn toàn sóng điện từ.

MM được thiết kế với khả năng đồng thời có cả cộng hưởng điện lẫn từ trên cùng một cấu trúc, thậm chí có thể điều chỉnh để hai cộng hưởng này trùng hoặc dịch chuyển theo ý muốn thông qua tham số hình học và thành phần vật liệu chế tạo [53]. Khi cộng hưởng điện và từ diễn ra đồng thời tại một tần số, hiệu quả hấp thụ, truyền dẫn hoặc tán sắc sóng điện từ sẽ có thể được tối ưu vượt trội. Đây cũng là nguyên lý sản sinh các vật liệu có chỉ số khúc xạ âm và MA siêu mỏng với hiệu suất hoàn hảo, cũng như các thiết bị điều khiển sóng băng rộng hoặc đa tần [53-54].

1.2.2. Lý thuyết phối hợp trở kháng

Để hiểu về mặt vật lý cường độ hấp thụ của các mẫu, hệ số hấp thụ tuyến tính được tính toán để xác định phần trăm năng lượng hấp thụ vào. Tính toán được thực hiện như sau [55]:

$$S_{11}(\omega)_{linear} = 10^{S_{11}(\omega)_{dB}/20} \quad (1.1)$$

$$S_{21}(\omega)_{linear} = 10^{S_{21}(\omega)_{dB}/20} \quad (1.2)$$

$$A(\omega)_{linear} = 1 - |S_{21}(\omega)_{linear}|^2 - |S_{11}(\omega)_{linear}|^2 \quad A(\omega) = 1 - |S_{21}(\omega)|^2 - |S_{11}(\omega)|^2 \quad (1.3)$$

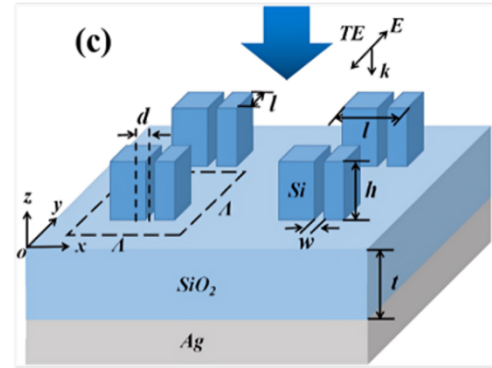
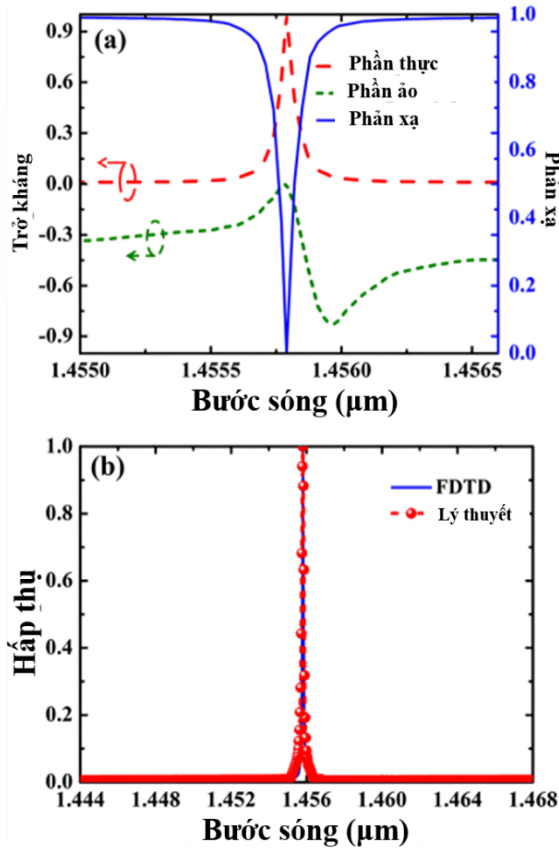
trong đó $S_{11}(\omega)_{dB}$ và $S_{21}(\omega)_{dB}$ lần lượt là phản xạ và truyền qua tính theo dB. Các tham số $S_{11}(\omega)_{linear}$, $S_{21}(\omega)_{linear}$ và $A(\omega)_{linear}$ lần lượt là hệ số phản xạ, hệ số truyền qua và hệ số hấp thụ.

Cơ chế hấp thụ của MA chủ yếu dựa trên hai yếu tố: sự phối hợp trở kháng và cơ chế tổn hao điện từ trong cấu trúc. Sự phối hợp trở kháng (impedance matching) nhằm điều chỉnh đặc tính điện từ của MA sao cho gần bằng với trở kháng sóng trong môi trường truyền, từ đó hạn chế tối đa hiện tượng phản xạ trên bề mặt và tăng cường khả năng truyền năng lượng vào bên trong lớp hấp thụ. Khi sóng điện từ đã đi vào vật liệu, năng lượng của nó sẽ tiếp tục bị tiêu hao thông qua các quá trình tổn hao nội tại, được

quyết định bởi thiết kế hình học và thông số điện từ của từng thành phần cấu trúc. Sự kết hợp đồng thời giữa cơ chế phối hợp trở kháng hiệu quả và mức tổn hao cao tạo nên khả năng hấp thụ mạnh mẽ đặc trưng của MA.

Trở kháng hiệu dụng của vật liệu biến hoá thường được tính dựa theo phép đo phản xạ và truyền qua, theo công thức sau [56]:

$$Z = \sqrt{[(1 + S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)] / [(1 - S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)]} \quad (1.4)$$



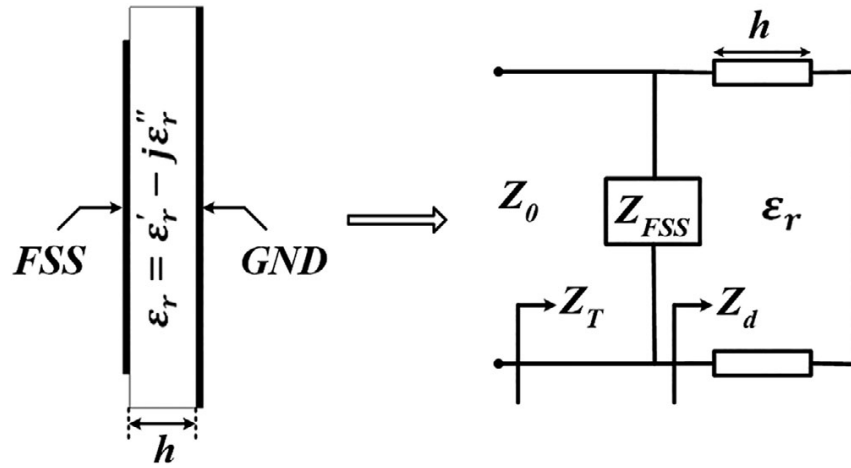
Hình 1.3. (a) Phổ trở kháng đầu vào và phản xạ của vật liệu biến hoá. (b) Kết quả phổ hấp thụ mô phỏng trên phần mềm FDTD Solutions và lý thuyết. (c) Mô hình cấu trúc vật liệu biến hoá [57].

Hình 1.3. Mô tả phổ trở kháng, phản xạ và phổ hấp thụ của một cấu trúc vật liệu biến hoá [57]. Như có thể thấy trong Hình 1.3a, cả phần thực và phần ảo của Z đều thay đổi đột ngột xung quanh đỉnh hấp thụ để đáp ứng điều kiện phối hợp trở kháng. Đặc biệt, phần thực của Z tiến tới 1, và phần ảo của Z có xu hướng tiến tới 0, và điều kiện phối hợp trở kháng hoàn hảo có thể đạt được ở bước sóng cộng hưởng.

Trở kháng của vật liệu biến hoá cũng có thể được tính toán dựa trên mô hình lý thuyết đường truyền. Trong đó, mô hình vật liệu biến hoá cấu tạo gồm kim loại – điện môi – kim loại có thể được tính toán theo lý thuyết như hình 1.4 [58].

Trong đó, lớp kim loại cộng hưởng phía trên (FSS) tương đương với mạch RLC, được biểu diễn thông qua trở kháng Z_{FSS} . Lớp điện môi ở giữa và lớp kim loại dưới cùng tương đương với các điện trở và đường truyền ngắn mạch, được biểu diễn thông qua trở kháng Z_d . Thông qua độ dày h và độ điện thẩm của lớp điện môi ϵ_d , trở kháng Z_d có thể được tính như sau:

$$Z_d = i \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_d}} \tan(k_0 \sqrt{\epsilon_d} h) \quad (1.5)$$



Hình 1.4. Mô hình cấu trúc vật liệu biến hoá gồm các lớp kim loại – điện môi – kim loại (a) và mô hình mạch điện tương đương (b) [58].

trong đó, Z_0 là trở kháng của không khí và k_0 là số sóng của không khí. Khi đó trở kháng của vật liệu biến hoá (Z_T) được coi là tổ hợp song song của 2 thành phần trở kháng Z_{FSS} và Z_d :

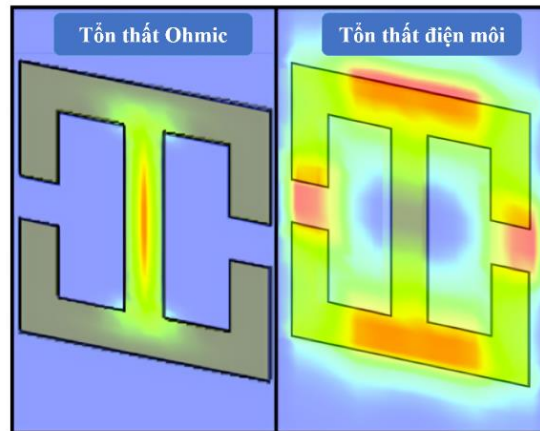
$$Z_T = Z_{FSS} // Z_d = \frac{Z_{FSS} Z_d}{Z_{FSS} + Z_d} \quad (1.6)$$

1.2.3. Tiêu tán năng lượng trong vật liệu biến hoá

Tiêu tán năng lượng trong MM ở lĩnh vực điện từ là quá trình chuyển đổi năng lượng của sóng điện từ thành nhiệt năng hoặc các dạng năng lượng phi điện từ khác. Đây là cơ chế nền tảng giúp MM được ứng dụng trong các thiết bị hấp thụ sóng điện từ, che chắn EMI, cảm biến nhiệt, và các thiết bị điều khiển năng lượng điện từ hiện đại. Trong các MA, năng lượng tiêu tán chủ yếu xảy ra thông qua ba cơ chế chính: tổn hao điện môi, tổn hao Ohmic và tổn hao từ, đôi khi kết hợp tạo ra hấp thụ tổng hợp (hybrid absorption).

Cơ chế đầu tiên là tổn hao điện môi (*dielectric loss*), xảy ra trong vật liệu nền không dẫn điện, nơi năng lượng bị tiêu tán khi các lưỡng cực phân cực (dipole) bị rung động hoặc sắp xếp lại dưới tác động của trường điện ngoài. Khi sóng điện từ tương tác với vật liệu, các lưỡng cực này dao động và mất năng lượng qua ma sát nội phân tử, sinh ra nhiệt. Hiệu ứng tổn hao này phụ thuộc vào phần ảo của hằng số điện môi (ϵ''), và thường có thể được điều chỉnh thông qua việc lựa chọn vật liệu nền (polymer, gốm composite,...). Hệ số tổn hao điện môi được xác định thông qua $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$, càng lớn thì mức tiêu tán càng cao [59].

Cơ chế thứ hai là tổn hao Ohmic (*Ohmic loss*), chủ yếu xảy ra tại các lớp kim loại mỏng (như vàng, bạc, đồng) của MA. Sóng điện từ khi tới lớp dẫn sẽ kích hoạt dòng điện cưỡng bức – đây là dòng điện bị ép dao động theo trường sóng tới. Quá trình này sinh nhiệt do điện trở của kim loại phía trong cấu trúc MA – một hiệu ứng tổn hao năng lượng được mô tả bởi định luật Joule ($P = I^2 R$). Các nghiên cứu cho thấy rằng trong vùng tần số vi sóng, terahertz và quang học, tổn hao Ohmic là một trong những cơ chế tiêu tán chủ đạo.



Hình 1.5. Tổn thất điện môi và tổn thất Ohmic trong vật liệu biến hóa [13]

1.3. Vật liệu biến hóa có cấu trúc đa lớp hấp thụ sóng điện từ

Trong số các hướng nghiên cứu về MM, cấu trúc MMA đã thu hút sự quan tâm đặc biệt nhờ khả năng điều chỉnh linh hoạt các đặc tính điện từ thông qua sự kết hợp của nhiều lớp chức năng có hình học, vật liệu và thông số khác nhau. Thông thường, MMA được thiết kế dưới dạng các lớp siêu mỏng với độ dày nhỏ hơn đáng kể so với bước sóng hoạt động, được sắp xếp theo thiết kế chồng lớp hoặc cấu trúc tuần hoàn. Mỗi lớp bao gồm vật liệu điện môi - kim loại, sự tương tác cộng hưởng và quá trình lai hóa giữa các lớp này tạo ra nhiều chế độ cộng hưởng kết hợp (hybrid modes), cho phép điều khiển có chọn lọc và chính xác các thông số điện từ quan trọng như biên độ, pha và trạng thái

phân cực của sóng tới. Khả năng tối ưu về thiết kế đã giúp MMA trở thành nền tảng đầy triển vọng cho các ứng dụng tiên tiến, đặc biệt trong hấp thụ sóng điện từ băng rộng, đa băng tần, cũng như trong phát triển các thiết bị điện từ thế hệ mới.

Khi sóng điện từ đi qua cấu trúc đa lớp này, hiệu ứng giao thoa, phản xạ, và truyền qua giữa các lớp đóng vai trò quyết định. Nhờ vậy, ta có thể tạo ra các tính chất như chiết suất âm, hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ... Cấu trúc MMA cho phép mở rộng dải tần số hoạt động [60-63], tăng cường hiệu suất hấp thụ [64-67], điều khiển phân cực và hướng lan truyền của sóng điện từ [68-71]. Những đặc điểm này khiến MMA trở thành nền tảng lý tưởng cho các ứng dụng tiên tiến như hấp thụ sóng điện từ như che chắn điện từ [72-74], tàng hình [75-76], cảm biến [77-79] và thiết bị điều hướng sóng trong các hệ thống điện từ và quang tử hiện đại [80-82].

1.3.1. Vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp hấp thụ sóng điện từ dải rộng

MMA là các MA được thiết kế gồm hai hay nhiều lớp vật liệu mỏng xếp chồng lên nhau, mỗi lớp có thể có thành phần, hình dạng hoặc cấu trúc vi mô khác nhau. Các lớp này có thể làm từ kim loại - điện môi hoặc vật liệu tổng hợp và được sắp xếp theo một cách tuần hoàn để tối ưu hóa tương tác với sóng điện từ.

MA được coi là có băng thông hấp thụ rộng khi nó có khả năng hấp thụ hiệu quả sóng điện từ trong một dải tần số rộng. Trong nghiên cứu về MA, FBW là viết tắt của Fractional Bandwidth (Độ bán rộng). Đây là một thông số quan trọng để đánh giá hiệu suất của vật liệu hoặc thiết bị hấp thụ sóng điện từ trong một dải tần số rộng:

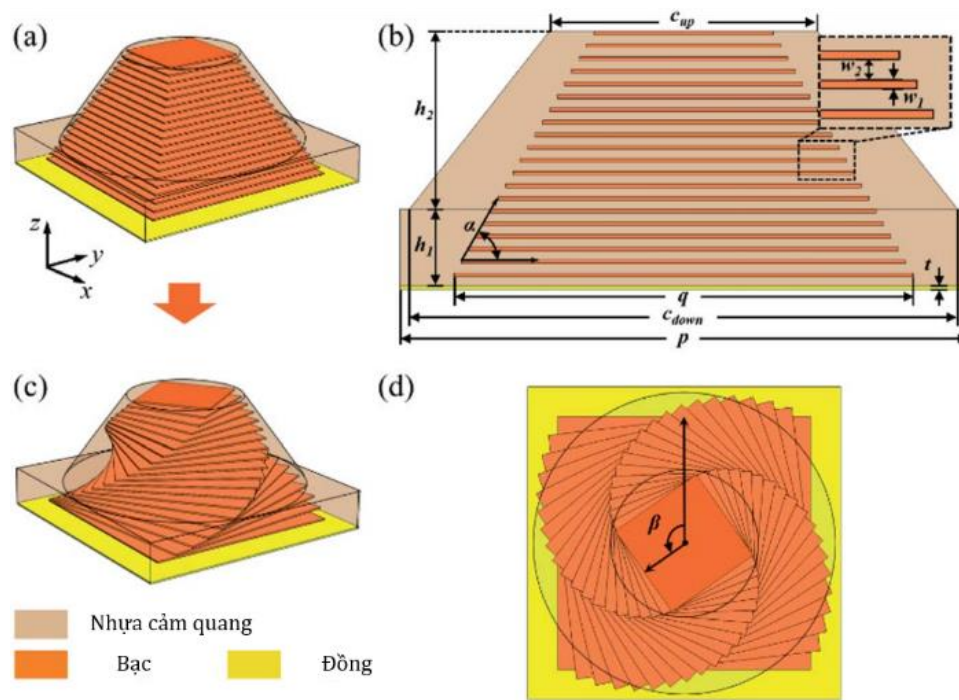
$$FBW = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\text{center}}} \times 100\% \quad (1.7)$$

Trong đó: $f_{\max}$ là tần số lớn nhất mà vật liệu có độ hấp thụ $>90\%$, $f_{\min}$ là tần số thấp nhất mà vật liệu có độ hấp thụ $>90\%$, f_{center} là tần số trung tâm của dải tần, được tính bằng trung bình cộng của $f_{\max}$ và $f_{\min}$. MMA được coi là băng thông rộng khi FBW lớn, thường từ 20% trở lên. FBW càng lớn, dải tần hấp thụ càng rộng.

Dựa trên nghiên cứu của Landy và các cộng sự về MPA [13], kể từ đó, các nhà khoa học trên thế giới đã đề xuất nhiều cấu trúc MA khác nhau. Trong một số trường hợp chẳng hạn như hấp thụ năng lượng mặt trời, MA cần có khả năng hấp thụ băng thông rộng. Một trong những phương pháp hiệu quả để mở rộng dải hấp thụ là khiến cho MA cộng hưởng ở một số tần số lân cận bằng cách sử dụng cấu trúc đa lớp. MMA bao gồm lớp kim loại liên tục dưới cùng, phía trên là 2 hay nhiều lớp kim loại – điện môi. Lớp kim loại cộng hưởng có thể được thiết kế với hình dạng hoặc kích thước khác nhau. Năm

2021, Deng và các cộng sự đã đề xuất cấu trúc MMA hấp thụ băng thông rộng có dạng xoắn [64].

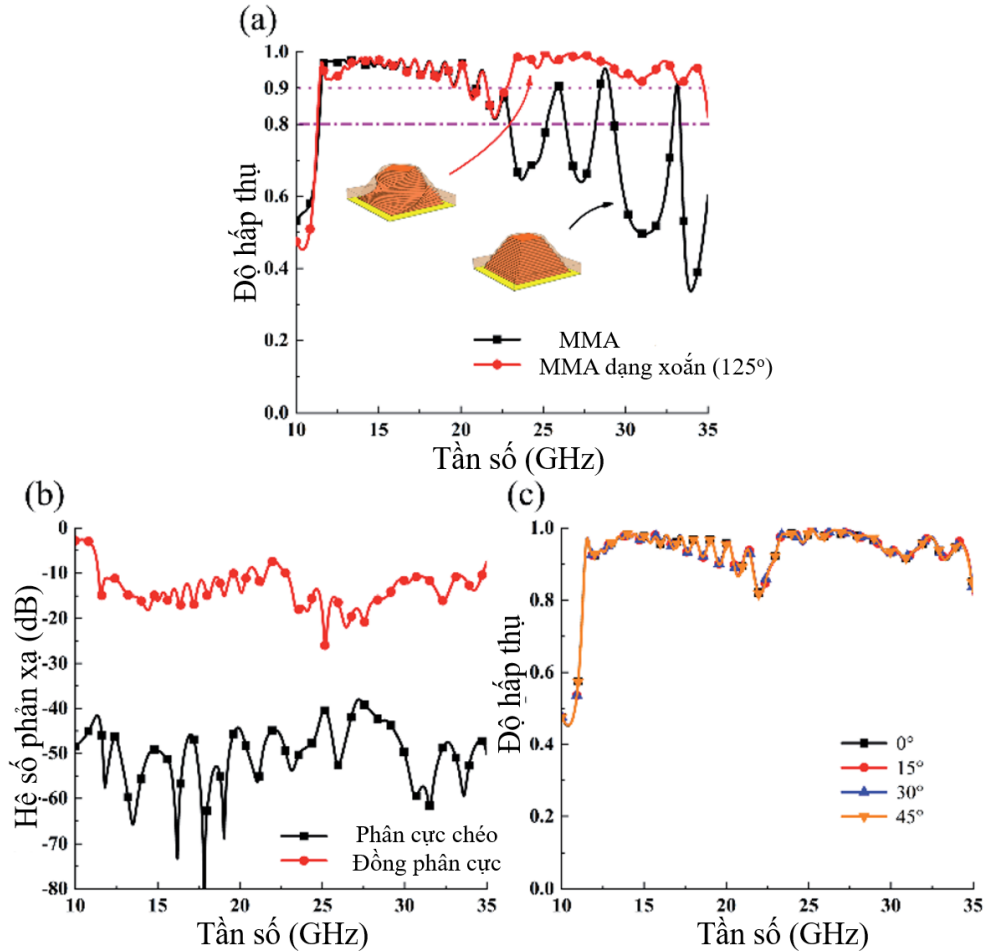
Hình 1.6 (a) cho thấy thiết kế ô cơ sở của MMA kim tự tháp gồm 20 lớp kim loại có độ dày w_1 . Các miếng kim loại được sắp xếp theo chiều dọc với góc nghiêng α và mỗi lớp được cách điện bằng một lớp điện môi dày w_2 . Hình 1.6 (c) mô tả ô cơ sở của MMA dạng xoắn sau khi xoay các lớp xếp chồng dọc theo trục đối xứng thẳng đứng với góc β . Hình 1.6 (b) trình bày các thông số cấu trúc chi tiết của MMA kim tự tháp với các giá trị tối ưu: $p = 8.9$, $q = 7.2$, $c_{down} = 8.8$, $c_{up} = 4.2$, $\alpha = 60^\circ$, $t = 0.017$, $w_1 = 0.02$, $w_2 = 0.18$, $h_1 = 1.2$ và $h_2 = 2.8$ mm. Hình 1.6 (d) mô tả góc nhìn từ trên xuống của MMA dạng xoắn. So với MMA, các lớp kim loại của MMA dạng xoắn đã quay ngược chiều kim đồng hồ với tổng góc là 125° , trong đó các lớp liền kề nhau của MMA dạng xoắn có góc quay lệch nhau gần 6.58° . Trong mô phỏng, các lớp kim loại được sử dụng là bạc có độ dẫn điện là $5.88 \times 10^5 \text{ Sm}^{-1}$, trong khi chất nền điện môi là nhựa cảm quang có hằng số điện môi tương đối là 2.9 và hệ số tổn thất là 0.02.



Hình 1.6. Sơ đồ thiết kế của MMA. (b) Hình ảnh nhìn từ bên ô cơ sở của MMA. (c) Thiết kế MMA dạng xoắn. (d) Hình ảnh nhìn từ trên xuống của MMA dạng xoắn [64]

Hình 1.7 (a) biểu diễn phổ hấp thụ mô phỏng của MMA và MMA dạng xoắn. Kết quả cho thấy rằng đối với vùng tần số thấp (11.39–20.46 GHz), phổ hấp thụ của MMA có độ hấp thụ duy trì trên 90%. Cấu trúc MMA dạng xoắn cũng có độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số 11.39-20.46 GHz như cấu trúc MMA. Tuy nhiên, cấu trúc này có

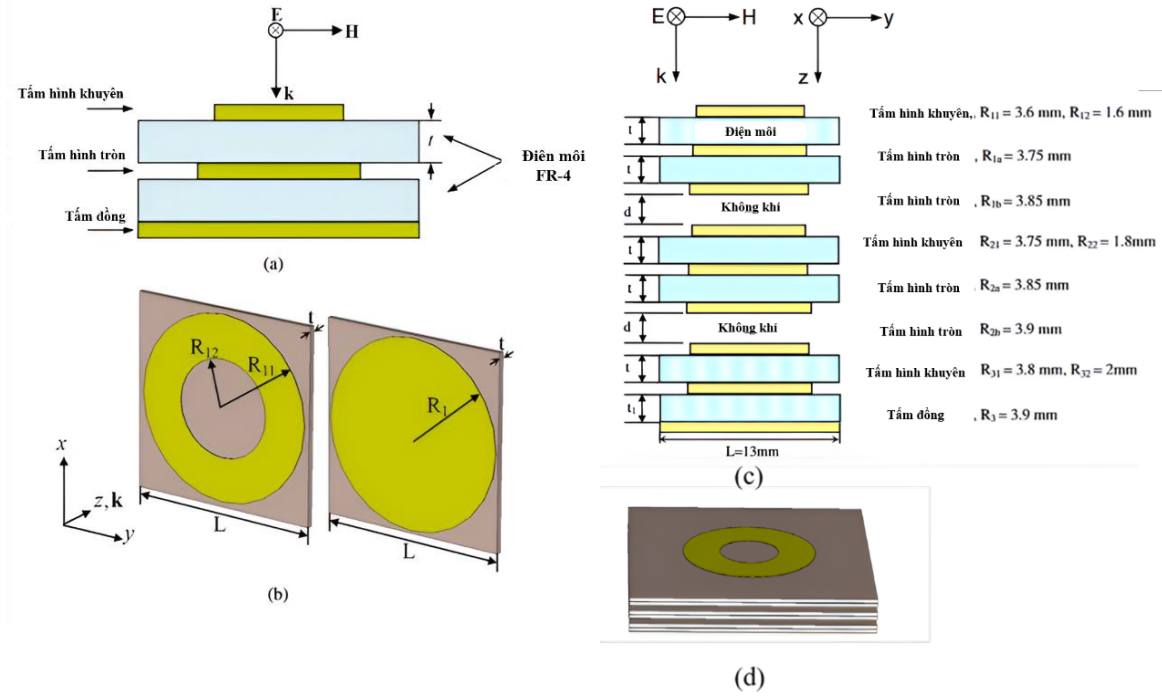
thêm một dải hấp thụ từ 22.76 đến 34.76 GHz với độ hấp thụ cao. Các hệ số phản xạ phân cực chéo và đồng phân cực mô phỏng được thể hiện trong Hình 1.7 (b) cho thấy độ chuyển đổi phân cực trong MMA dạng xoắn là không đáng kể. Hơn nữa, Hình 1.7 (c) cho thấy MMA dạng xoắn không chịu ảnh hưởng của phân cực sóng tới vì cấu trúc đa lớp vẫn đối xứng sau khi xoắn.



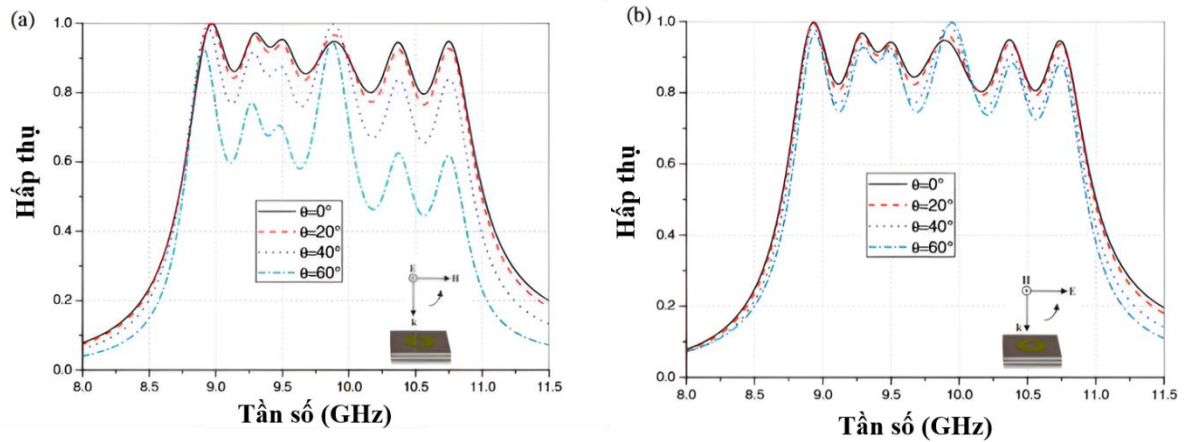
Hình 1.7. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng của MMA và MMA dạng xoắn, (b) Hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực chéo của MMA dạng xoắn, (c) Phổ hấp thụ của MMA dạng xoắn với các góc phân cực khác nhau [64].

Năm 2013, Wen. D và các cộng sự đã đề xuất một MA hấp thụ băng thông rộng dựa trên cấu trúc đa lớp [83]. Ưu điểm của MMA này là kích thước nhỏ, mỏng, có đặc tính phân cực tuyệt vời và thích ứng với góc tới rộng của sóng điện từ. Cấu trúc MMA băng thông rộng bao gồm ba cấu trúc nhỏ băng tần kép; mỗi cấu trúc nhỏ thể hiện hai tần số cộng hưởng để tạo thành phổ hấp thụ rộng khi xếp chồng lên nhau như Hình 1.8. Cấu trúc nhỏ băng tần kép kép giữa bao gồm một miếng hình khuyên kim loại và một miếng hình tròn kim loại. Bán kính của các miếng kim loại tạo thành mỗi cấu trúc nhỏ

là khác nhau để có tần số cộng hưởng khác nhau. Trong thiết kế cấu trúc, có các miếng kim loại hình tròn và một lớp không khí ở dưới cùng của mỗi cấu trúc nhỏ để tạo thành liên kết từ tính và tránh liên kết giữa các cấu trúc nhỏ. MMA bằng thông rộng có khả năng hấp thụ tốt trên 80% trong khoảng từ 8.8 đến 10.8 GHz, độ rộng phổ được đo tại điểm cường độ bằng một nửa cường độ cực đại FWHM là 23%.



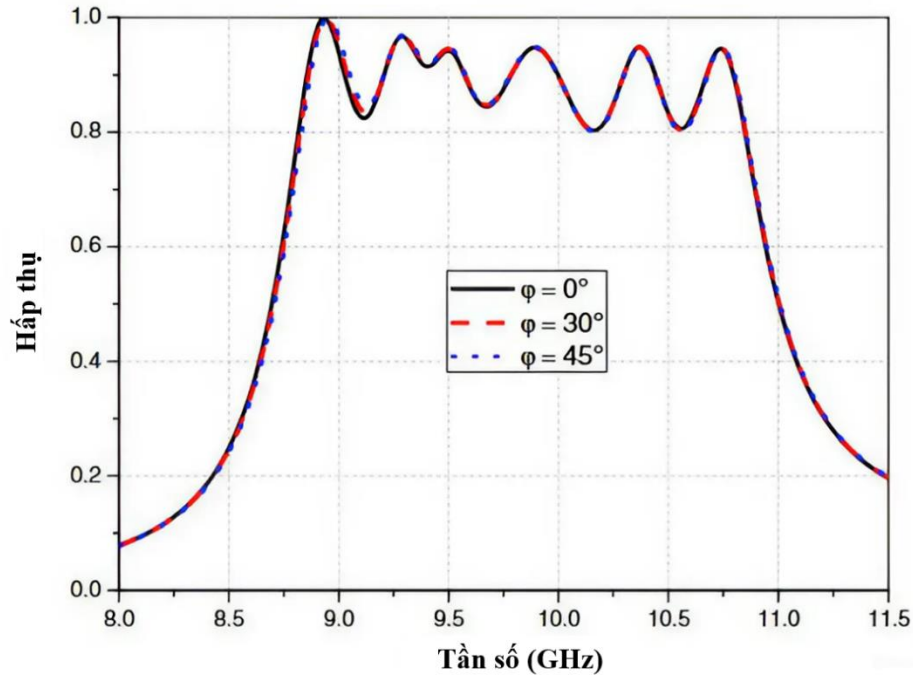
Hình 1.8. Thiết kế MMA bằng thông rộng [83]



Hình 1.9. Phổ hấp thụ của MMA ở (a) TE mode; (b) TM mode [83]

Hình 1.9 cho thấy kết quả mô phỏng các góc tới khác nhau đối với chế độ điện ngang (TE) và từ ngang (TM). Đối với chế độ TE, hệ số phản xạ tăng khi góc tới θ lớn hơn, chủ yếu là do thành phần từ trường song song với bề mặt của MA, thành phần này ngày càng nhỏ hơn khi θ tăng. Kết quả chỉ ra rằng MMA bằng thông rộng vẫn duy trì

hiệu suất tốt với độ hấp thụ trên 70% ở chế độ TE, khi θ nhỏ hơn 40° . Đối với chế độ TM, phổ hấp thụ gần như không thay đổi theo θ , vì vector từ trường vẫn song song với bề mặt của MA, tức là thành phần từ trường song song không thay đổi. Có thể thấy rằng MMA băng thông rộng có thể hoạt động tốt đối với sóng điện từ tới xiên trên phạm vi góc tới rộng.

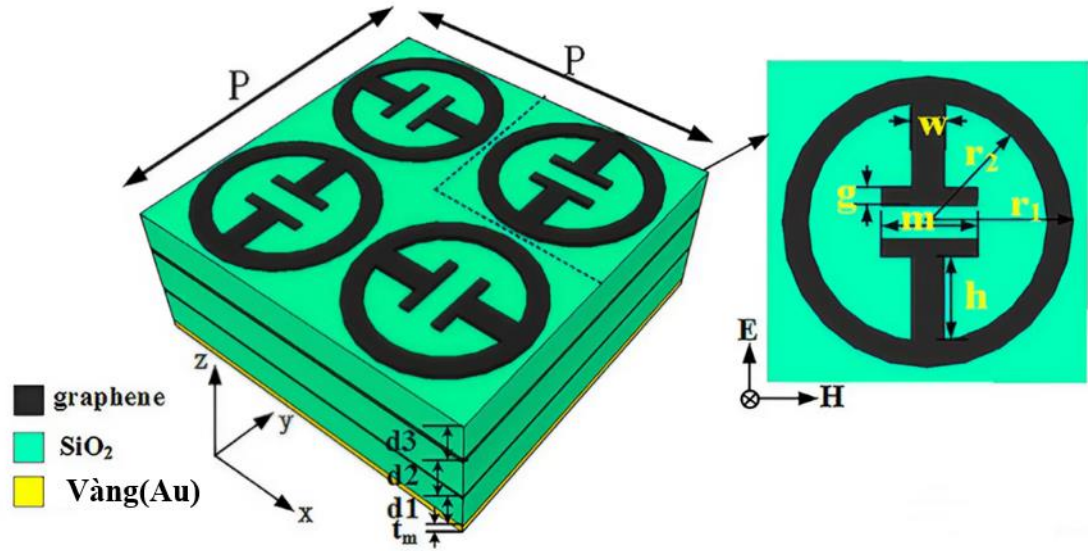


Hình 1.10. Phổ hấp thụ mô phỏng của MMA băng thông rộng với các góc phân cực khác nhau [83]

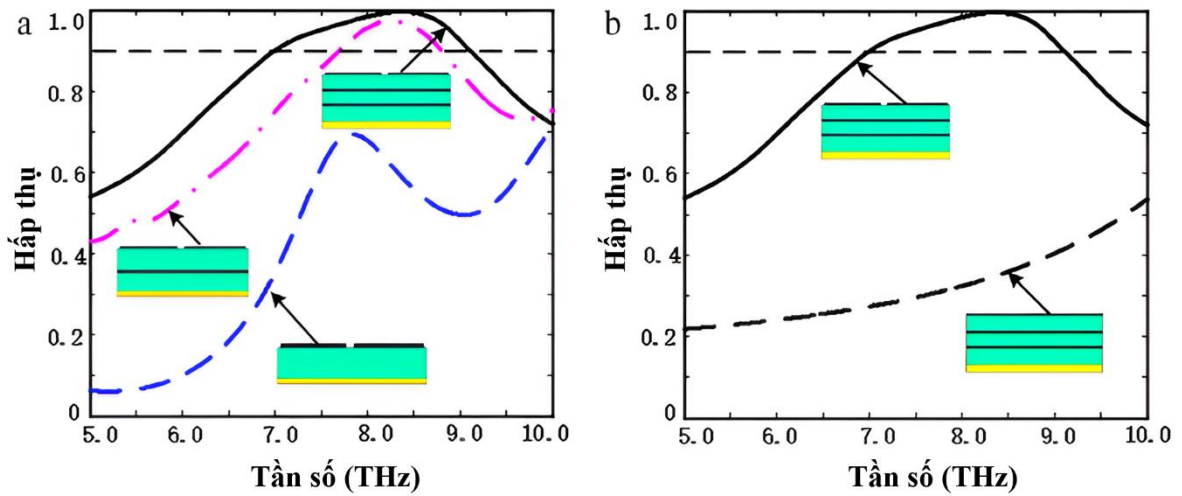
MMA băng thông rộng có cấu trúc đối xứng quay, do đó nó không nhạy với phân cực với sóng điện từ tới bình thường. Để chứng minh điều này, một vector trường điện được điều khiển quay các góc khác nhau φ quanh trục z trong mặt phẳng xy. Phổ hấp thụ mô phỏng của MMA băng thông rộng với các góc phân cực khác nhau được thể hiện trong hình 1.10. Đường liền là trạng thái của trường điện dọc theo trục x. Đường đứt nét và đường chấm biểu diễn vector trường điện quay 30° và 45° theo chiều kim đồng hồ trong mặt phẳng xy. Kết quả so sánh đã chứng minh rằng cấu trúc không nhạy cảm với phân cực với sóng điện từ tới bình thường.

Trong các nghiên cứu hiện nay, MMA hoạt động tại vùng tần THz ngày càng nhận được nhiều sự quan tâm. Năm 2018, Fu P. đã đề xuất cấu trúc MMA hấp thụ tại vùng THz [84]. Mẫu vật được thiết kế gồm các màng graphene tuần hoàn đặt trên lớp điện môi SiO_2 , phía dưới cùng là tấm kim loại vàng liên tục (hình 1.11). Trong cấu trúc này, mẫu graphene trên cùng bao gồm một vòng graphene và hai dải graphene hình chữ “T”. Bán kính ngoài r_1 và bán kính giữa r_2 của vòng graphene lần lượt là $1\ \mu\text{m}$ và 0.6

μm . Để ngăn chặn sự truyền qua, tấm nền là kim loại vàng có độ dẫn $\sigma_{\text{gold}} = 4.56 \times 10^7$ S/m, có độ dày t_m là $0.2 \mu\text{m}$. Trong mô phỏng số, graphene được mô hình hóa như một môi trường hiệu dụng có độ dày $t_g = 1 \text{ nm}$



Hình 1.11. Mô phỏng cấu trúc vật liệu biến đổi có cấu trúc đa lớp được đề xuất. Các thông số hình học của cấu trúc là: $P = 5 \mu\text{m}$, $w = 0.3 \mu\text{m}$, $g = 0.15 \mu\text{m}$, $m = 0.8 \mu\text{m}$, $h = 0.4 \mu\text{m}$ [84].



Hình 1.12. (a) Phổ hấp thụ của cấu trúc vật liệu biến đổi được thiết kế với các lớp graphene khác nhau; (b) Với các lớp trên cùng khác nhau [84].

Từ Hình 1.12(a), có thể quan sát thấy rằng cấu trúc MA graphene đơn lớp không cho kết quả độ hấp thụ cao. Khi tăng số lớp graphene lên 2, dải hấp thụ trở nên rộng hơn và độ hấp thụ tăng lên. Phổ hấp thụ của MMA được thiết kế được thể hiện rõ trong Hình 1.12(a). Điều này cho thấy có một tương tác mạnh giữa các tấm graphene, và độ rộng phổ hấp thụ cho mỗi cộng hưởng là kết quả của sự tương tác giữa các lớp cấu trúc lân cận, chúng chồng lấn lên nhau và trải rộng trên một vùng tần số rộng trong dải Terahertz.

Trong Hình 1.12(b), MMA có cấu trúc 3 lớp, với lớp trên cùng khác nhau. Có thể thấy rõ từ Hình 1.12(b) rằng hiệu ứng hấp thụ tương ứng với lớp graphene liên tục đơn thuần nhỏ hơn nhiều so với hiệu ứng hấp thụ tương ứng với mẫu graphene thiết kế hoa văn trên cùng. Điều này cho thấy rằng sự kết hợp của các mẫu graphene này có tác động đáng kể đến việc đạt được độ hấp thụ cao.

1.3.2. Vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp đa chức năng

Ngoài việc sử dụng để thu được tính vật liệu hấp thụ sóng điện từ băng thông rộng, MMA còn được sử dụng để thu được hiệu ứng tăng cường độ hấp thụ ở một số tần số khác nhau [67]. Hiệu ứng tăng cường khả năng hấp thụ của MMA có thể thu được nhờ sự chuyển đổi giữa hiệu ứng EIT (truyền qua cảm ứng điện từ) và EIA (hấp thụ cảm ứng điện từ).

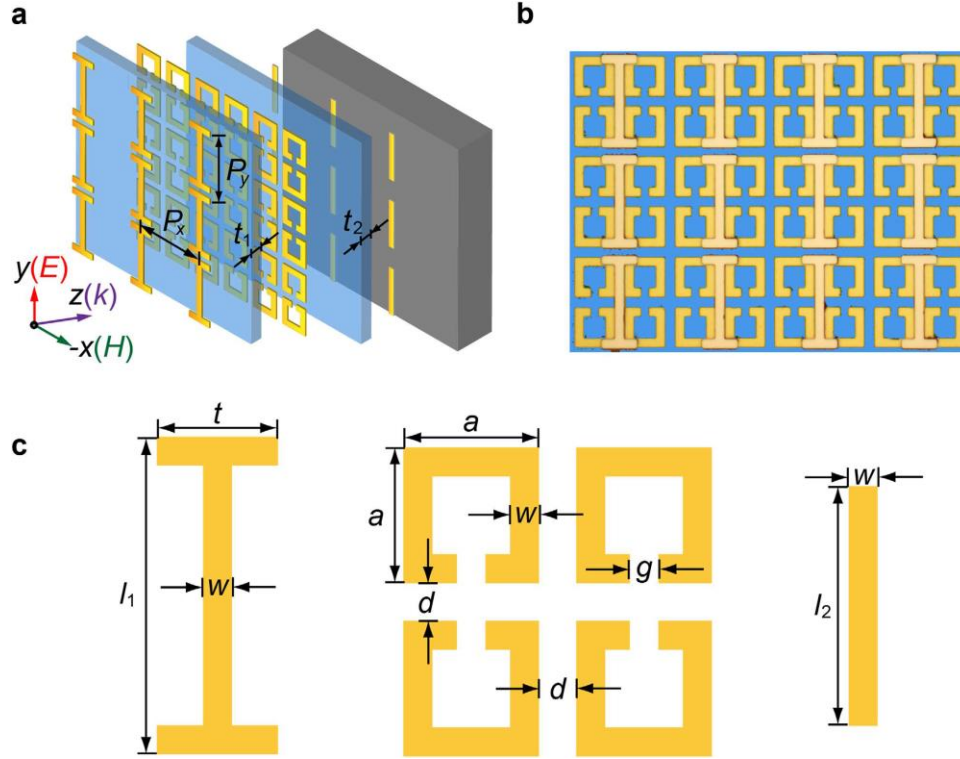
Hiệu ứng EIT trong MM là một hiện tượng trong đó vật liệu trở nên trong suốt ở một dải tần số cụ thể nhờ sự tương tác giữa các mode dao động điện từ. Sự giao thoa giữa các mode này tạo ra một “cửa sổ trong suốt” trong phổ hấp thụ vật liệu.

Hiệu ứng EIA là hiện tượng mà một môi trường hấp thụ mạnh hơn ở một dải tần số cụ thể khi có sự can thiệp của trường điện từ bên ngoài. Trong MM, hiệu ứng EIA có thể được tạo ra bằng cách thiết kế các cấu trúc cộng hưởng điện từ đặc biệt. Khi sóng điện từ tương tác với vật liệu này, các mode cộng hưởng có thể gây ra sự hấp thụ tăng cường tại một bước sóng cụ thể.

Hiệu ứng truyền qua cảm ứng điện từ (EIT) có nguồn gốc ban đầu là hiện tượng phi tuyến quang học làm cho môi trường trở nên trong suốt trong một phạm vi quang phổ hẹp xung quanh một vạch hấp thụ. Sự tán sắc mạnh cũng được tạo ra tại vùng "cửa sổ" truyền qua dẫn đến khả năng "làm chậm ánh sáng". Về bản chất, đây là hiệu ứng giao thoa lượng tử cho phép ánh sáng, mà vốn bị hấp thụ bởi một môi trường nguyên tử, có thể truyền qua được [85]. Các đặc tính tán sắc và vận tốc ánh sáng có thể được thay đổi thông qua hiệu ứng EIT, hiệu ứng này cũng có các ứng dụng quan trọng trong các thiết bị làm chậm ánh sáng, thiết bị phi tuyến, cảm biến, bộ lọc và bộ lưu trữ quang học [86-88]. EIA và EIT là một cặp hiện tượng bổ sung cho nhau [89] và EIT được gây ra bởi sự giao thoa triệt tiêu. Để có được hiện tượng EIA tương tự, sự giao thoa triệt tiêu phải được chuyển đổi thành sự giao thoa tăng cường.

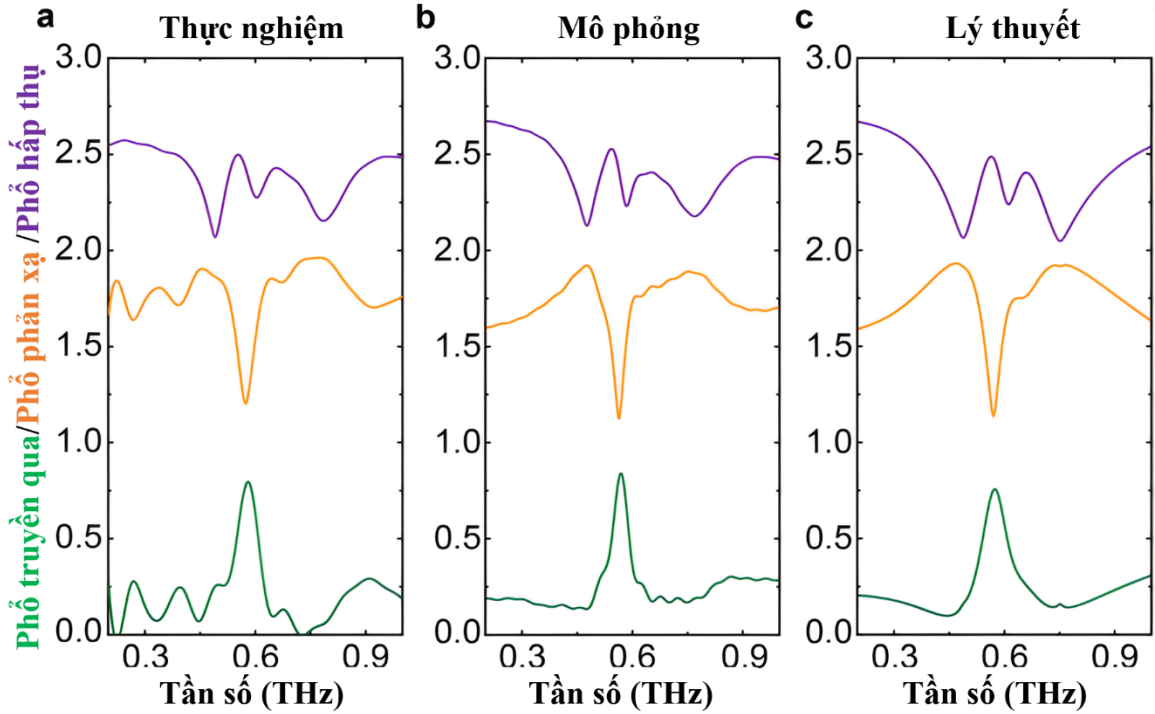
Năm 2015, Zhang và các cộng sự đã đề xuất một cấu trúc MMA hấp thụ EIA gồm ba cấu trúc cộng hưởng dựa trên hiệu ứng EIT [90]. Hiệu ứng EIT là kết quả của sự tương tác ghép cặp giữa một cấu trúc cộng hưởng sáng và một cấu trúc cộng hưởng tối, trong đó sự giao thoa triệt tiêu của các chế độ cộng hưởng tạo ra một “cửa sổ” truyền

qua gần như hoàn hảo trong một dải hấp thụ rộng. Ngược lại với sự giao thoa triệt tiêu của các cấu trúc cộng hưởng EIT tương tác ghép cặp, sự giao thoa tăng cường của các quãng đường kích thích khác nhau sẽ dẫn đến một hiện tượng hấp dẫn mới, cụ thể là EIA. Thay vì một “cửa sổ” truyền qua, một cộng hưởng hấp thụ được tạo ra trong hệ thống EIA.



Hình 1.13. Sơ đồ mẫu và hình ảnh hiển vi. (a) Sơ đồ của ô cơ sở vật liệu biến hoá EIA ba lớp. (b) Hình ảnh của mẫu EIA được chế tạo trên một chất nền silicon và điện môi được làm từ polyimide. (c) Mô hình của từng cấu trúc cộng hưởng. $P_x = P_y = 120 \mu\text{m}$, $t_1 = t_2 = 10 \mu\text{m}$, $l_1 = 110 \mu\text{m}$, $l_2 = 83 \mu\text{m}$, $t = 42 \mu\text{m}$, $w = 10 \mu\text{m}$, $a = 47 \mu\text{m}$, $d = 13 \mu\text{m}$ và $g = 10 \mu\text{m}$ [90].

Hình 1.13a minh họa mô hình của một ô cơ sở của MMA có ba lớp được kích thích ở góc tới bình thường bởi sóng điện từ terahertz. MA bao gồm ba loại cấu trúc cộng hưởng, cụ thể là cấu trúc hình chữ I ở lớp trên cùng, cấu trúc bốn SRR ở lớp giữa và cấu trúc dây cắt ở lớp dưới cùng. Mỗi lớp bề mặt meta liền kề được cách nhau bởi một polyimide dày $10 \mu\text{m}$, do đó độ dày tổng thể của mẫu chỉ là $20 \mu\text{m}$ (trừ chất nền). Hình 1.13b hiển thị hình ảnh hiển vi của mẫu chế tạo và cho thấy sự căn chỉnh chính xác giữa các cấu trúc cộng hưởng ba lớp. Hình 1.13c minh họa thiết kế với các thông số hình học. Cấu trúc có thể được coi là một môi trường hiệu quả và khoảng cách gần của các lớp cũng đảm bảo sự tương tác ghép cặp trường gần giữa các cấu trúc cộng hưởng [91].

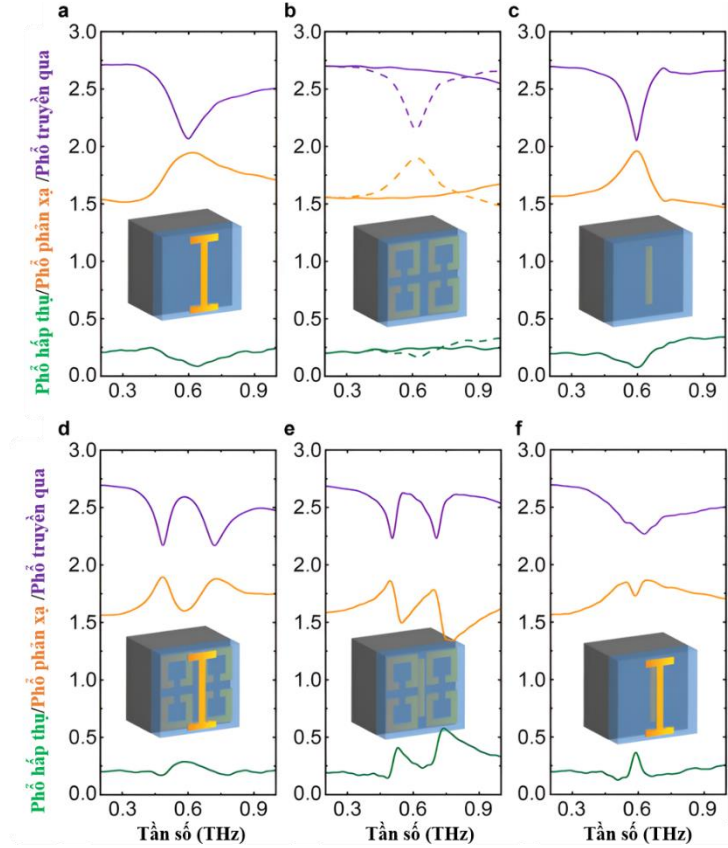


Hình 1.14. Phổ truyền qua, phản xạ và hấp thụ. (a) Phổ thực nghiệm, (b) phổ mô phỏng và (c) phổ lý thuyết về truyền qua (màu tím), phản xạ (màu cam) và hấp thụ (màu xanh lá cây) dưới sóng phân cực y [90].

Các mô phỏng số về tính chất điện từ của cấu trúc MM EIA đã được thực hiện bằng phần mềm CST Microwave Studio. Các kết quả mô phỏng phù hợp tốt với các phép đo thực nghiệm, như thể hiện trong Hình 1.14. Để khám phá thêm hiệu ứng tương tác ghép cặp giữa các cấu trúc cộng hưởng trong một ô cơ sở, các mô phỏng bổ sung đã được thực hiện trên các cấu trúc cộng hưởng riêng lẻ và kết hợp theo cặp hai cấu trúc cộng hưởng. Hình 1.15 trình bày các phổ truyền qua, phản xạ và hấp thụ được mô phỏng của các cấu trúc khác nhau dưới sự phân cực y (đường cong liền) và phân cực x (đường cong đứt nét trong Hình 1.15b). Sóng tới phân cực theo hướng y kích thích trực tiếp các cấu trúc cộng hưởng hình chữ I và dây cắt (Hình 1.15a, c) trong khi cấu trúc cộng hưởng bốn SRR không thể được kích thích trực tiếp (xem Hình 1.15b).

Khi cấu trúc cộng hưởng hình chữ I và bốn SRR (Hình 1.15d), hoặc cấu trúc cộng hưởng dây cắt và bốn SRR (Hình 1.15e) được kết hợp với nhau, phổ truyền qua EIT điển hình được quan sát thấy với cửa sổ truyền qua rõ rệt. Do đó, cấu trúc cộng hưởng hình chữ I và dây cắt hoạt động như các chế độ sáng vì chúng được kích thích trực tiếp bởi trường tới, trong khi cấu trúc cộng hưởng bốn SRR hoạt động như cấu trúc cộng hưởng chế độ tối vì chúng được kích thích bởi sự tương tác trường gần từ các cấu trúc cộng hưởng chế độ sáng. Hơn nữa, điều thú vị là khi hai cấu trúc cộng hưởng sáng được xếp tầng với nhau (xem Hình 1.15f), một cộng hưởng rộng hơn nhưng yếu hơn sẽ xảy ra.

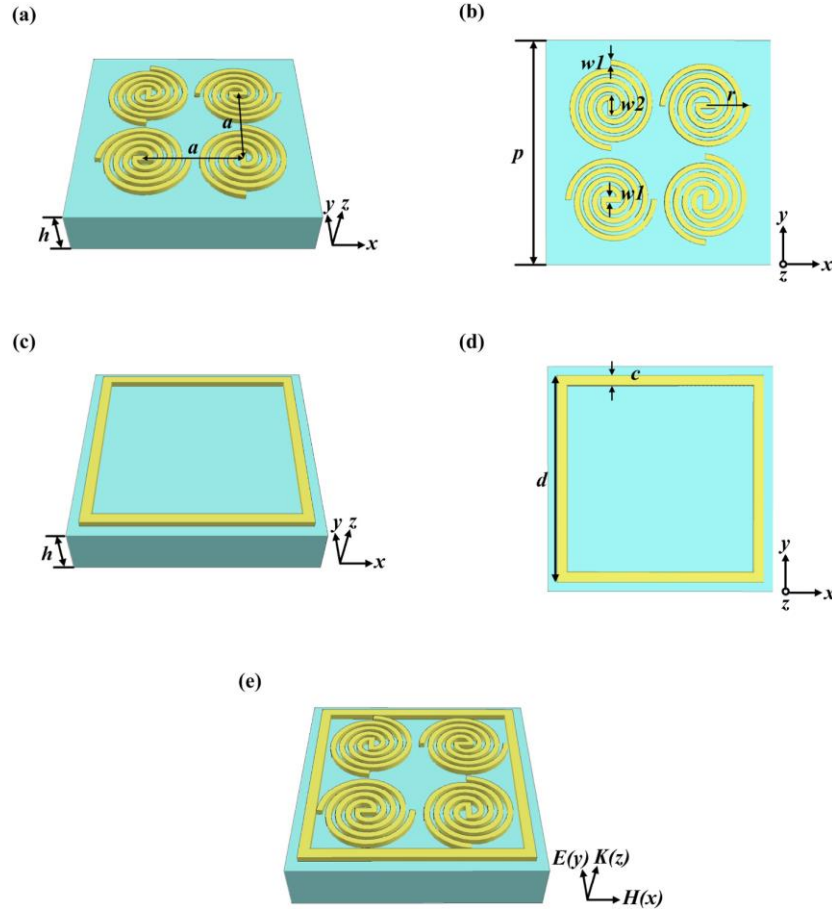
Tuy nhiên, không có phổ hấp thụ nào trong Hình 1.15 hiển thị cộng hưởng hấp thụ mạnh như trong hệ ba cấu trúc cộng hưởng, mặc dù các trường hợp trong Hình 1.15e, f cho thấy cường độ hấp thụ nhỏ. Do đó, hiệu ứng EIA trong MMA 3 lớp được đề xuất thực sự là do sự tương tác theo chiều dọc giữa cả ba cấu trúc cộng hưởng.



Hình 1.15 Kết quả mô phỏng của các cấu trúc cộng hưởng riêng lẻ và nối tiếp. Phổ truyền qua (màu tím), phản xạ (màu cam) và hấp thụ (màu xanh lá cây) của các cấu trúc cộng hưởng riêng lẻ (a–c) và ba trường hợp của hai cấu trúc cộng hưởng kết hợp (d–f). Tần số cộng hưởng của các cấu trúc cộng hưởng trong (a–c) lần lượt là 0,6, 0,6 và 0,62 THz. Tất cả các đường cong liền đều thu được dưới sóng phân cực y tới theo phương vuông góc, trong khi các đường cong đứt nét trong (b) thu được dưới sóng phân cực x tới theo phương vuông góc [90].

Năm 2022, Dong H. và các cộng sự dựa trên lý thuyết sáng-tối-giả tối, đã đề xuất một cấu trúc MMA bao gồm một cấu trúc cộng hưởng hình vuông và xoắn ốc Archimedes kép làm chế độ sáng và chế độ tối tương ứng [67]. Hiệu ứng EIT do các cấu trúc cộng hưởng của hai chế độ cộng hưởng này tạo ra có đỉnh truyền qua là 71.4% ở 0.45 THz. Ngoài ra, quá trình chuyển đổi từ EIT sang EIA được thực hiện bằng cách điều chỉnh khoảng cách tương tác giữa hai phần. Để tăng cường hơn nữa khả năng hấp thụ, bốn cấu trúc cộng hưởng vòng (SRR) được thêm vào làm chế độ gần tối. Cấu trúc MMA này đã thu được đỉnh hấp thụ cao là 0.8969 ở 0.412 THz. Cấu trúc MMA được đề

xuất có thể đạt được cả hiện tượng EIT và EIA và có các đặc tính không nhạy cảm với phân cực.

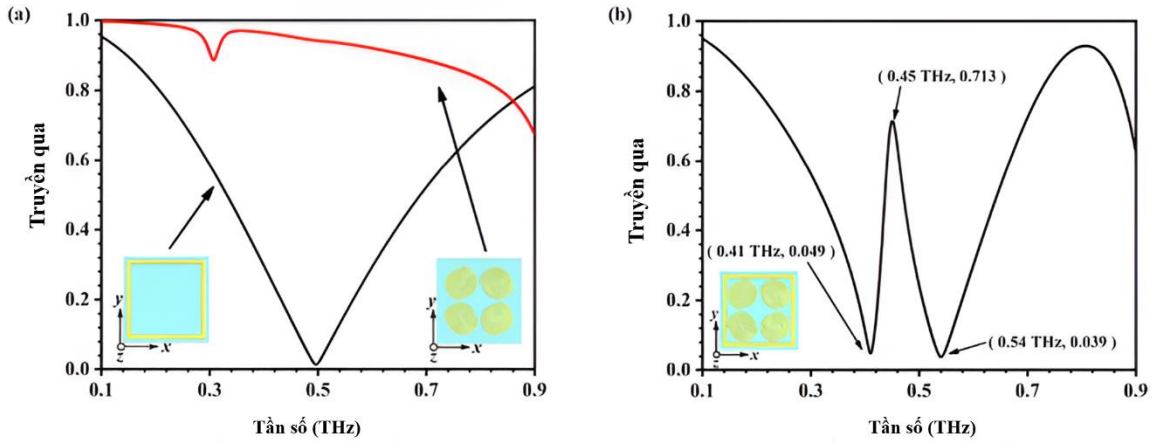


Hình 1.16. Sơ đồ của vật liệu biến hoá EIT một lớp, (a) góc nhìn ba chiều của cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc, (b) góc nhìn từ trên xuống của cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc, (c) góc nhìn ba chiều của cấu trúc cộng hưởng hình vuông, (d) góc nhìn từ trên xuống của cấu trúc cộng hưởng hình vuông và (e) góc nhìn ba chiều của vật liệu biến hoá EIT một lớp [67].

Các chế độ tối được minh họa trong Hình 1.16(a) và (b), chế độ sáng được thể hiện trong Hình 1.16(c) và (d), và MM EIT một lớp được trình bày trong Hình 1.16(e). Cấu trúc mô-đun bao gồm một cấu trúc cộng hưởng hình vuông và bốn cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc. MM được phủ trên một chất nền làm bằng polyimide (hằng số điện môi là 3). Kim loại được sử dụng là vàng, độ dày của nó là $0.2 \mu\text{m}$. Các thông số khác của MM EIT một lớp được liệt kê trong Bảng 1.1.

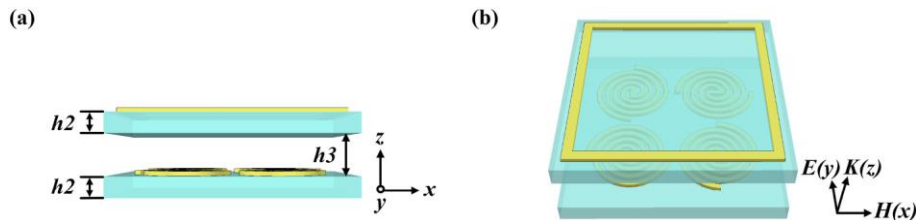
Đơn vị	Giá trị (μm)	Đơn vị	Giá trị (μm)	Đơn vị	Value (μm)	Đơn vị	Giá trị (μm)
p	120.0	a	50.0	$w2$	10.5	c	5.0
h	10.0	$w1$	2.9	r	6.0	d	109.0

Bảng 1.1. Kích thước hình học của vật liệu biến hoá EIT một lớp [67].



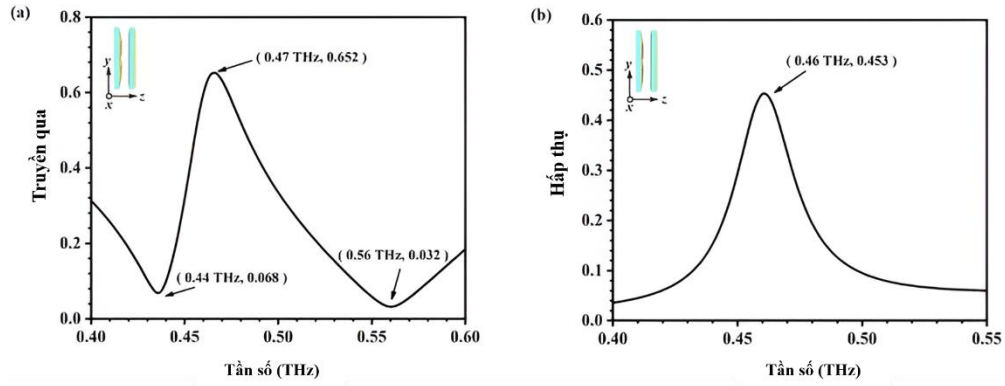
Hình 1.17. Phổ truyền qua của (a) cấu trúc cộng hưởng vuông (đường màu đen) và bốn cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc (đường màu đỏ) và (b) vật liệu biến hoá EIT có cấu trúc một lớp [67].

Phần mềm mô phỏng được sử dụng trong bài báo này là HFSS, phổ truyền qua của cấu trúc cộng hưởng vuông và bốn cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc được nghiên cứu trong Hình 1.17. Đối với cấu trúc cộng hưởng vuông, cộng hưởng rộng ở 0.5 THz được kích thích trực tiếp bởi sóng THz tới khi trường điện phân cực dọc theo trục y và trường từ phân cực dọc theo trục x. Tuy nhiên, trong cùng điều kiện kích thích, bốn xoắn ốc không thể được kích thích bởi ánh sáng chiếu vuông góc, vì vậy bốn cấu trúc cộng hưởng này dưới dạng chế độ tối chỉ có thể tạo ra cộng hưởng yếu ở 0.3 THz. Như được thể hiện trong Hình 1.17(b), hai chế độ này là tương tác được tạo ra để hình thành cấu trúc EIT và một đỉnh truyền qua bằng thông hẹp được hình thành ở 0.45 THz với giá trị đỉnh là 0.713. Có hai điểm đáy truyền qua ở 0.41 THz và 0.54 THz và các giá trị độ dốc lần lượt là 0.049 và 0.039.



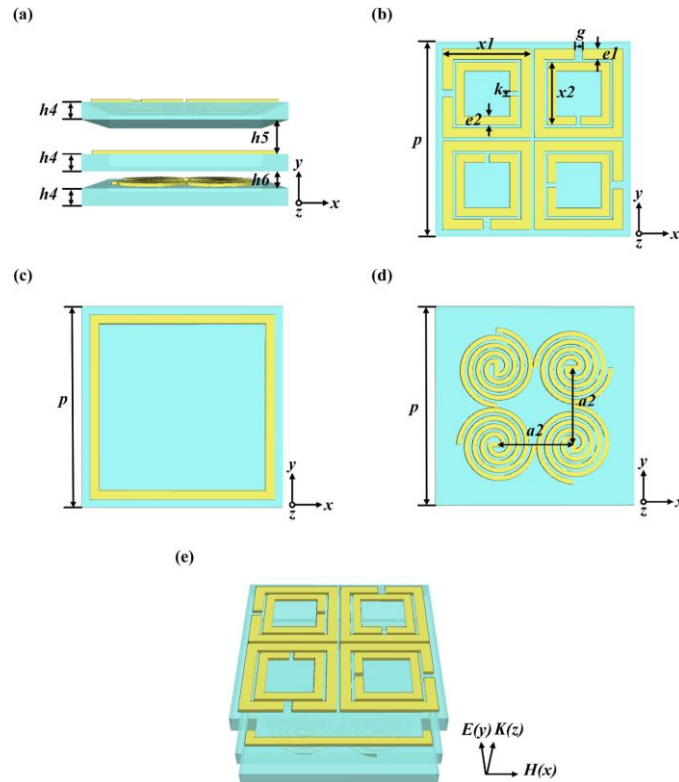
Hình 1.18. Vật liệu biến hoá EIA hai lớp, (a) góc nhìn từ bên cạnh và (b) góc nhìn ba chiều [67].

Trong bài báo này, bằng cách tách hai cấu trúc (cấu trúc cộng hưởng vuông và bốn cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc) trong hai lớp chất nền điện môi, khoảng cách tương tác giữa 2 lớp là $h_3 = 2 \mu\text{m}$ được đưa vào để thực hiện chuyển đổi từ giao thoa triệt tiêu sang giao thoa tăng cường. Cấu trúc EIA hai lớp được thể hiện trong Hình 1.18. Và độ dày của chất nền trong MA này được điều chỉnh thành $h_2 = 3.5 \mu\text{m}$.



Hình 1.19. Phổ truyền qua và hấp thụ của vật liệu biến hoá EIA hai lớp ($h_3=2\text{ }\mu\text{m}$), (a) truyền qua và (b) hấp thụ [67].

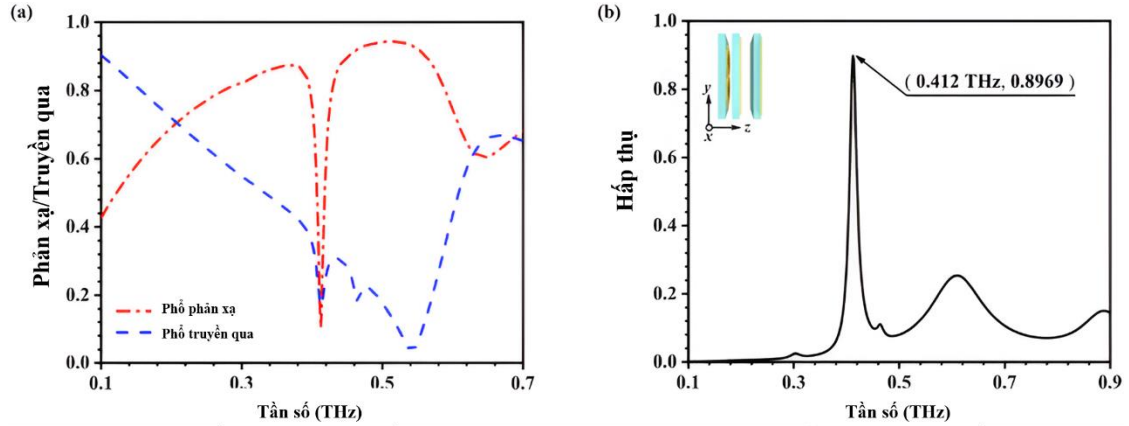
Đặc tính điện từ của cấu trúc EIA hai lớp được minh họa trong Hình 1.19(a), và Hình 1.19(b) cho thấy đặc tính hấp thụ của cấu trúc EIA hai lớp. Trong phổ truyền qua, có một đỉnh truyền qua đạt 65.2% tại 0.47 THz và hai đáy đạt là 6.8% và 3.2% tại 0.44 THz và 0.56 THz. Trong phổ hấp thụ, có một đỉnh hấp thụ tại 0.46 THz là 45.3%. Từ đó có thể thấy rằng MM EIT có thể chuyển đổi thành EIA bằng cách đưa vào khoảng cách h_3 giữa các lớp.



Hình 1.20. Sơ đồ của vật liệu biến hoá EIA ba lớp, (a) góc nhìn từ bên của vật liệu biến hoá EIA ba lớp, (b) góc nhìn từ trên xuống của bốn SRR lồng nhau, (c) góc nhìn từ trên xuống của cấu trúc cộng hưởng hình vuông, (d) góc nhìn từ trên xuống của cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc và (e) góc nhìn ba chiều của vật liệu biến hoá EIA ba lớp [67].

Đơn vị	Giá trị (μm)	Đơn vị	Giá trị (μm)	Đơn vị	Giá trị (μm)	Đơn vị	Giá trị (μm)
h_4	5.0	a_2	23.0	x_2	35.0	g	5.0
h_5	27.0	p	120.0	e_1	6.0	k	3.0
h_6	3.0	x_1	54.0	e_2	5.0		

Bảng 1.2. Kích thước hình học chi tiết của vật liệu biến hoá EIA ba lớp [67].



Hình 1.21. Phổ phản xạ, truyền qua và hấp thụ của vật liệu biến hoá EIA ba lớp khi $h_5=27\ \mu\text{m}$, $h_6=3\ \mu\text{m}$, (a) phản xạ và truyền qua, và (b) hấp thụ [67].

Với mục đích tăng cường độ hấp thụ của MMA, các chế độ gần-tối được thêm vào, có thể kết hợp với cả chế độ sáng và tối, do đó đạt được giao thoa triệt tiêu tốt hơn. Như thể hiện trong Hình 1.20, các chế độ gần tối được phủ trên lớp điện môi trên cùng, bao gồm bốn SRR hình vuông lồng nhau. Góc nhìn bên và ba chiều của cấu trúc EIA ba lớp được thể hiện trong Hình 1.20(a) và (e), các chế độ gần tối được thể hiện trong Hình 1.20(b), chế độ sáng được hiển thị trong Hình 1.20(c) và các chế độ tối được trình bày trong Hình 1.20(d). Các thông số chi tiết của MMA được liệt kê trong Bảng 1.2.

Khi bốn SRR lồng nhau được thêm vào, EIT có thể được chuyển đổi thành EIA. Khi khoảng cách h_5 giữa các SRR lồng nhau và cấu trúc cộng hưởng hình vuông là $27\ \mu\text{m}$, khoảng cách h_6 giữa cấu trúc cộng hưởng hình vuông và bốn cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc là $3\ \mu\text{m}$, có thể thu được đỉnh hấp thụ tại $0.412\ \text{THz}$, với giá trị đỉnh là 89.69% . Phổ phản xạ và truyền qua được minh họa trong Hình 1.21(a), và các đặc tính hấp thụ được thể hiện trong Hình 1.21(b). So với vật liệu biến hoá EIA hai lớp, cường độ hấp thụ của vật liệu biến hoá EIA ba lớp đã được cải thiện rất nhiều.

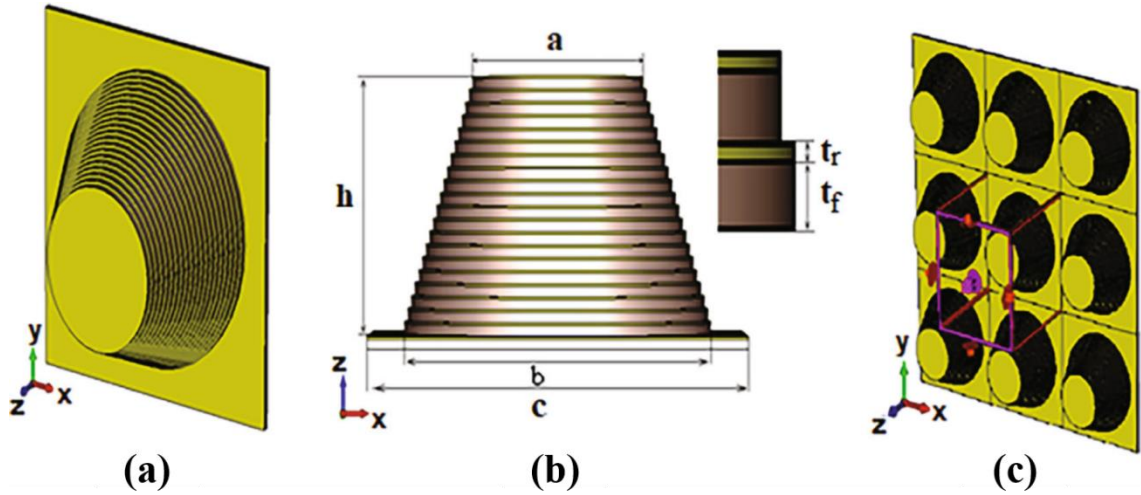
Nghiên cứu về MMA tại Việt Nam vẫn còn khá mới mẻ và chưa thực sự phổ biến so với các quốc gia có nền khoa học công nghệ tiên tiến. Tuy nhiên, một số nghiên cứu liên quan đến MM và ứng dụng của chúng đã bắt đầu được thực hiện tại các viện nghiên cứu và trường đại học lớn ở Việt Nam [92-93].

1.3.3. Một số ứng dụng của vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp hấp thụ sóng điện từ.

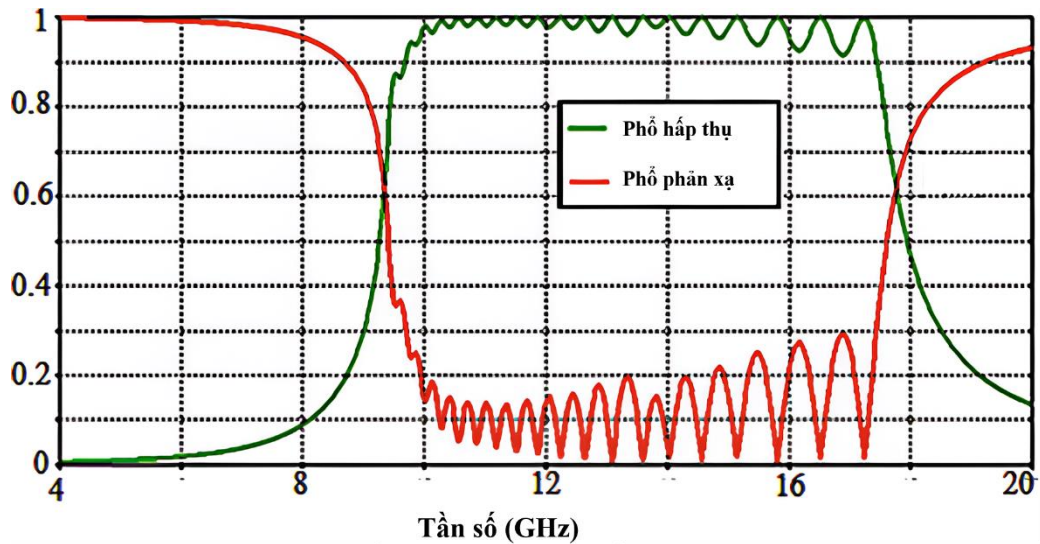
MA có thể được thiết kế bằng cách sử dụng các cấu trúc nhiều lớp bao gồm nhiều vật liệu khác nhau để định dạng một vật liệu hấp thụ và tăng cường khả năng hấp thụ của chúng [94-95] hoặc để cung cấp khả năng che chắn chống lại bức xạ điện từ [96]. Các vật liệu biến hoá này tận dụng những tiến bộ trong công nghệ và khoa học vật liệu để đạt được các đặc tính mong muốn của chúng. Các cấu trúc nhiều lớp cụ thể được sử dụng trong MA có thể khác nhau, tùy thuộc vào ứng dụng dự định và thiết bị điện từ đang được sử dụng. Việc sử dụng các cấu trúc nhiều lớp khác nhau trong vật liệu biến hoá mang lại cơ hội cho các thiết kế tùy chỉnh và tối ưu hóa để đáp ứng các yêu cầu cụ thể. Thông qua việc lựa chọn tỉ mỉ thành phần lớp, độ dày, cấu trúc và cách sắp xếp, các nhà nghiên cứu có thể kiểm soát được các đặc tính điện từ của vật liệu hấp thụ vật liệu biến hoá. Tính linh hoạt này tạo điều kiện thuận lợi cho việc phát triển các vật liệu hấp thụ có các đặc điểm phù hợp, chẳng hạn như khả năng hấp thụ cao hơn trong các dải tần số cụ thể hoặc hiệu suất được nâng cao trong các môi trường cụ thể. Các vật liệu hấp thụ vật liệu biến hoá thông thường chủ yếu nhằm mục đích đạt được khả năng hấp thụ hoàn hảo theo một hướng duy nhất, điều này đặt ra những hạn chế đối với các ứng dụng thực tế của chúng.

Năm 2024, Bağmancı M. và các cộng sự đã đề xuất một cấu trúc MMA ứng dụng trong hấp thụ năng lượng và tàng hình [97]. Trong nghiên cứu này, cấu trúc được đề xuất bao gồm các hình nón bậc thang kim loại-điện môi nhiều lớp. Sơ đồ của cấu trúc 3D được đề xuất, bao gồm 20 lớp tròn có bán kính khác nhau, được thể hiện trong Hình 1.22 (a). Phía sau của cấu trúc MA là 1 tấm kim loại liên tục để ngăn chặn sự truyền qua. Một ô cơ sở của MA đa lớp được thể hiện trong Hình 1.22 (b). Kim loại được sử dụng trong MMA là đồng, có độ dẫn điện là $\sigma = 5 \times 10^7$ S/m. Lớp điện môi được chọn là FR-4, có hằng số điện môi và tan tổn thất lần lượt là $\epsilon_r = 4.3$ và $\tan \delta = 0.025$.

Có thể thấy trong hình 1.23 rằng mỗi lớp bao gồm kim loại đồng và FR-4 tạo ra một đỉnh hấp thụ trong phổ hấp thụ với độ hấp thụ trên 98% trong dải tần số 10–17.5 GHz. Dải tần số tương ứng với sự hấp thụ tối đa bao gồm một phần của băng tần X; do đó, cấu trúc được đề xuất có khả năng ứng dụng cho công nghệ tàng hình.



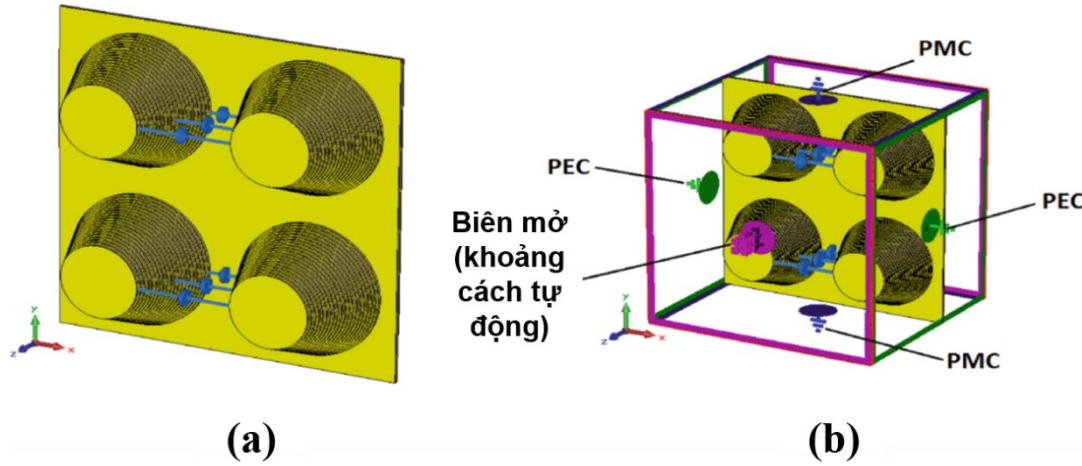
Hình 1.22 (a) Góc nhìn 3D của bộ hấp thụ, (b) góc nhìn bên của bộ hấp thụ và kích thước ô đơn vị (hình chèn bên phải) và (c) điều chỉnh mô phỏng làm điều kiện biên. Kích thước của một ô cơ sở là $a=5\text{ mm}$, $b=8.99\text{ mm}$, $c=11\text{ mm}$, $h=5\text{ mm}$, $t_r=0.05\text{ mm}$ và $t_f=0.2\text{ mm}$ [97].



Hình 1.23 Phổ phản xạ và hấp thụ của bộ hấp thụ được đề xuất [97]

Cấu trúc được đề xuất có thể được sử dụng để thu năng lượng vì nó có khả năng hấp thụ hầu hết năng lượng tới trong một dải tần số rộng. Cấu trúc vật liệu biến hoá sử dụng để hấp thụ năng lượng được thể hiện lần lượt trong Hình 1.24 (a), (b). Cơ chế chuyển đổi năng lượng trong cấu trúc MMA đề xuất được thực hiện thông qua quá trình hấp thụ cộng hưởng và tích hợp các phần tử điện trở tập trung. Các tải điện trở được bố trí kết nối giữa bốn cấu trúc chóp kim loại liền kề nhau nhằm tối ưu hóa hiệu suất chuyển đổi năng lượng. Cụ thể, ba tải điện trở được đặt xen kẽ tại các vị trí nối giữa các lớp kim loại tương ứng của từng chóp, bao gồm: một tải nối giữa các mép lớp đồng ở lớp đáy, một tải nối giữa các lớp đồng ở phần trung tâm, và một tải nối giữa các lớp đồng ở phần

đỉnh của cấu trúc chóp. Khi sóng điện từ trong đi vào cấu trúc MMA, các lớp kim loại và điện môi được thiết kế với hiệu ứng phối hợp trở kháng, giúp sóng được hấp thụ hiệu quả thay vì bị phản xạ. Quá trình này sinh ra dòng điện cảm ứng trong các lớp kim loại, dẫn đến tiêu tán Ohmic – một phần năng lượng bị chuyển hóa thành nhiệt. Tuy nhiên, để khai thác năng lượng hấp thụ, các điện trở được gắn giữa các lớp hình nón sẽ đóng vai trò như tải điện, tiếp nhận dòng cảm ứng và chuyển hóa năng lượng điện từ thành điện năng có thể sử dụng. Nhờ thiết kế hình học đa lớp và vị trí điện trở tối ưu, cấu trúc MMA này không chỉ đạt hiệu suất hấp thụ cao mà còn có khả năng chuyển đổi năng lượng hiệu quả.



Hình 1.24. Cấu trúc đề xuất với các tải điện trở (a) ô cơ sở và (b) điều kiện biên [97]

Để giải thích cơ chế vật lý của bộ hấp thụ, hiệu suất chuyển đổi (CE), hấp thụ (AE) và thu năng lượng (HE) được tính toán bằng cách sử dụng các Phương trình (1) – (3) được đưa ra bên dưới. Hiệu suất chuyển đổi xác định một phần công suất xuyên thấu (PA) có thể được chuyển thành công suất điện bằng cách sử dụng điện trở tập trung (PR).

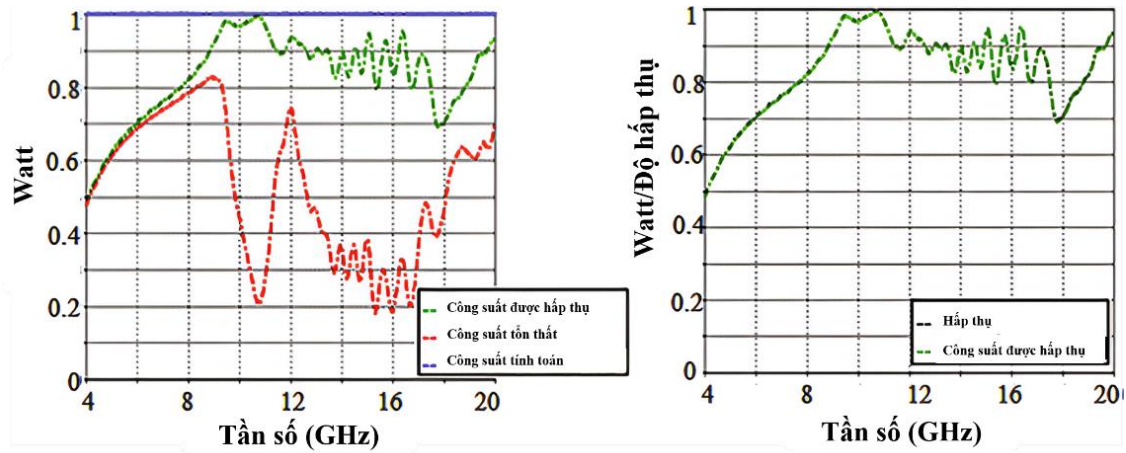
$$CE = \left(\frac{PR}{PA} \right) \times 100 \quad (1.8)$$

Hiệu suất thu năng lượng biểu thị công suất mô phỏng (PS) có thể được chuyển đổi thành công suất điện (PR) bằng cách sử dụng điện trở tập trung.

$$HE = \left(\frac{PR}{PS} \right) \times 100 \quad (1.9)$$

Hiệu suất hấp thụ là phần trăm công suất của sóng tới được vật liệu hấp thụ thành công. Do đó, nó là tỷ lệ giữa công suất được chấp nhận (PR) và công suất mô phỏng (PA).

$$AE = \left(\frac{PA}{PS} \right) \times 100 \quad (1.10)$$

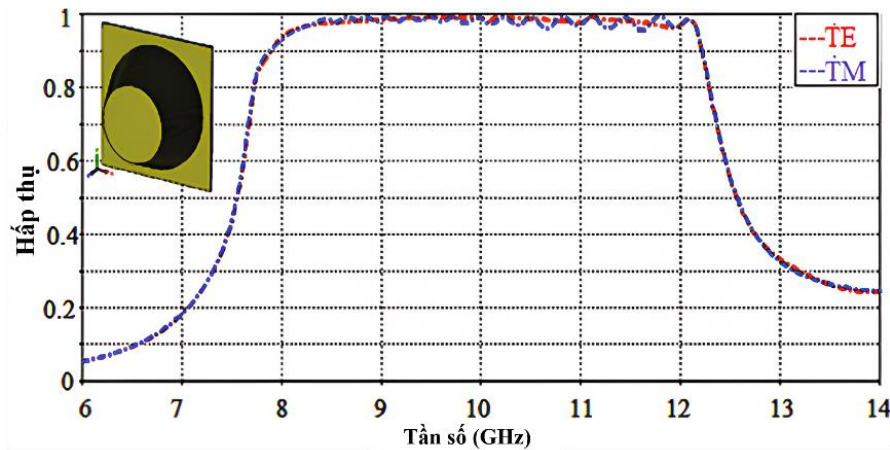


Hình 1.25. Công suất tổn thất, công suất được hấp thụ, công suất được tính toán [97]

Giá trị của mỗi điện trở trong mô phỏng được chọn là $250\ \Omega$ để đáp ứng điều kiện phối hợp trở kháng. Hình 1.25 thể hiện công suất tổn thất, công suất được hấp thụ, công suất được tính toán. Có thể thấy rằng công suất được hấp thụ và độ hấp thụ có biên độ bằng nhau, với hiệu suất trong phạm vi 50%–83% trong phạm vi 4 và 8.5 GHz. Hình 1.25 cho thấy cấu trúc truyền công suất được truyền đến các tải điện trở với rất ít tổn thất. Do đó, cấu trúc có thể được sử dụng như một máy thu năng lượng ngay cả trong dải tần số thấp hơn này, mặc dù dải tần số này không nằm trong băng thông của cấu trúc hấp thụ. Điều đó có nghĩa là hiệu suất chuyển đổi (CE) rất cao trong khoảng tần số này ($CE > 90\%$). Trong phạm vi 8.50–11.50 GHz, mặc dù tần số của công suất được hấp thụ là khoảng 90%, nhưng công suất tiêu thụ thì không nhiều như vậy. Như thể hiện trong Hình 1.25, sự hấp thụ và công suất được hấp thụ thông qua tất cả các cấu trúc cộng hưởng đều có độ lớn bằng nhau đối với tất cả các tần số trong phạm vi hoạt động của cấu trúc. Điều này có nghĩa là cấu trúc được đề xuất có các đặc điểm hấp thụ hoàn hảo. Ngoài ra, việc tăng số lượng điện trở có thể làm tăng tổng tổn thất công suất trong cấu trúc. Do đó, có thể kết luận rằng hiệu quả thu năng lượng của cấu trúc có thể được cải thiện bằng cách tăng số lượng các phần tử tập trung.

Cấu trúc được đề xuất có thể được ứng dụng trong công nghệ tàng hình của cấu trúc đề xuất cho radar quân sự trong băng tần X (theo dõi tầm ngắn, dẫn đường tên lửa, lập bản đồ, radar hàng hải và đánh chặn trên không) được nghiên cứu. Vì cấu trúc đề xuất có khả năng hấp thụ cao với các đặc tính phân cực và độc lập góc, nên nó có thể hữu ích cho các ứng dụng tàng hình trong băng tần X với tần số hoạt động từ 8 đến 12 GHz. Để hoạt động trong băng tần X, cấu trúc đề xuất được hiển thị trong Hình 1.22B phải được thay đổi kích thước. Các kích thước được thay đổi như sau: $a = 7\text{ mm}$, $b = 10.99\text{ mm}$ và $c = 13\text{ mm}$ sẽ đảm bảo rằng cấu trúc đề xuất hoạt động trong băng tần X

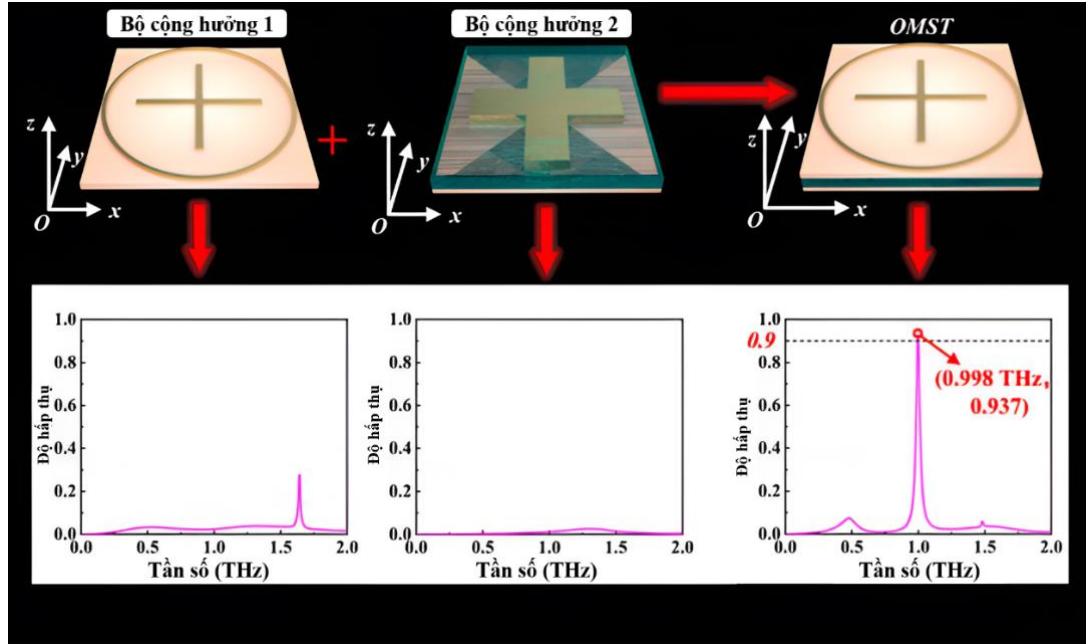
và không cần phải thay đổi các kích thước khác. Biểu đồ hấp thụ của cấu trúc đã sửa đổi cho radar băng tần X được minh họa trong Hình 1.26. Cấu trúc có độ hấp thụ cao trong khoảng từ 8 đến 12 GHz cho cả trường hợp chế độ TE và TM. Mặc dù mức hấp thụ là khoảng 93% ở một số tần số, nhưng mức hấp thụ ở góc tới bình thường thường cao hơn 95% trong dải tần số 8–12 GHz. Ứng dụng trong tàng hình cũng không phụ thuộc vào phân cực trong băng tần X cho các chế độ TE và TM. Do đó, cấu trúc này là lý tưởng cho các công nghệ tàng hình và tàng hình trong tương lai với hiệu suất cao và không phụ thuộc vào phân cực.



Hình 1.26. Phổ hấp thụ của cấu trúc sau khi thay đổi kích thước đối với chế độ TE và TM [97].

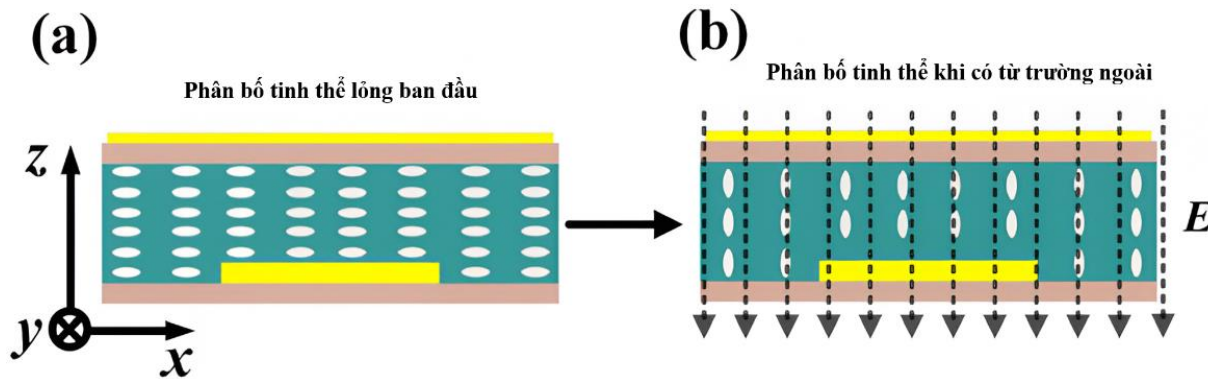
Trong một nghiên cứu khác, Liu và các cộng sự đã đề xuất một cấu trúc MA origami (OMST), thực hiện chuyển đổi truyền qua cảm ứng điện từ (EIT) thành hấp thụ cảm ứng điện từ (EIA) và thực hiện chức năng cảm biến độ cong có thể điều chỉnh của tinh thể lỏng (CS) bằng cách sử dụng EIA [98]. Cơ chế hoạt động của cảm biến độ cong dựa trên MMA đề xuất được xây dựng trên sự kết hợp giữa hiện tượng EIA, cấu trúc gấp nếp origami và khả năng điều chỉnh điện môi bằng tinh thể lỏng. Trong cấu trúc này, hai lớp cộng hưởng được bố trí trên lớp nền polyimide linh hoạt, với lớp trên tạo ra hiện tượng EIT và lớp dưới đóng góp vào quá trình chuyển đổi sang EIA, giúp tăng cường khả năng hấp thụ tại tần số cộng hưởng. Khi cấu trúc bị uốn cong, khoảng cách và góc giữa các lớp cộng hưởng thay đổi, dẫn đến sự dịch chuyển tần số cộng hưởng và thay đổi cường độ hấp thụ, từ đó cho phép đo lường độ cong. Ngoài ra pha và biên độ của tương tác giữa hai cộng hưởng thay đổi, làm giảm cường độ cộng hưởng từ trường (magnetic resonance) và giảm cường độ hấp thụ do sự suy yếu của tương tác cộng hưởng ngược pha giữa các lớp kim loại. Bên cạnh đó, lớp tinh thể lỏng nematic được tích hợp giữa hai tầng cộng hưởng có thể điều chỉnh hướng phân tử dưới tác động của điện trường ngoài, làm thay đổi hằng số điện môi hiệu dụng và tăng độ nhạy của cảm biến. Nhờ sự

phối hợp giữa các yếu tố cấu trúc và vật liệu, cảm biến này đạt độ nhạy cao trong vùng tần số THz.



Hình 1.27. Quá trình chuyển đổi từ EIT đến EIA và phổ hấp thụ tương ứng [98]

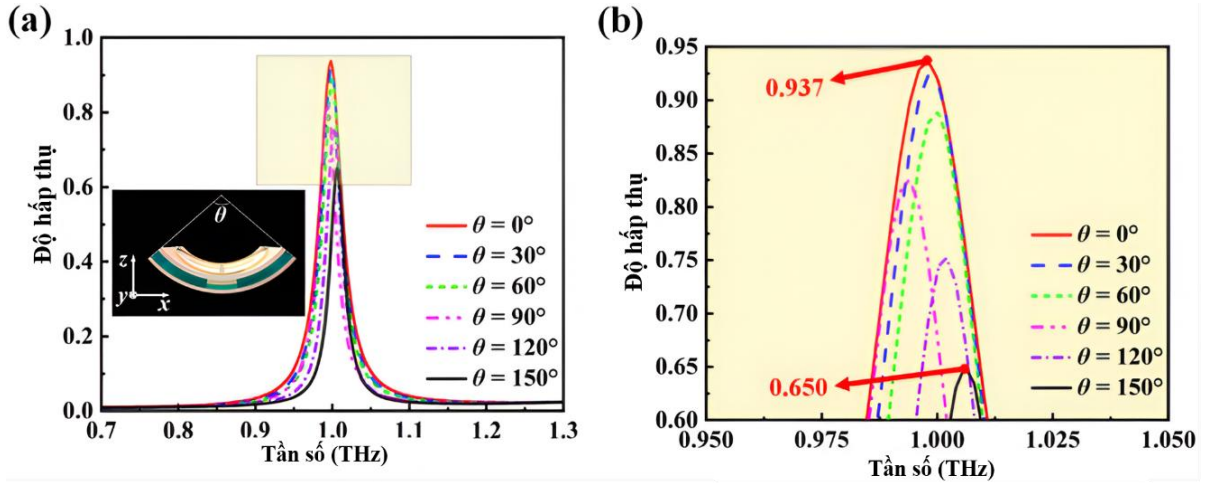
Như thể hiện trong Hình 1.27, khi bộ cộng hưởng 1 và 2 chồng lên nhau, tinh thể lỏng được điều khiển bằng điện được bơm vào giữa hai bộ cộng hưởng, do đó tạo thành cấu trúc OMST hoàn chỉnh. Từ Hình 1.27, có thể quan sát thấy rằng khi sóng TE được chiếu riêng biệt vào bộ cộng hưởng 1 và bộ cộng hưởng 2, cả hai đều cho thấy khả năng hấp thụ thấp. Tuy nhiên, cấu trúc OMST hoàn chỉnh tạo ra các đỉnh hấp thụ mạnh lên đến 0.937 ở 0.998THz. Chứng tỏ rằng hiện tượng EIA được xảy ra trong OMST.



Hình 1.28. Sơ đồ mô phỏng sự phân bố của tinh thể lỏng khi áp dụng trường ngoài E [98].

Tinh thể lỏng được bơm giữa polyimide trên và dưới là tinh thể lỏng dạng nematic. Là một chất nằm giữa chất rắn và chất lỏng, tinh thể lỏng có độ nhớt tốt, điều đó có nghĩa là tinh thể lỏng sẽ được bao bọc tốt giữa các polyimide và có thể thích ứng với nhiều độ cong khác nhau khi OMST bị uốn cong. Lúc này, khi không có tác động

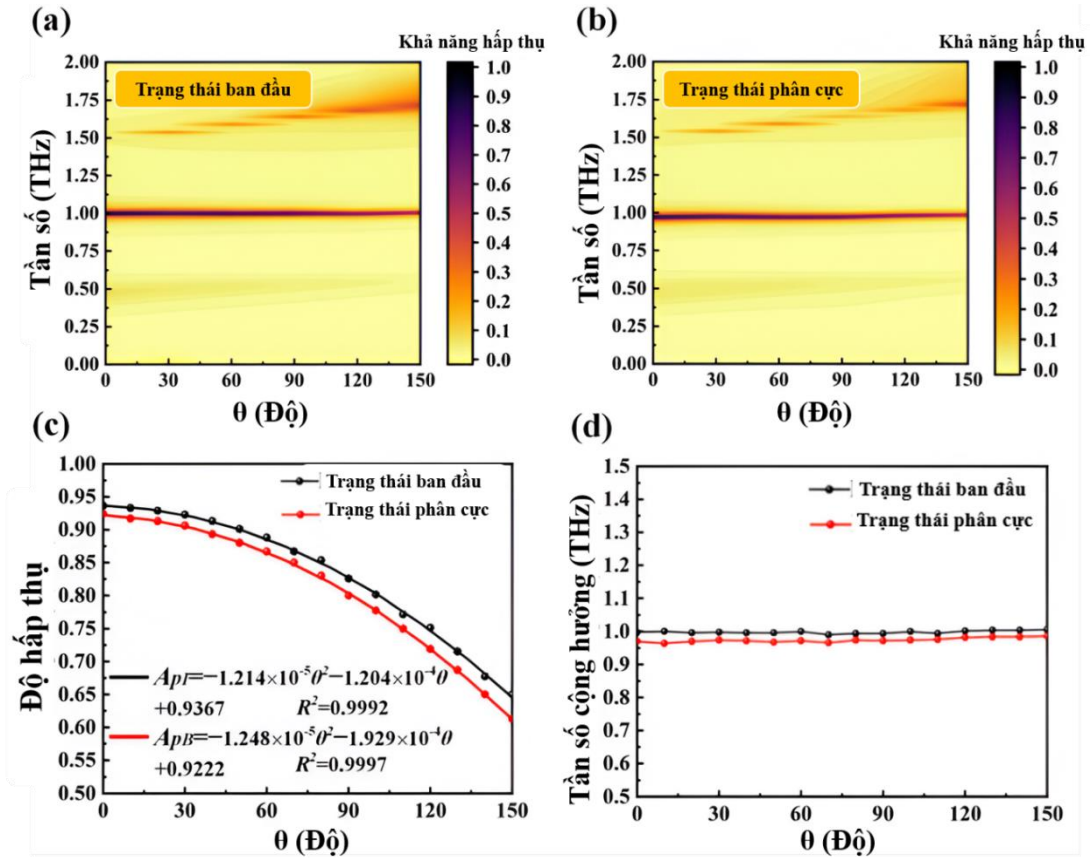
của trường điện bên ngoài, các phân tử tinh thể lỏng được sắp xếp đều và tinh thể lỏng có thể dễ dàng căn chỉnh theo hướng dòng chảy dưới tác động của lực bên ngoài. Như thể hiện trong Hình 1.28(a), sự căn chỉnh hướng phân tử theo hướng trục x thường có thể đạt được bằng cách căn chỉnh ma sát. Khi chịu tác động của một trường điện bên ngoài mạnh, tinh thể lỏng sẽ đạt đến trạng thái phân cực hoàn toàn, với hướng phân tử song song với trục z.



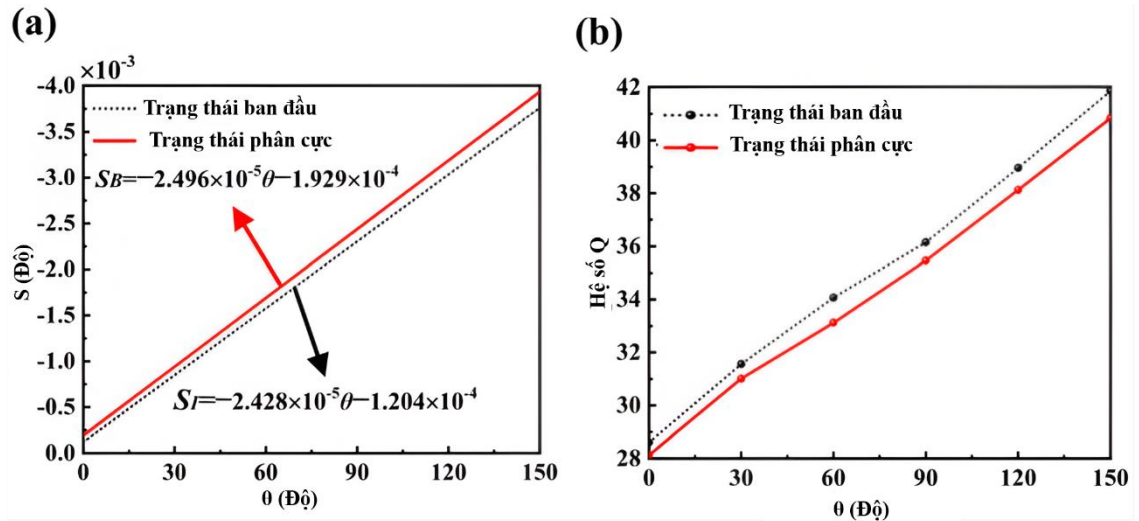
Hình 1.29. (a) Độ hấp thụ của OMST ở các θ khác nhau và (b) chế độ xem được phóng to một phần trong (a) (khu vực màu vàng) [98].

Hình 1.29 cho thấy khả năng hấp thụ của OMST dựa trên hiện tượng EIA khi θ đạt các giá trị 0, 30°, 60°, 90°, 120° và 150°. Khi θ tăng từ 0 đến 150° theo các khoảng cách 30°, khả năng hấp thụ của OMST giảm dần và khả năng hấp thụ giảm từ 0.937 xuống 0.650 [như thể hiện trong Hình 1.29(b)]. Dựa trên hiện tượng này, OMST có thể thực hiện chức năng phát hiện độ cong. Trong quá trình tăng θ , tần số cộng hưởng có sự dịch chuyển nhỏ, tăng từ 0.998 đến 1.006 THz. Trong hàm CS của OMST, sự thay đổi giá trị đỉnh của phổ hấp thụ là tín hiệu phát hiện cho độ cong uốn cong K, và sự thay đổi tần số cũng có thể được sử dụng để phát hiện phụ trợ.

Từ phân bố tần số trong Hình 1.30(a) và (b) và đỉnh hấp thụ trong Hình 1.30(c) (khi $\theta = 0$), có thể thấy rằng trạng thái của tinh thể lỏng ảnh hưởng đến phân bố tần số và kích thước đỉnh của EIA. Đỉnh của EIA ở trạng thái tinh thể lỏng phân cực nhỏ hơn một chút so với trạng thái ban đầu, nhưng phạm vi biến thiên lớn hơn khi θ thay đổi. Ở trạng thái phân cực, phạm vi của đỉnh hấp thụ lớn hơn, và sự thay đổi độ dốc của đường cong có nghĩa là độ nhạy và độ chính xác cao hơn.



Hình 1.30. (a) và (b) Năng lượng hấp thụ ở hai trạng thái, (c) khả năng hấp thụ liên quan đến θ , từ 0 đến 150° , được ghi lại mỗi 10° , và (d) độ lệch của tần số cộng hưởng theo sự thay đổi của θ [98].



Hình 1.31 (a) Mối quan hệ S của OMST và (b) các đường cong hệ số Q của OMST với các góc θ khác nhau [98].

Độ nhạy cảm biến S là một chỉ số quan trọng để đánh giá hiệu suất cảm biến và hệ số Q cũng là một tham số quan trọng liên quan đến cảm biến. Để đánh giá tốt hơn

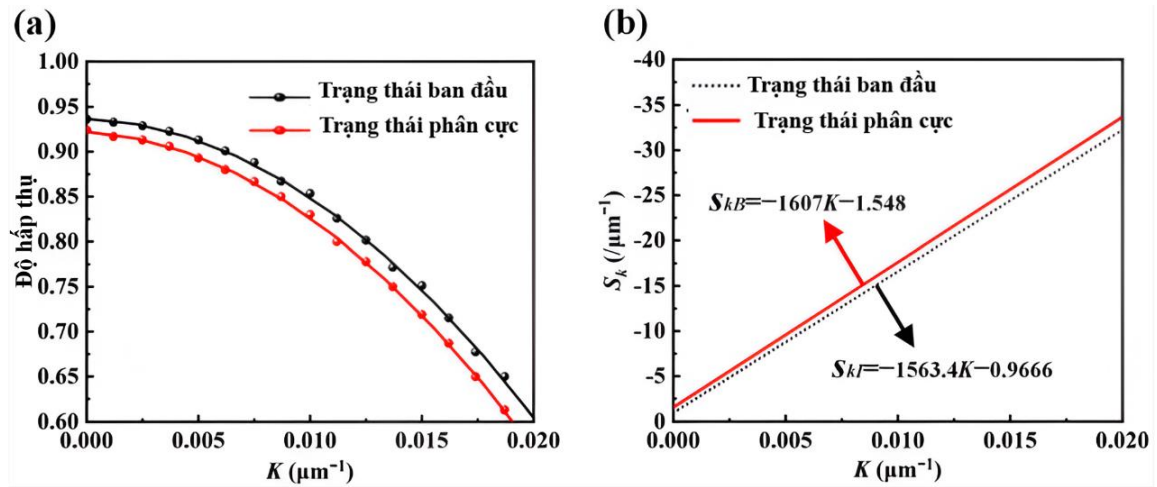
hiệu suất cảm biến của OMST, hệ số S và Q của OMST được đưa ra trong Hình 1.31. S được định nghĩa là tỷ lệ giữa sự thay đổi cường độ hấp thụ và sự thay đổi θ . Như có thể thấy từ Hình 1.31(a), ở trạng thái ban đầu của tinh thể lỏng, S của OMST thỏa mãn hàm tuyến tính $S_I = -2.428 \times 10^{-5} \theta - 1.204 \times 10^{-4}$. Ở trạng thái phân cực của tinh thể lỏng, S của OMST thỏa mãn hàm tuyến tính $S_B = -2.496 \times 10^{-5} \theta - 1.929 \times 10^{-4}$. Độ dốc của đường cong S ở trạng thái phân cực lớn hơn và hiệu suất cảm biến tốt hơn. Trong Hình 1.31(b), hệ số Q được tính cho $\theta = 0, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ và 150° . Khi θ tăng, cường độ hấp thụ giảm có nghĩa là FWHM nhỏ hơn, do đó giá trị của hệ số Q tăng dần. Ở trạng thái ban đầu, giá trị của hệ số Q tăng từ 28.610 lên 41.859 và ở trạng thái phân cực, giá trị của hệ số Q tăng từ 28.136 lên 40.840. Giá trị tăng của hệ số Q có nghĩa là hiệu suất cảm biến và độ chính xác tốt.

Đối với bề mặt, hệ số K thường được sử dụng để nghiên cứu độ cong, mô tả trực quan mức độ uốn cong của bề mặt. Độ cong đo được tối đa của cảm biến được xác định bởi bán kính cong tối thiểu và K có thể được tính bằng nghịch đảo của bán kính cong, như sau:

$$K = \frac{1}{R} \quad (1.11)$$

Phép đo bán kính cong được tính theo công thức (4), trong đó θ là góc uốn và P là chiều dài đế của OMST:

$$R = \frac{P \times 360^\circ}{\theta \times 2\pi} \quad (1.12)$$



Hình 1.32. (a) Khả năng hấp thụ của OMST đối với CS trong hai trạng thái tinh thể lỏng và (b) mối quan hệ S-K của OMST đối với CS trong hai trạng thái tinh thể lỏng [98].

Hình 1.32(a) cho thấy độ cong K của OMST khi nó thay đổi theo cường độ hấp thụ. Độ cong của OMST ở mức μm và phạm vi đo là $0 - 0.020 \mu\text{m}^{-1}$. Điều này có nghĩa là OMST có thể phát hiện những thay đổi rất nhỏ về độ cong. Hình 1.32(b) cho thấy mối quan hệ giữa độ nhạy cảm biến S và độ cong. Ở trạng thái ban đầu và trạng thái phân cực, các công thức $S_{KI} = -1563.4K - 0.9666$ và $S_{KB} = -1607K - 1.548$ tương ứng được thỏa mãn. Có thể thấy từ Hình 1.32(b) rằng giá trị tuyệt đối lớn nhất của S_{KI} là 32.230 và giá trị của S_{KB} là 33.690 tương ứng. Những kết quả này cho thấy OMST có hàm cảm biến độ cong tốt và hàm cảm biến ở trạng thái lệch cũng tốt hơn.

1.4. Kết luận chương 1

Trong chương này, luận án đã giới thiệu tổng quan về MMA. Đầu tiên, luận án trình bày những nội dung cơ bản về MA. Tiếp theo, cơ chế hoạt động của MA như cộng hưởng điện và từ, lý thuyết phối hợp trở kháng, lý thuyết về tiêu tán năng lượng cũng đã được phân tích và đánh giá. Bên cạnh đó, luận án cũng giới thiệu một số cấu trúc MMA với cơ chế hoạt động khác nhau, đồng thời một số ứng dụng của MMA cũng được đề cập đến trong chương này.

Dựa trên những kiến thức và hiểu biết cơ bản thu được trong Chương 1 về MM có cấu trúc đa lớp hấp thụ sóng điện từ và cơ chế hoạt động của nó, nghiên cứu sinh đã xác định được nội dung nghiên cứu chính của luận án là nghiên cứu, thiết kế hoặc chế tạo các cấu trúc MM hấp thụ sóng điện từ có cấu trúc đa lớp. Bên cạnh đó, nghiên cứu của luận án cũng hướng đến tạo ra MMA được tối ưu về thiết kế cũng như khả năng hấp thụ.

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

2.1.1. Phương pháp mô phỏng

Sử dụng các công cụ mô phỏng để nghiên cứu vật liệu là một phương pháp ngày càng phổ biến. Các công cụ này trở thành một phần không thể thiếu, giúp dự đoán tính chất, quan sát trực quan các đặc trưng và quá trình vật lý, đồng thời giảm sai sót và chi phí trong quá trình thực nghiệm. Các phần mềm chuyên dụng như CST Microwave Studio, HFSS và Comsol thường được dùng để thiết kế và mô phỏng MM. Chúng cho phép mô phỏng vật liệu trong không gian 2D hoặc 3D. Các đặc tính điện từ của MM có thể được xác định bằng cách mô phỏng cấu trúc một ô cơ sở, thiết lập đầy đủ các tham số, loại vật liệu và các điều kiện biên phù hợp. Hiện nay, phần mềm mô phỏng CST Microwave Studio đã được trang bị tại Học viện Khoa học và Công nghệ và Viện Khoa học vật liệu.

Phương pháp tích phân hữu hạn (FIT) được ứng dụng trong phần mềm CST để mô phỏng các đặc trưng điện từ của vật liệu, bao gồm phổ truyền qua, phổ phản xạ và phổ hấp thụ. Dựa trên lý thuyết FIT, các phương trình Maxwell và phương trình tán sắc của vật liệu được chuyển đổi từ không gian liên tục sang không gian rời rạc. Điều này được thực hiện bằng cách đặt áp điện trên các cạnh của lưới và áp từ trên các cạnh của lưới kép, cho phép tính toán và phân tích các trường điện từ một cách hiệu quả. Từ đó, một hệ phương trình lưới Maxwell được tạo ra [99]:

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

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

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

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

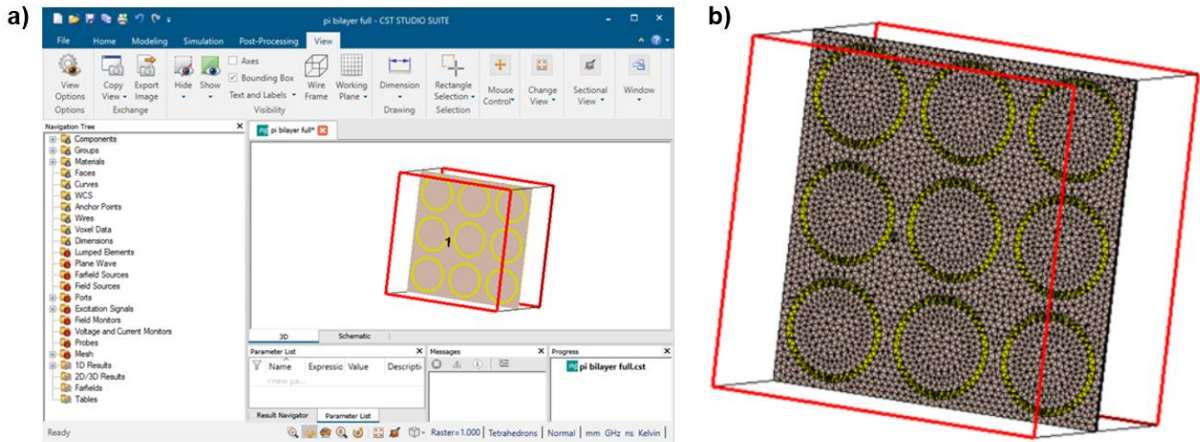
Các phương pháp giải khác nhau, bao gồm Time Domain Solver, Frequency Domain Solver, Eigenmode Solver,... được sử dụng trong phần mềm CST. Các phương pháp khác nhau nhằm hỗ trợ chia lưới Maxwell sao cho phù hợp nhất với từng trường hợp cấu trúc cụ thể. Phần mềm CST có ba kiểu lưới khác nhau: lưới bề mặt, tứ diện và lục giác được dùng như sau: Eigenmode solver: tạo lưới Maxwell dưới dạng lục giác và tứ diện; Frequency domain solver: tạo lưới Maxwell dưới dạng tứ diện;

Transient solver: tạo lưới Maxwell dưới dạng lục giác. Phương pháp Frequency Domain Solver phù hợp với các cấu trúc nhỏ, tuần hoàn, hoạt động trong vùng tần số hẹp. Do đó, để nghiên cứu mô phỏng MM hoạt động trong vùng tần số GHz, luận án sẽ sử dụng phương pháp Frequency Domain Solver.

Kết quả mô phỏng sẽ thu được 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 MM được xác định theo công thức:

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

Bên cạnh các thông số về hệ số hấp thụ, hệ số phản xạ, hệ số truyền qua, phần mềm mô phỏng CST còn cho phép thu được các đặc trưng về dòng và năng lượng. Ngoài ra, từ các thông số tán xạ kết hợp với phương pháp tính toán, ta có thể xác định được các tham số điện từ hiệu dụng của vật liệu như độ điện thẩm, độ từ thẩm, và chiết suất.



Hình 2.1 a) Giao diện chương trình mô phỏng – CST Microwave Studio, b) Chia lưới Tetrahedrons khi mô phỏng cấu trúc

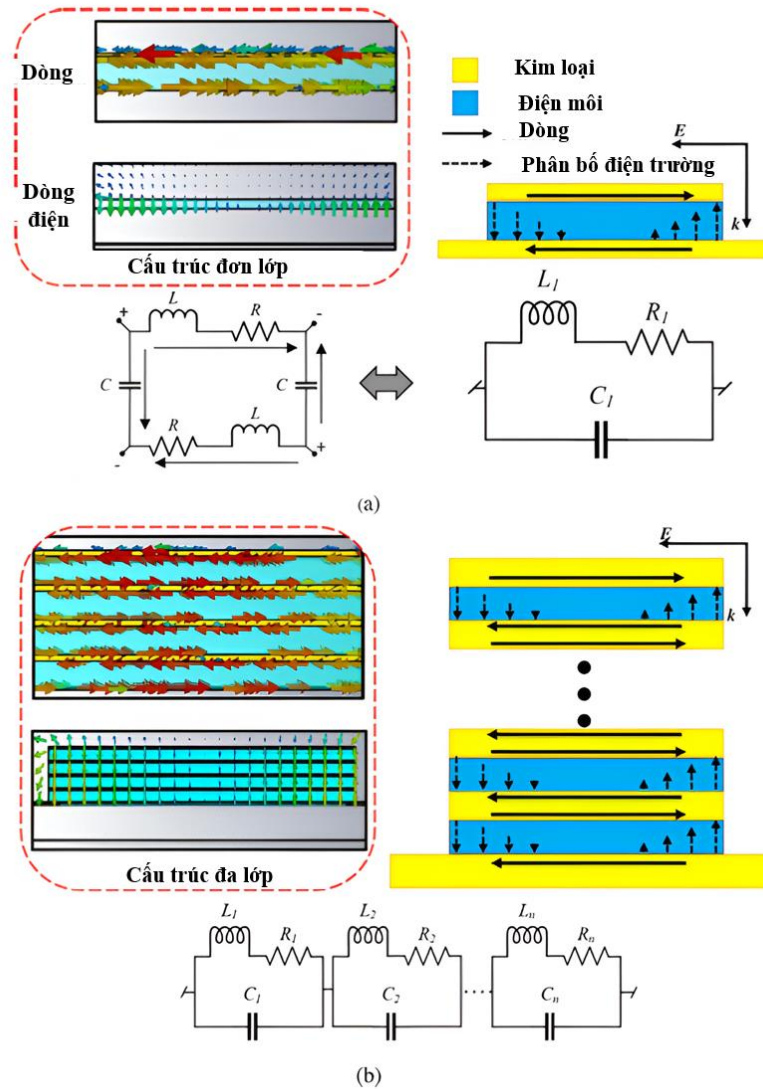
Một ưu điểm khác của phương pháp mô phỏng sử dụng phần mềm CST là chúng ta có thể khảo sát về sự tương tác cũng như tính chất của MM một cách dễ dàng, trong khi rất khó thực hiện và biểu diễn bằng thực nghiệm. Cụ thể, từ phân bố điện trường, từ trường bên trong và bên ngoài của cấu trúc sẽ cho thấy sự tương tác của cấu trúc với sóng điện từ, từ đó có thể cung cấp thông tin về cơ chế hấp thụ sóng điện từ của vật liệu. Phân bố dòng điện bề mặt được sử dụng để chỉ ra bản chất cộng hưởng của cấu trúc. Ngoài ra, sử dụng mô phỏng cũng cho phép khảo sát sự phân bố mật độ năng lượng tiêu tán trong MM. Trong luận án, một số vật liệu được sử dụng để mô phỏng MMA như: kim loại đồng có độ dẫn 5.96×10^7 S/m; điện môi FR-4 với hằng số điện môi là 4.3, tan tổn thất 0.025; mực dẫn điện có thành phần Graphene với điện trở mặt có giá trị khác

nhau; Roger với hằng số điện môi là 11.2 và $\tan\delta = 0.0022$. Các kim loại mô phỏng ở vùng THz được mô phỏng dựa trên mô hình Drude.

2.1.2. Mô hình tính toán mạch LC tương đương

Các tính chất điện từ của MA có thể được dự đoán và giải thích dựa trên mô hình mạch điện tương đương RLC. Mô hình mạch điện RLC phụ thuộc vào dạng cấu trúc của MA, trong đó các lớp kim loại được thay thế bằng các cuộn cảm có độ tự cảm hiệu dụng L và tụ điện với điện dung hiệu dụng C . Các giá trị L và C được tính toán dựa trên thông số hình học của cấu trúc và phân bố năng lượng điện từ. Dựa trên mô hình mạch điện RLC, tần số mà tại đó xảy ra cộng hưởng điện từ (tại đó các tính chất đặc biệt của MA xuất hiện) dễ dàng được tính toán. Vì các giá trị độ tự cảm và điện dung phụ thuộc vào thông số hình học của cấu trúc, nên thông qua biểu thức tính tần số cộng hưởng có thể xác định được quy luật về sự phụ thuộc của các đặc tính điện từ đối với các thông số cấu trúc của vật liệu.

Năm 2021, Dinh, Minh Q. và các cộng sự đã đưa ra sơ đồ tính toán mạch LC cho MMA như hình 2.2 [93]. Đối với một lớp cấu trúc kim loại/điện môi đơn lẻ trên tấm kim loại, khi sóng điện từ tới đập vào cấu trúc, từ trường bên ngoài sẽ tạo ra dòng điện ngược song song trên lớp kim loại cộng hưởng và tấm kim loại. Khi dòng điện cảm ứng chạy qua lại, chúng tạo thành từ trường cục bộ mạnh bên trong cấu trúc. Hướng của dòng điện cảm ứng và trường điện được thể hiện trong Hình 2.2(a) tương đương mô hình mạch RLC song song [100-102]. Do kim loại được sử dụng không dẫn điện hoàn hảo (đối với vùng tần số cao MHz, GHz), nên một điện trở tương đương R được thêm nối tiếp vào cuộn cảm để biểu diễn tổn thất Ohmic. Trong trường hợp của vật liệu hấp thụ nhiều lớp, vì các lớp kim loại và điện môi hình vuông được xếp chồng khít nhau, nên mỗi hình vuông kim loại có thể đồng thời là một phần của hai lớp chức năng kim loại/điện môi/kim loại liền kề. Do đó, sự phân bố dòng điện khác nhau bên trong chính hình vuông kim loại. Như thể hiện trong Hình 2.2(b), các dòng điện chạy ngược chiều nhau trên bề mặt trên và dưới của một hình vuông kim loại. Trong khi phân bố dòng điện và trường của mỗi lớp chức năng vẫn hỗ trợ mô hình mạch LC song song, các dòng điện song song ngược chiều bên trong mỗi hình vuông kim loại cho thấy dấu hiệu của một mạch RLC song song được liên kết nối tiếp. Người ta thường biết rằng tần số cộng hưởng của mạch RLC song song, tương đương với vật liệu hấp thụ một lớp, là $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$. Khi số lớp tăng lên, các mạch LC song song tương ứng khác được thêm nối tiếp vào mạch ban đầu. Sự ghép nối lẫn nhau giữa các mạch con RLC đó dẫn đến sự thay đổi độ tự cảm và điện



Hình 2.2 Dòng điện mô phỏng và mô hình hóa cũng như sự phân bố trường điện của (a) MA và (b) MMA [93].

dung có thể ảnh hưởng đến tần số cộng hưởng của toàn bộ cấu trúc. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng cho thấy tần số cộng hưởng tương đối ổn định, một trường điện cục bộ mạnh bên trong mỗi lớp chức năng với hiệu ứng viền không đáng kể; các dòng điện phản song song ở hai tấm kim loại đối diện cũng có cường độ gần bằng nhau, do đó từ trường của mỗi cặp kim loại chủ yếu bị giới hạn giữa hai hình vuông kim loại. Do đó, sự ghép nối lẫn nhau giữa các mạch con RLC liên kế là không đáng kể. Sự ghép nối giữa các ô cũng phải được xem xét. Thông thường, khoảng cách giữa các ô cơ sở liên kế được mô hình hóa như một tụ điện khác [16] biểu diễn sự ghép nối giữa các ô. Tuy nhiên, các mô phỏng ban đầu cho thấy cường độ điện trường bên trong khoảng cách giữa các ô đó có thể bỏ qua do không đáng kể. Do đó, sự ghép nối lẫn giữa các ô cơ sở có thể được bỏ qua. Toàn

bộ mạch được đặt ở cuối đường truyền biểu diễn không gian trống với trở kháng đặc trưng Z_0 là $120\pi \Omega$.

Như thể hiện trong Hình 2.2(a), mỗi lớp chức năng kim loại/điện môi/kim loại tương đương với một mạch RLC và các giá trị của chúng có thể được biểu thị như sau:

$$L = \frac{\alpha_L h l}{w} \quad (2.6)$$

$$Z_{circuit}(\omega) = n Z_{sub-circuit}(\omega) = n \frac{i\omega L + R}{1 - \omega^2 LC + i\omega RC} \quad (2.7)$$

trong đó l và w là chiều dài và chiều rộng của các lớp, h là độ dày điện môi. Ở vùng tần số cao, dòng điện cảm ứng xuất hiện chủ yếu trên một tấm mỏng có độ dày δ , là độ xuyên sâu, trên bề mặt của tấm kim loại. Do đó, điện trở của tấm đó có thể được xác định như sau:

$$R \sim \frac{1}{\sigma} \frac{l}{w \delta} = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{\mu \omega}{2\sigma}} = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{\mu}{4\pi\sigma \sqrt{LC}}} = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{\mu}{4\pi\sigma''' \sqrt{\alpha_L \alpha_C}}} = \frac{\alpha_R l^{\frac{1}{2}}}{w} \quad (2.8)$$

trong đó σ là độ dẫn điện của kim loại. Trong khi α_R đã được khai báo trên Công thức (1.8), hai hệ số α_L và α_C có thể được ước tính theo nhiều cách khác nhau. Trong [16], [103], $\alpha_L = \mu/2$ là một nửa độ từ thẩm, trong khi $\alpha_C = c\varepsilon$ phụ thuộc vào hằng số điện môi ε và một hệ số số khác $0,2 \leq c \leq 0,3$ biểu thị nồng độ điện trường E và điện tích không đồng nhất. Có thể thấy rõ sự phụ thuộc của α_L và α_C vào μ và ε . Tuy nhiên, vì nồng độ điện trường E và dòng điện có thể khác nhau tùy từng trường hợp, nên sẽ an toàn hơn khi ước tính giá trị của chúng bằng cách khớp kết quả mô phỏng ban đầu với các phương trình, thay vì tính trực tiếp chúng từ μ và ε .

Mỗi mạch con RLC song song có trở kháng được biểu thị như sau:

$$Z_{sub-circuit}(\omega) = \frac{i\omega L + R}{1 - \omega^2 LC + i\omega RC} \quad (2.9)$$

Với n mạch con được đặt nối tiếp, trở kháng của mạch tương đương do đó là:

$$Z_{circuit}(\omega) = n Z_{sub-circuit}(\omega) = n \frac{i\omega L + R}{1 - \omega^2 LC + i\omega RC} \quad (2.10)$$

Ở đây cần lưu ý rằng các cấu trúc đa lớp chỉ bao phủ một phần của ô đơn vị. Do đó, trở kháng đầu vào $Z(\omega)$ của vật liệu hấp thụ phải tính đến điều này.

$$Z(\omega) = \alpha_f Z_{circuit}(\omega) = n \alpha_f \frac{i\omega L + R}{1 - \omega^2 LC + i\omega RC} = \frac{n\alpha_f}{C} \frac{i\omega + 2\nu}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\nu} \quad (2.11)$$

Thông thường, ở tần số cao, đặc biệt là đối với cộng hưởng chất lượng cao, ν nhỏ so với ω . Dải hẹp được nghiên cứu có nghĩa là $\omega \simeq \omega_0$. Do đó, trở kháng có thể được xấp xỉ là:

$$\gamma = n\alpha_f / 2CZ_0 = n\alpha_f h / (2\alpha_c Z_0 \omega l) \quad (2.12)$$

Hệ số phản xạ Γ được tính như sau:

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (2.13)$$

Khi quá trình truyền qua bị chặn lại, sóng điện từ đi vào sẽ bị hấp thụ. Độ phản xạ và độ hấp thụ được biểu thị theo:

$$r = |\Gamma|^2 = \frac{(\omega - \omega_0)^2 + (\nu - \gamma)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\nu + \gamma)^2} \quad (2.14)$$

$$a = 1 - r = \frac{4\nu\gamma}{(\omega - \omega_0)^2 + (\nu + \gamma)^2} \quad (2.15)$$

trong đó $\gamma = n\alpha_f / (2CZ_0) = n\alpha_f h / (2\alpha_c Z_0 \omega l)$, biểu diễn tổn hao bức xạ.

2.1.3. Dao động tử tương tác

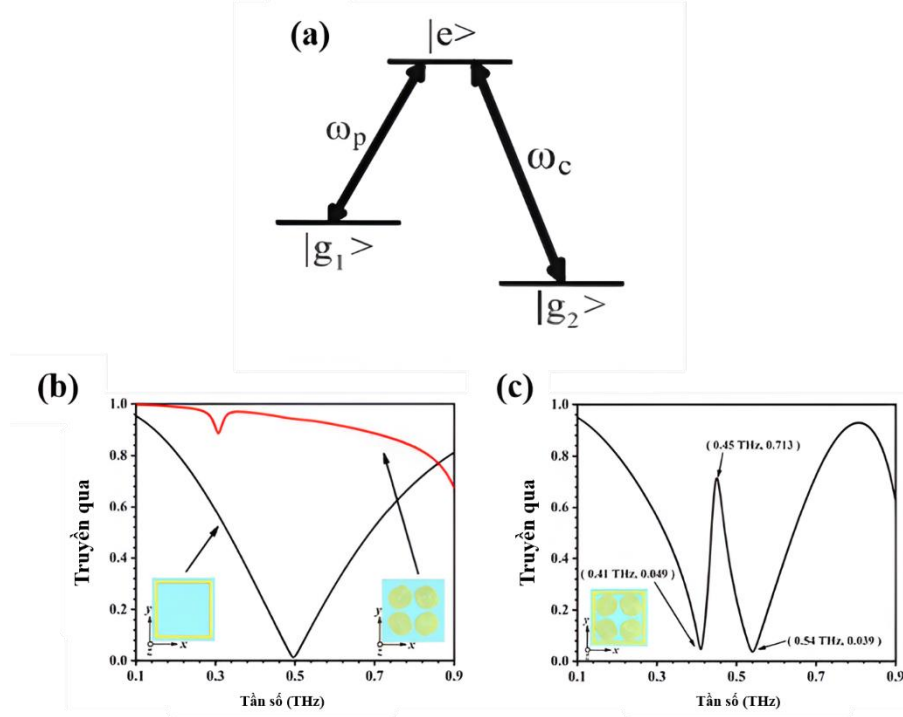
Truyền qua cảm ứng điện từ (EIT) được hiểu là sự giao thoa lượng tử giữa các nguồn kích thích khác nhau như được thể hiện tại hình 2.3. Ban đầu, nguồn kích thích đầu tiên được đưa vào môi trường. Môi trường có thể hấp thụ được sóng từ nguồn này do môi trường được xem là không trong suốt đối với nguồn kích thích đầu tiên này. Sau đó, môi trường tiếp tục được đặt dưới sự tác động của nguồn kích thích thứ hai, môi trường cũng có thể hấp thụ sóng từ nguồn này. Khi này, hiệu ứng giao thoa sẽ xảy ra khiến cho tính chất hấp thụ bị biến đổi thành tính chất truyền qua, đồng thời môi trường cũng trở nên trong suốt đối với nguồn kích thích đầu tiên [104-106].

Một mô hình đơn giản để mô tả hệ thống này là một tập hợp gồm hai bộ dao động điều hòa kết hợp được (chế độ sáng và chế độ tối), được biểu diễn như sau [107]:

$$\begin{cases} \omega_r^{-2} \ddot{p}(t) + \gamma_r \omega_r^{-1} \dot{p}(t) + p(t) = f(t) - kq(t) \\ \omega_d^{-2} \ddot{q}(t) + \gamma_d \omega_d^{-1} \dot{q}(t) + q(t) = -kp(t) \end{cases} \quad (2.16)$$

Trong đó ω_r là tần số cộng hưởng và γ_r là hệ số tắt dần của trạng thái kích thích $p(t)$ được điều khiển bởi trường ngoài $f(t)$. Cấu trúc cộng hưởng tối với tần số cộng hưởng

ω_d và hệ số tắt dần γ_d của trạng thái kích thích $q(t)$. Cả hai cấu trúc cộng hưởng đều được liên kết với nhau qua hệ số liên kết k .



Hình 2.3. (a) Sơ đồ tương tác với 2 nguồn phát khác nhau trong hiệu ứng EIT lượng tử, phổ truyền qua (b) cấu trúc cộng hưởng vuông (đường màu đen) và bốn cấu trúc cộng hưởng xoắn ốc (đường màu đỏ) và (c) vật liệu biến hoá EIT [67].

Phương trình (1.16) có thể được giải trong miền tần số bằng cách giả sử: $p(t) = \tilde{p}(\omega) \exp(-i\omega t)$ và $q(t) = \tilde{q}(\omega) \exp(-i\omega t)$:

$$\begin{aligned} \tilde{p}(\omega) &= \frac{D_d(\omega) \tilde{f}(\omega)}{D_d(\omega) D_r(\omega) - k^2}, \\ \tilde{q}(\omega) &= \frac{k \tilde{f}(\omega)}{D_d(\omega) D_r(\omega) - k^2} \end{aligned} \quad (2.17)$$

trong đó $D_r(\omega) = 1 - (\frac{\omega}{\omega_r})^2 - i\gamma_r(\frac{\omega}{\omega_r})$ và $D_d(\omega) = 1 - (\frac{\omega}{\omega_d})^2 - i\gamma_d(\frac{\omega}{\omega_d})$. Năng lượng tiêu

tán trên mỗi ô cơ sở được tính là $Q = \frac{\omega^2}{2} (\gamma_r |\tilde{p}(\omega)|^2 + \gamma_d |\tilde{q}(\omega)|^2)$.

Tham số phản xạ và tham số truyền qua trên một tấm dẫn điện có thể được tính như sau [108]:

$$R = -\frac{\zeta \sigma_{se}}{2 + \zeta \sigma_{se}}, T = \frac{2}{2 + \zeta \sigma_{se}} \quad (2.18)$$

với σ_{se} là độ dẫn bề mặt của tấm dẫn điện, ζ là trở kháng của sóng ngoài. Nếu mỗi nguyên tử “meta” đóng góp một mômen lưỡng cực p vào vật liệu biến hoá và nếu có n_s nguyên tử trên một đơn vị diện tích bề mặt, thì dòng điện phân cực trung bình được tính như sau:

$$\langle j_s(t) \rangle = n_s \dot{p}(t) \leftrightarrow \langle \tilde{j}_s(\omega) \rangle = i\omega n_s \tilde{p}(\omega) \quad (2.19)$$

Cấu trúc cộng hưởng tối không góp phần vào dòng điện bề mặt vì nó không có mômen lưỡng cực tương ứng với trường bên ngoài. Trường bề mặt E_s có thể được tính như sau: $f(t) = CE_s(t)$ với C là hằng số tỷ lệ. Do mômen lưỡng cực trung bình tỷ lệ thuận với trường điện tại bề mặt nên: $n_s \tilde{p}(\omega) = \epsilon_0 \chi_{se}(\omega) \tilde{E}_s(\omega)$, trong đó χ_{se} là độ cảm bề mặt. Trong giới hạn tĩnh, ta có:

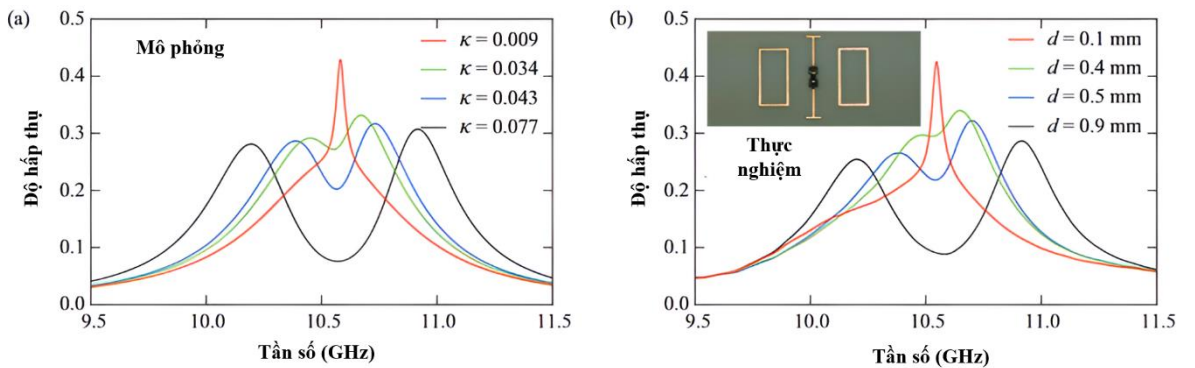
$$\epsilon_0 \chi_{se}^{(static)} \tilde{E}_s(0) = n_s \tilde{p}(0) = n_s (1 - k^2)^{-1} \tilde{f}(0) \approx n_s \tilde{f}(0) \quad (2.20)$$

Dưới điều kiện EIT, giá trị $k \ll 1$. Do $\langle \tilde{j}_s(\omega) \rangle = \sigma_{se} \tilde{E}_s(\omega)$ nên từ phương trình (1.19) và (1.20) ta có:

$$\sigma_{se} = \epsilon_0 \chi_{se}^{(static)} \frac{-i\omega \tilde{p}(\omega)}{\tilde{f}(\omega)} = \frac{-i\omega \beta D_d(\omega)}{D_d(\omega) D_r(\omega) - k^2} \quad (2.21)$$

Trong đó $\beta = \epsilon_0 \chi_{se}^{(static)}$. Khi đó độ hấp thụ có thể được tính toán dựa trên phương trình (7):

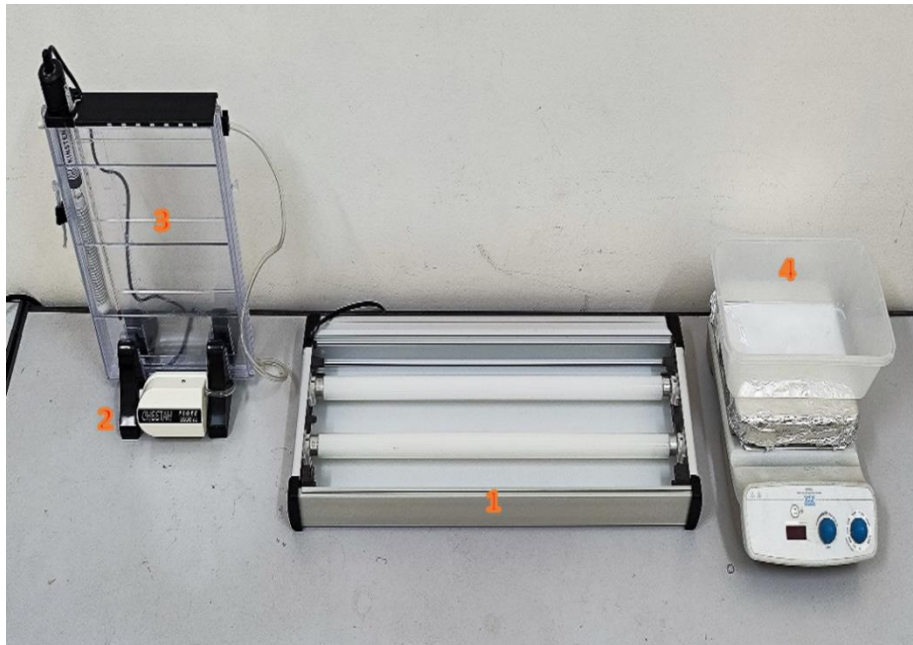
$$A = 1 - |T|^2 - |R|^2 = |T|^2 \text{Re}(\zeta \sigma_{se}) \quad (2.22)$$



Hình 2.4. Phổ hấp thụ của vật liệu biến hoá EIT/EIA đối với các hệ số liên kết khác nhau. (a) Được mô phỏng bởi mô hình hai dao động bức xạ với các tham số $\omega_d = 2\pi \times 10.58$ GHz, $\gamma_d = 0.0035$, $\omega_r = 2\pi \times 10.12$ GHz, $\gamma_r = 0.01$ và $\beta = 0.33 / (\omega_r \eta_0)$. (b) Phổ thực nghiệm đối với vật liệu biến hoá trong băng tần X với khoảng cách của sợi dây đến tâm là d khác nhau [107].

2.2. Phương pháp chế tạo

Quang khắc là một kỹ thuật phổ biến trong công nghệ chế tạo vật liệu, giúp tạo ra các chi tiết với hình dạng và kích thước xác định. Nguyên lý hoạt động là sử dụng bức xạ ánh sáng để thay đổi tính chất của lớp chất cảm quang phủ trên bề mặt vật liệu. Chất cảm quang là hợp chất hữu cơ nhạy sáng, có khả năng bền trong môi trường kiềm hoặc axit, đóng vai trò bảo vệ các chi tiết vật liệu khỏi bị ăn mòn. Đối với các vật liệu có cấu trúc kim loại-điện môi-kim loại hoạt động trong dải tần số GHz, phương pháp chế tạo thích hợp là quang khắc ăn mòn kim loại.



Hình 2.5. Hệ thiết bị quang khắc gồm 4 phần chính: 1) Thiết bị chiếu sáng, 2) hệ thống bơm hút, 3) bể ngâm chứa dung dịch ăn mòn và 4) bể ngâm chứa dung dịch hiện hình.

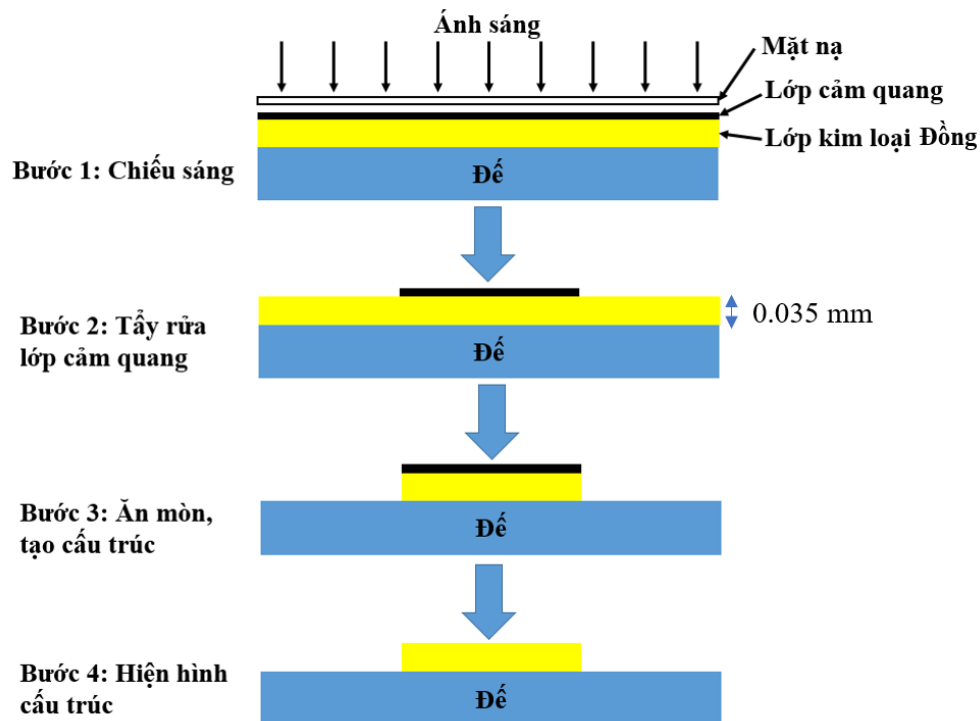
Hệ thiết bị quang khắc được chia làm 4 phần chính: 1) Thiết bị chiếu sáng, 2) hệ thống bơm hút, 3) bể ngâm chứa dung dịch ăn mòn và 4) bể ngâm chứa dung dịch hiện hình (Hình 2.5). Việc chế tạo mẫu được thực hiện theo 4 bước như trong hình 2.6.

- Bước 1: Chiếu sáng

+ Đặt mặt nạ đã được thiết kế sẵn theo cấu trúc cộng hưởng lên bề mặt vật liệu, mặt nạ được ép sát vào bề mặt bằng cách sử dụng 1 tấm mica trong suốt đặt lên trên lớp mặt nạ.

+ Chiếu sáng vật liệu sử dụng mặt nạ bằng nguồn sáng đồng đều (đèn halogen hoặc ánh sáng trắng công suất 18W) trong thời gian 5 phút. Khoảng cách từ nguồn chiếu sáng đến mặt nạ là 5 cm. Những vị trí chất cảm quang bị chiếu sáng sẽ biến tính và các vị trí bị che phủ bởi mặt nạ, chất cảm quang được giữ nguyên tính chất.

- Bước 2: Tẩy rửa lớp cảm quang
 - + Nhấc mặt nạ ra khỏi tấm vật liệu.
 - + Nhúng tấm vật liệu đã được chiếu sáng trong hóa chất chuyên dụng Hóa chất hiện hình cho phôi mạch in vùng GHz có thành phần chính Sodium metasilicate pentahydrate - $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, gia nhiệt 30 độ, tẩy trong 3 phút.
 - Bước 3: Ăn mòn, tạo cấu trúc
 - + Sau quá trình tẩy rửa chất cảm quang, tấm vật liệu được đưa vào hóa chất ăn mòn cho phôi mạch in vùng GHz có thành phần chính Sodium Persulfate - Na_2SO_4 với nhiệt độ làm việc: 40°C trong bể có dung tích 2 lít. Tấm vật liệu được ngâm trong dung dịch ăn mòn trong thời gian 15 phút, trong quá trình này dung dịch ăn mòn sẽ bị nóng lên do phản ứng hóa học.
 - Bước 4: Hiện hình cấu trúc.
- Tiến hành chiếu sáng và tẩy rửa lớp cảm quang còn lại của cấu trúc theo bước 1, 2 (không sử dụng mặt nạ).



Hình 2.6. Quy trình chế tạo MA hoạt động trong vùng tần số GHz sử dụng phương pháp quang khắc

Ở vùng GHz, do kích thước cấu trúc MA thường ở mức milimet, sai số kích thước là khoảng 0.1 mm do giới hạn của phương pháp quang khắc. Trên thực tế, khi chế tạo MMA có thể gây ra một số yếu tố gây ảnh hưởng đến sự sai khác giữa mô phỏng và thực nghiệm như: độ dẫn kim loại, độ tổn hao của điện môi không hoàn hảo, sai số kích thước

khi chế tạo... Bên cạnh đó, độ nhám của vật liệu trong MA cũng có thể gây ảnh hưởng đến khả năng hấp thụ. Độ nhám bề mặt làm thay đổi cấu trúc bề mặt góp phần điều chỉnh trở kháng hiệu dụng của MA, giúp đạt được điều kiện phối hợp trở kháng dễ dàng hơn. Điều này làm giảm phản xạ sóng điện từ và tăng hấp thụ [109-111].

Ngoài sử dụng phương pháp quang khắc, một số phương pháp hóa lý khác cũng được áp dụng để chế tạo các lớp thành phần của MA. Đối với MA được tạo bởi mực in dẫn điện có thành phần như các hạt nano bạc hoặc graphene, việc sử dụng phương pháp in là đơn giản và nhanh chóng. Trong đó phương pháp in lưới được sử dụng tương đối hiệu quả trong chế tạo vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ [112].

2.3. Phương pháp đo đặc tính chất điện từ của vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp

Hệ phân tích mạng (VNA-Vector Network Analyzer) Rohde & Schwarz ZNB20 tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam được trang bị giúp đo độ phản xạ, truyền qua của MA và MMA. Hệ đo sử dụng hai ăng-ten với vai trò là nguồn phát và nguồn thu (Hình 2.7).



Hình 2.7. Máy phân tích mạng véc tơ VNA

Tùy thuộc và phép đo, vị trí của các ăng-ten được thiết lập khác nhau. Kết quả đo đưa ra các tham số tán xạ dạng phức S-parameter. Tham số tán xạ S-parameter cho biết

thông tin về tính chất phản xạ và truyền qua của MA và MMA. Khi đó, đặc trưng hấp thụ của vật liệu được tính thông qua độ phản xạ và truyền qua:

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2, \quad (2.23)$$

trong đó S_{11} là tham số phản xạ và S_{21} là tham số truyền qua.

2.3.1. Đánh giá thực nghiệm đặc trưng phản xạ của các mẫu vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp

Để đo phổ phản xạ từ mẫu MA, 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 góc tới khác nhau của sóng điện từ. Trong quá trình đo, mẫu được đặt trên một giá đỡ nằm giữa hai ăng-ten.

Bước 1: Chuẩn hóa hệ đo theo thông số S_{11}

Bước 2: Sử dụng tấm kim loại liên tục (kích thước bằng MA, MMA) để chuẩn hóa phản xạ trên thiết bị

Bước 3: Đặt mẫu MA, MMA cần đo và ghi nhận các kết quả.



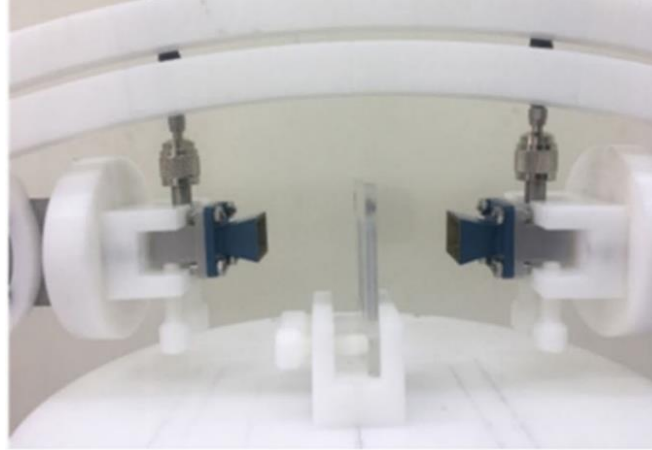
Hình 2.8. Thiết lập đo MA và MMA trên hệ thiết bị VNA

2.3.2. Đánh giá thực nghiệm đặc trưng truyền qua của các mẫu vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp

Để xác định các đặc trưng truyền qua của vật liệu, phương pháp đo trong không gian tự do sử dụng hệ thiết bị VNA được sử dụng. Sơ đồ nguyên lý của phép đo không gian tự do được mô tả như trong hình 2.9. Hai ăng-ten được đặt đối diện nhau, vật liệu được gắn lên trên một giá đỡ đặt giữa hai ăng-ten. Đầu tiên, hệ đo được chuẩn hóa theo tham số S_{21} bằng cách đo S_{21} của giá đỡ trống, sau đó, vật liệu được đặt trên giá đỡ và

phép đo S_{21} lại được lặp lại. Sử dụng chức năng deembedding của VNA, có thể loại bỏ ảnh hưởng của giá đỡ và chỉ có tham số S của vật liệu được xác định. Sau khi đo tham số truyền qua, năng lượng truyền qua $T(\omega)$ của vật liệu được tính toán bởi công thức:

$$T(\omega) = |S_{21}|^2. \quad (2.24)$$



Hình 2.9. Phép đo đặc trưng truyền qua của vật liệu sử dụng thiết bị VNA [55].

2.4. Kết luận chương 2

Phần mềm mô phỏng điện từ chuyên dụng CST Microwave có thể được sử dụng để thiết kế mô hình cấu trúc MA và MMA tối ưu. Các tính chất của MA, MMA như phổ hấp thụ, phân bố dòng điện bề mặt và trường bên trong vật liệu được thể hiện trên phần mềm CST. Cùng với đó, phương pháp tính toán được thực hiện để so sánh, đối chiếu và tối ưu thiết kế của MA và MMA.

Từ các kết quả đạt được dựa trên phương pháp mô phỏng và tính toán, MMA được chế tạo bằng phương pháp quang khắc, và một số phương pháp khác. Phương pháp quang khắc được cho là phương pháp hữu hiệu trong chế tạo các MMA với lớp hấp thụ là đồng. Đối với lớp hấp thụ là mực dẫn điện, phương pháp in lưới thường được sử dụng nhiều hơn.

Sau khi chế tạo vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ có cấu trúc đa lớp, các tính chất điện từ của mẫu được đo trên hệ thiết bị phân tích mạng Vector Network Analyzer với hai ăng ten kết nối. Kết quả thu được sau khi đo đặc các mẫu MA, MMA được so sánh, đối chiếu với các mô phỏng, tính toán.

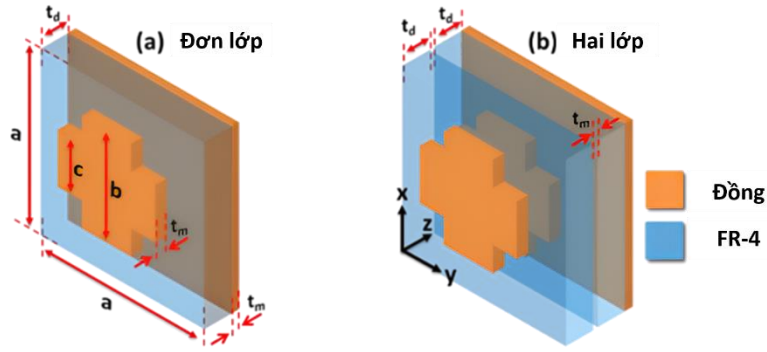
CHƯƠNG 3. SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA TƯƠNG TÁC GIỮA CÁC LỚP ĐẾN TÍNH CHẤT HẤP THỤ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HOÁ CÓ CẤU TRÚC ĐA LỚP TRONG VÙNG TẦN SỐ GHz

Trong MMA hoạt động trong vùng tần số GHz, tương tác giữa các lớp đóng vai trò then chốt trong việc điều chỉnh và tối ưu hóa tính chất hấp thụ sóng điện từ. Các lớp kim loại, điện môi được sắp xếp theo cấu trúc tuần hoàn hoặc bất đối xứng, tạo ra các cộng hưởng điện từ phức tạp, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến phổ hấp thụ và độ rộng băng tần. Tổn hao điện môi và tổn hao Ohmic trong MMA là hai cơ chế chính giúp chuyển đổi năng lượng sóng thành nhiệt, từ đó tạo ra khả năng hấp thụ mạnh và hiệu quả. Trong chương này, các cấu trúc MMA với các mức tổn hao Ohmic khác nhau cũng như các mức tổn hao điện môi khác nhau đã được thiết kế, mô phỏng, nghiên cứu và chế tạo. Trong đó cấu trúc Cu-FR-4 tương ứng MMA với tổn hao Ohmic nhỏ, cấu trúc Graphene – FR-4 tương ứng MMA tổn hao Ohmic lớn và cấu trúc Cu-Roger tương ứng MMA với tổn hao điện môi nhỏ. Với mục đích thiết kế MMA hoạt động tại vùng tần số 2-18 GHz, do đó kích thước ô cơ sở được chọn trong khoảng 10-20 mm. Từ đó, cấu trúc được thiết kế và mô phỏng trên phần mềm CST. Tại vùng tần số này, MMA có nhiều ứng dụng trong giảm phản xạ radar, cảm biến...

3.1. Ảnh hưởng của tổn hao kim loại lên tương tác giữa các lớp và tính chất hấp thụ

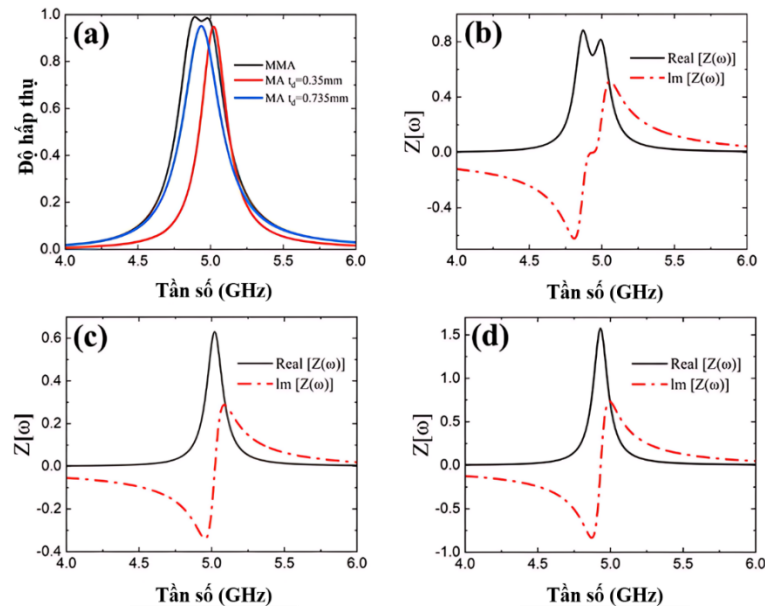
3.1.1. MMA có tổn hao Ohmic nhỏ

Cấu trúc ô cơ sở của MA lớp đơn và đa lớp, hoạt động trong vùng tần số GHz được mô tả trong Hình 3.1 MA đơn lớp bao gồm một lớp kim loại-điện môi, được đặt trên một tấm kim loại liên tục, với kích thước ô cơ sở là a . MA đa lớp được tạo ra bằng cách tăng số lượng các lớp kim loại-điện môi. Trong lớp kim loại-điện môi, phần kim loại được tạo hoa văn với cấu trúc hình dấu cộng có độ dày t_m , chiều dài b và chiều rộng c , và được đặt trên một điện môi liên tục có độ dày t_d . Tấm kim loại liên tục dưới cùng có độ dày t_b . MMA hoạt động tối ưu với các tham số cấu trúc của ô cơ sở được thiết lập như sau: $a = 18\text{mm}$, $b = 16\text{mm}$, $c = 7\text{mm}$, $t_b = 0.035\text{mm}$ và $t_m = 0.035\text{mm}$. Trong nghiên cứu này, điện môi được sử dụng là FR-4 với hằng số điện môi là 4.3 và tan tổn thất là 0.025. Các lớp kim loại được làm bằng đồng có độ dẫn điện là $5.96 \times 10^7 \text{ S/m}$.

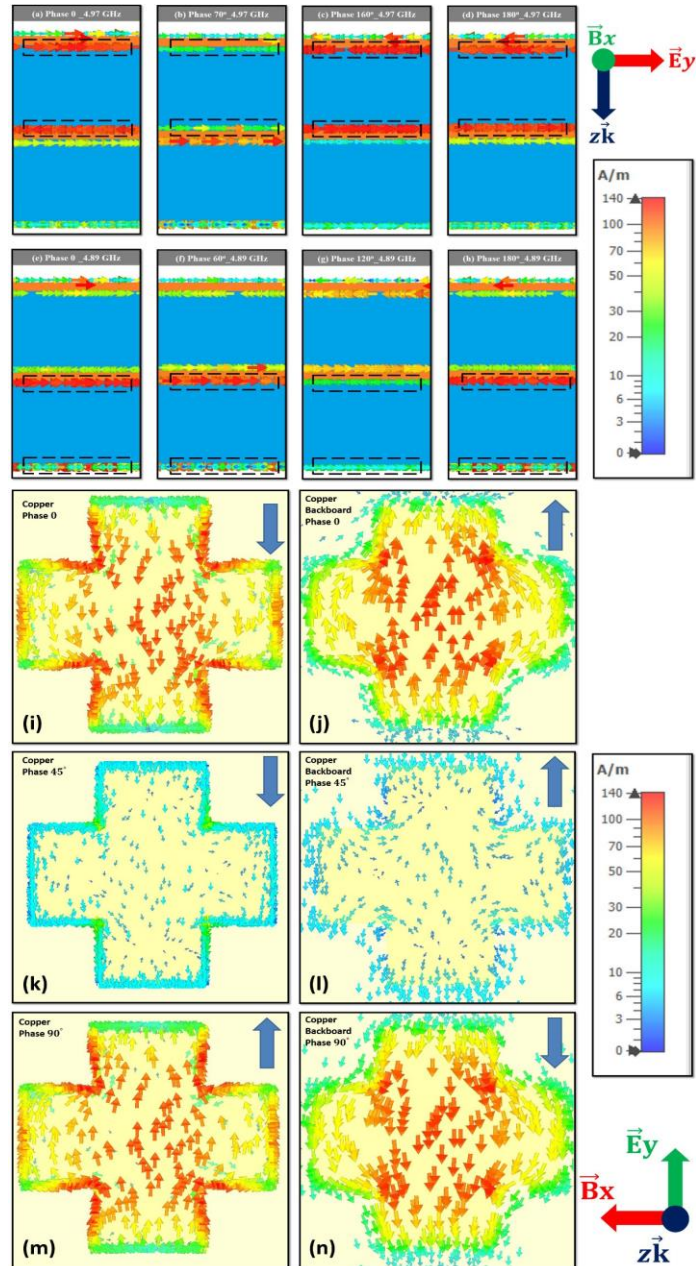


Hình 3.1 Mô phỏng cấu trúc MA (a) đơn lớp và (b) hai lớp

Cấu trúc MMA nhiều lớp cho kết quả phổ hấp thụ với độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số 4.84 – 5.02 GHz, với FBW là 3.65% như trong Hình 3.2 (a). Có hai đỉnh hấp thụ cực đại ở 4.89 và 4.97 GHz với độ hấp thụ lần lượt là 98.99% và 98.44%. Băng thông hấp thụ trên 90% của cấu trúc MMA nhiều lớp rộng hơn lần lượt là 360% và 257% so với MA một lớp tương ứng với $t_d = 0.35$ và 0.735mm. Cơ chế hấp thụ của MA hoạt động bằng cách giảm phản xạ thông qua việc phối hợp trở kháng với không khí xung quanh. Hình 3.2 (b) mô tả phổ trở kháng của MA nhiều lớp, ở tần số cộng hưởng. Trở kháng tương đối gần bằng 0.9, do đó sự phản xạ của sóng điện từ trở nên không đáng kể. Ngoài ra, phổ trở kháng của MA đơn lớp với $t_d = 0.35$ và 0.735 mm cũng được nghiên cứu, như trong Hình 3.2 (c) và 3.2 (d).



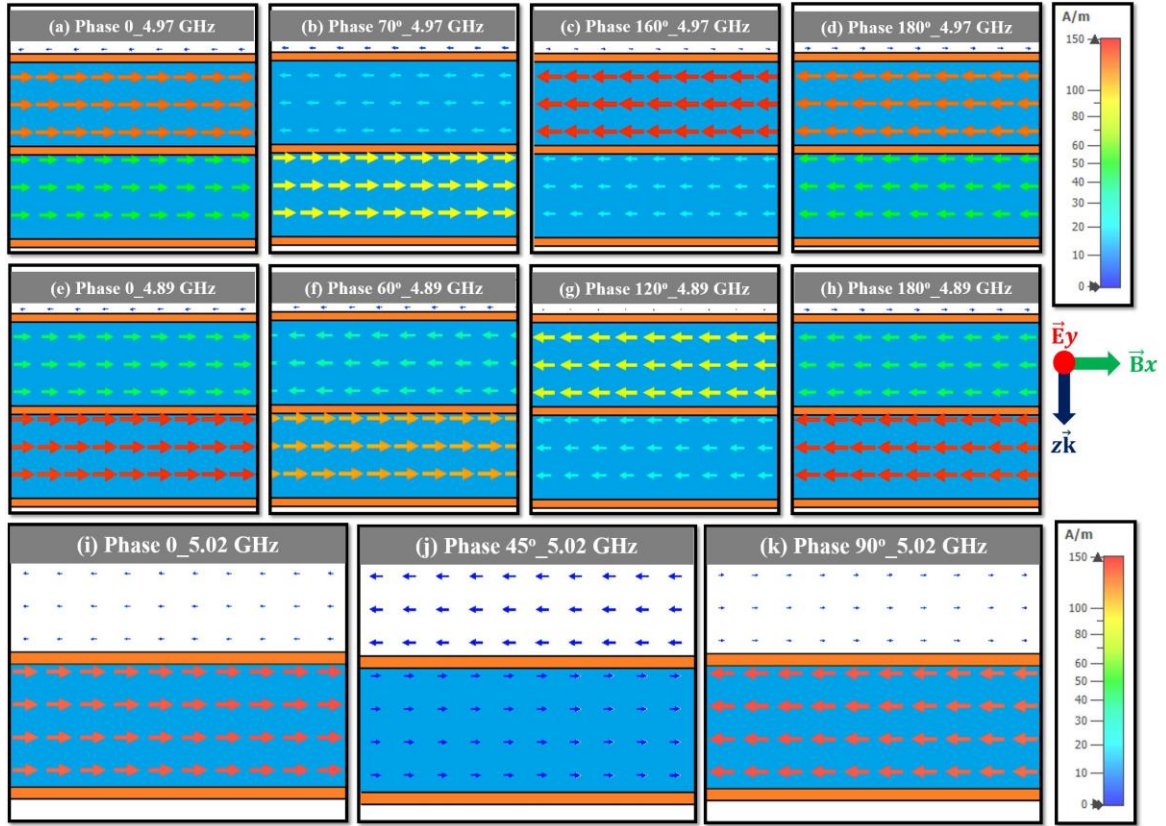
Hình 3.2. (a) Phổ hấp thụ của MMA và MA đơn lớp với độ dày lớp điện môi khác nhau. (b) Trở kháng hiệu dụng của MMA và MA đơn lớp với $t_d =$ (c) 0.35 và (d) 0.735 mm.



Hình 3.3. Phân bố dòng điện bề mặt tại (a)-(d) 4.97 và (e)-(h) 4.89 GHz của MMA. (i)-(n) Phân bố dòng điện bề mặt tại 5.02 GHz của MA đơn lớp.

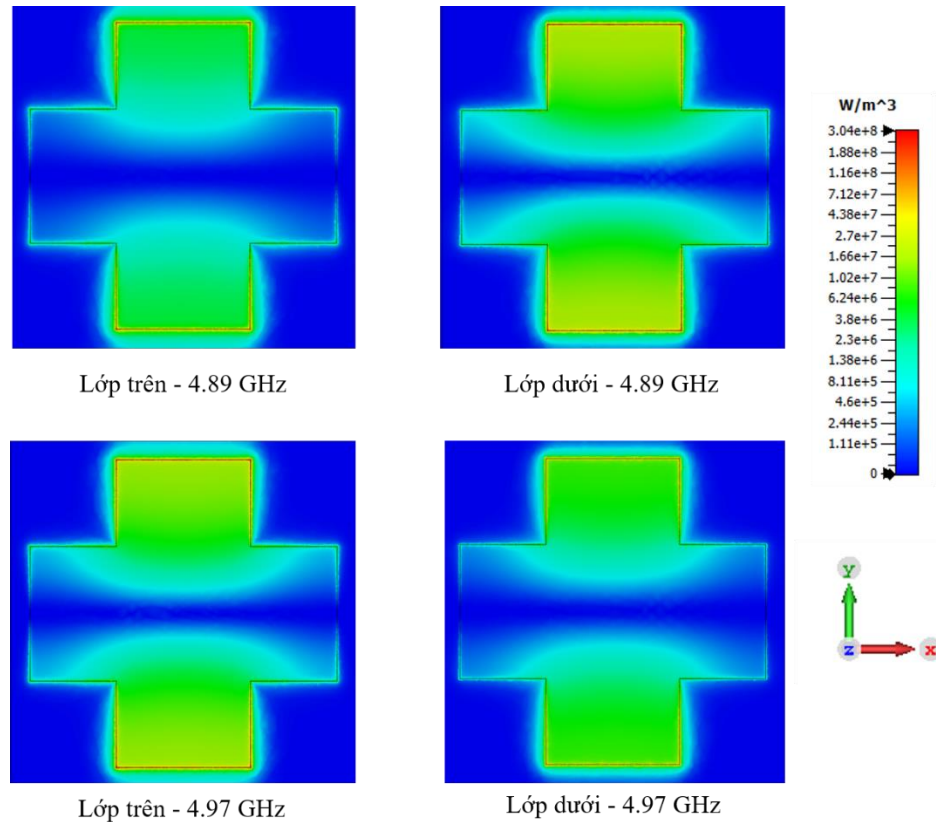
Để làm rõ tương tác giữa các lớp kim loại, phân bố dòng điện và từ trường cũng được nghiên cứu. Hình 3.3 trình bày phân bố dòng điện bề mặt ở các pha khác nhau tại tần số cộng hưởng 4.97 và 4.89 GHz của MMA. Kết quả cho thấy dòng điện bề mặt trên các lớp kim loại có hướng ngược nhau, điều này cho thấy cộng hưởng từ xảy ra giữa các lớp đó. Hình 3.3 (a)-3.3 (d) cho thấy dòng điện ngược song song cường độ cao xuất hiện chủ yếu giữa các lớp kim loại hình dấu cộng ở trên tại 4.97 GHz. Ở pha 160°, dòng điện bề mặt giữa hai lớp kim loại hình dấu cộng đạt cường độ cực đại, như thể hiện trong

Hình 3.3 (c). Ngoài ra, dòng điện bề mặt ngược song song cũng được quan sát thấy giữa lớp hình dấu cộng ở giữa và lớp liên tục ở dưới cùng. Tuy nhiên, các dòng điện này không cùng pha và cường độ của chúng yếu hơn nhiều so với các dòng điện trên hai lớp hình dấu cộng.



Hình 3.4. Phân bố từ trường tại (a)-(d) 4.97 và (e)-(h) 4.89 GHz của MMA. (i-n) Phân bố từ trường tại 5.02 GHz của MA đơn lớp.

Để hình dung tốt hơn các cộng hưởng từ ở tần số hấp thụ, người ta đã nghiên cứu sự phân bố từ trường. Hình 3.4 cho thấy từ trường cảm ứng xuất hiện giữa hai lớp kim loại phía trên và giữa hai lớp kim loại phía dưới. Ở tần số 4.97 GHz, một từ trường mạnh xuất hiện giữa các lớp đồng trên cùng và giữa, như thể hiện trong Hình 3.4 (a)-3.4 (d). Từ trường có cường độ yếu hơn và pha trễ cũng được quan sát thấy giữa các lớp đồng ở giữa và dưới cùng. Mặt khác, ở tần số 4.89 GHz có từ trường cường độ cao hơn, tập trung giữa các lớp đồng ở giữa và dưới cùng, và từ trường yếu hơn và pha trễ giữa các lớp đồng ở trên cùng và giữa. Phân bố từ trường cảm ứng phù hợp với dòng điện bề mặt được thể hiện trong Hình 3.3. Tương tự như vậy, khi so sánh với phân bố từ trường ở tần số hấp thụ của MA đơn lớp với $t_d = 0,35$ mm (Hình i-n), từ trường cảm ứng của cấu trúc nhiều lớp đảo ngược hướng trên một khoảng pha là 180° , gần gấp đôi so với cấu trúc lớp đơn.

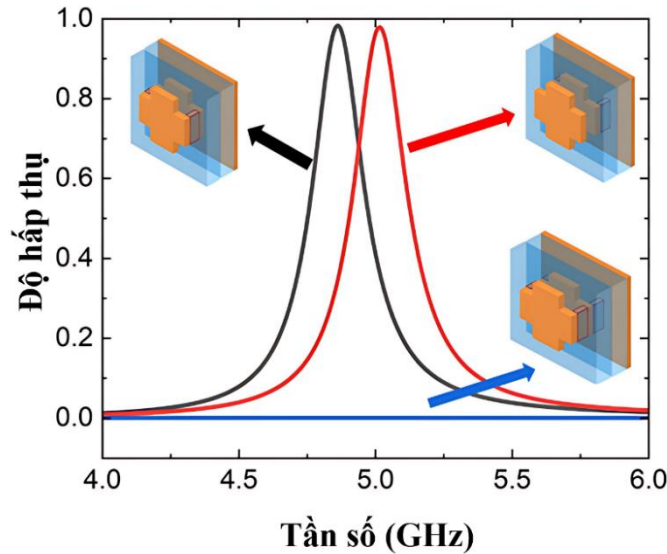


Hình 3.5. Mô phỏng phân bố năng lượng tổn hao giữa các lớp MMA.

Hình 3.5 biểu diễn hình ảnh mô phỏng phân bố năng lượng tổn hao giữa các lớp của MMA tại tần số 4.89 GHz và 4.97 GHz cho thấy năng lượng điện từ chủ yếu tập trung tại các biên của phần hình dấu cộng ở cả lớp trên và lớp dưới. Ở tần số 4.89 GHz, các có năng lượng tổn hao lớn tập trung tại rìa cấu trúc của cả hai lớp, cho thấy đây là vị trí diễn ra sự ghép cộng hưởng hiệu quả giữa các lớp. Trong đó, lớp phía dưới cho thấy năng lượng tổn hao có cường độ lớn hơn so với lớp phía trên. Tại tần số 4.97 GHz, vùng năng lượng tổn hao vẫn chủ yếu tại vùng biên của cấu trúc theo chiều dọc, tuy nhiên, tại tần số này, tổn hao năng lượng của lớp phía trên có cường độ lớn hơn so với lớp phía dưới.

Để xác nhận về mặt định lượng rằng sự hấp thụ được dẫn dắt bởi tương tác từ giữa các lớp kim loại, chúng tôi đã thiết lập các đầu nối bằng đồng tạo thành cầu nối giữa các lớp đồng. Các đầu nối đã loại bỏ điện dung hiệu dụng trong mô hình LC, dẫn đến việc triệt tiêu cộng hưởng từ. Trong trường hợp có một hệ thống cầu nối bổ sung được lắp đặt giữa các lớp khác nhau, phổ hấp thụ đã thu được cho từng trường hợp được thể hiện trong Hình 3.6. Khi các lớp trên cùng và giữa được kết nối, một đỉnh hấp thụ xuất hiện ở 4.89 GHz. Bằng cách kết nối các lớp giữa và dưới cùng, đỉnh hấp thụ tối đa được hiển thị ở tần số 4.97 GHz. Các đỉnh hấp thụ bị dập tắt hoàn toàn khi tất cả các lớp kim

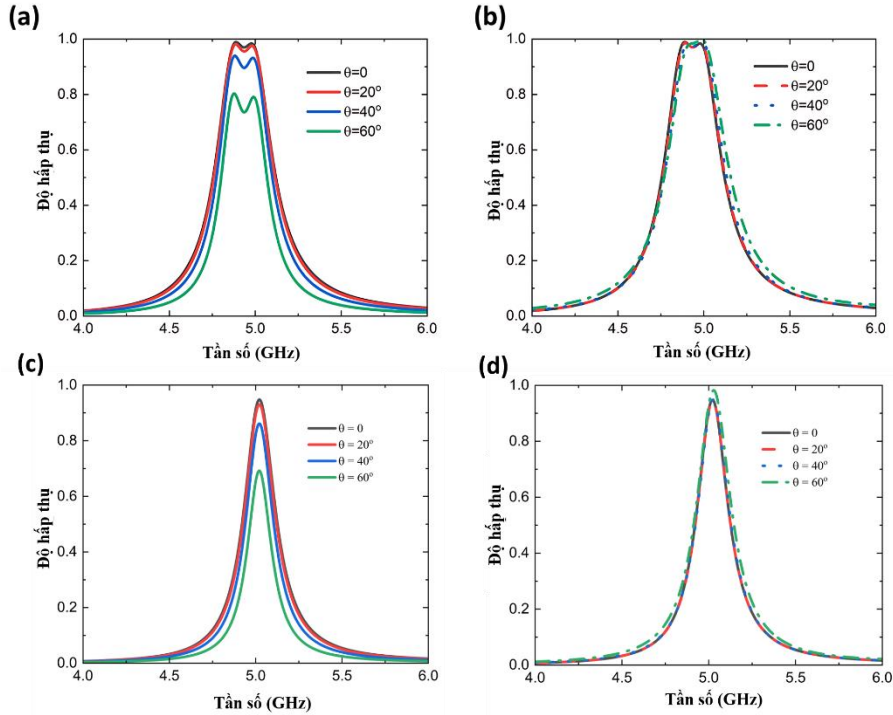
loại được kết nối. Điều này chỉ ra rằng sự hấp thụ của MA đa lớp là do cộng hưởng từ giữa các lớp. Tương tác giữa lớp hình dấu cộng ở giữa và lớp liên tục ở dưới cùng dẫn đến đỉnh cộng hưởng ở tần số 4.89 GHz. Tương tác giữa hai lớp dấu cộng dẫn đến đỉnh cộng hưởng ở tần số 4.97 GHz. Trong cấu trúc này, khoảng hở của chiều rộng lớn (2 mm) nên điện dung nằm ngang giữa các dấu cộng có tác động rất nhỏ đến đáp ứng tần số tổng thể của cấu trúc. Do đó, giá trị điện dung này có thể bị bỏ qua trong mô hình này [16].



Hình 3.6. Phổ hấp thụ của MMA khi đặt thêm các đầu nối giữa các lớp.

Hình 3.7 minh họa hiệu suất hấp thụ của MMA được đề xuất đối với các góc sóng tới khác nhau ở cả mode TE và mode TM. Hình 3.7 (a) mô tả phổ hấp thụ của MMA ở mode TE với các góc tới khác nhau. Đáng chú ý, ở mode TE, sự thay đổi góc tới gây ra sự dịch chuyển tần số tối thiểu, cùng với đó là sự giảm nhẹ về độ hấp thụ khi góc tới (θ) thay đổi từ 0 đến 20°. Ở 20°, các đỉnh hấp thụ đạt 98% và 97%. Sau đó, khi góc tới đạt 40°, độ hấp thụ giảm nhẹ xuống còn 94% và 93% tương ứng. Hơn nữa, khi góc tới đạt 60°, độ hấp thụ giảm xuống dưới 80%, tức là lần lượt là 80% và 79%. Ngược lại, trong mode TM như được mô tả trong Hình 3.7 (b), khả năng hấp thụ và tần số hấp thụ ổn định hơn theo góc tới, so với mode TE. Ví dụ, tại $\theta = 40^\circ$ và 60° , hai đỉnh cho thấy độ hấp thụ lần lượt là 97% và 99%, và 98% và 99%. Khả năng hấp thụ ổn định trong mode TM có thể được hiểu là do cộng hưởng từ. Độ hấp thụ được duy trì tốt vì góc tới xiên không làm thay đổi hướng của từ trường trong mode TM. Phổ hấp thụ của MA đơn lớp với các góc tới khác nhau trong mode TE cũng được khảo sát trong hình 3.7 (c). Kết quả cho thấy, với các góc tới khác nhau, sự thay đổi phổ hấp thụ của MA có xu hướng giống với

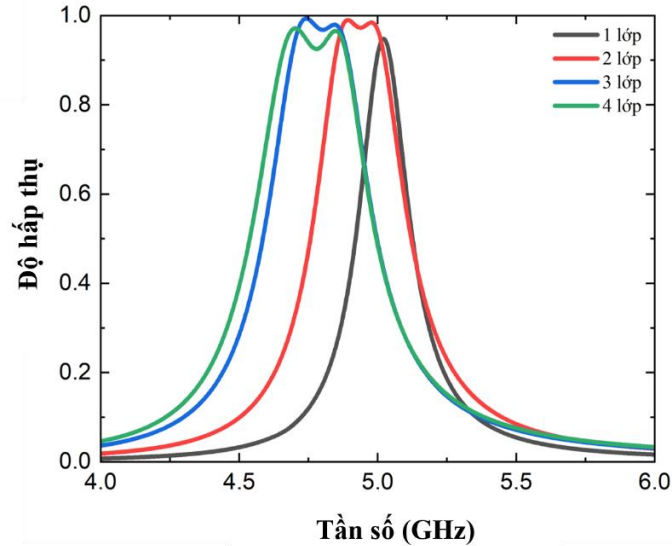
MMA, tuy nhiên MMA có khả năng giữ được cường độ hấp thụ tốt hơn với góc tới lớn. MA chỉ duy trì được độ hấp thụ lớn hơn 90% với $\theta = 20^\circ$. Khi tăng lên 40° độ hấp thụ giảm xuống dưới 90% và giảm xuống dưới 70% với $\theta = 60^\circ$. Tuy nhiên, tại mode TM, giống như MMA, MA cũng có khả năng duy trì được độ hấp thụ với góc tới lớn. MA đơn lớp có độ hấp thụ lớn 90% ngay cả khi $\theta = 60^\circ$ như mô tả trong hình 3.7 (d).



Hình 3.7. Sự thay đổi của phổ hấp thụ với các góc tới khác nhau của MMA trong các mode (a) TE, (b) TM và MA đơn lớp trong mode TE (c), TM (d)

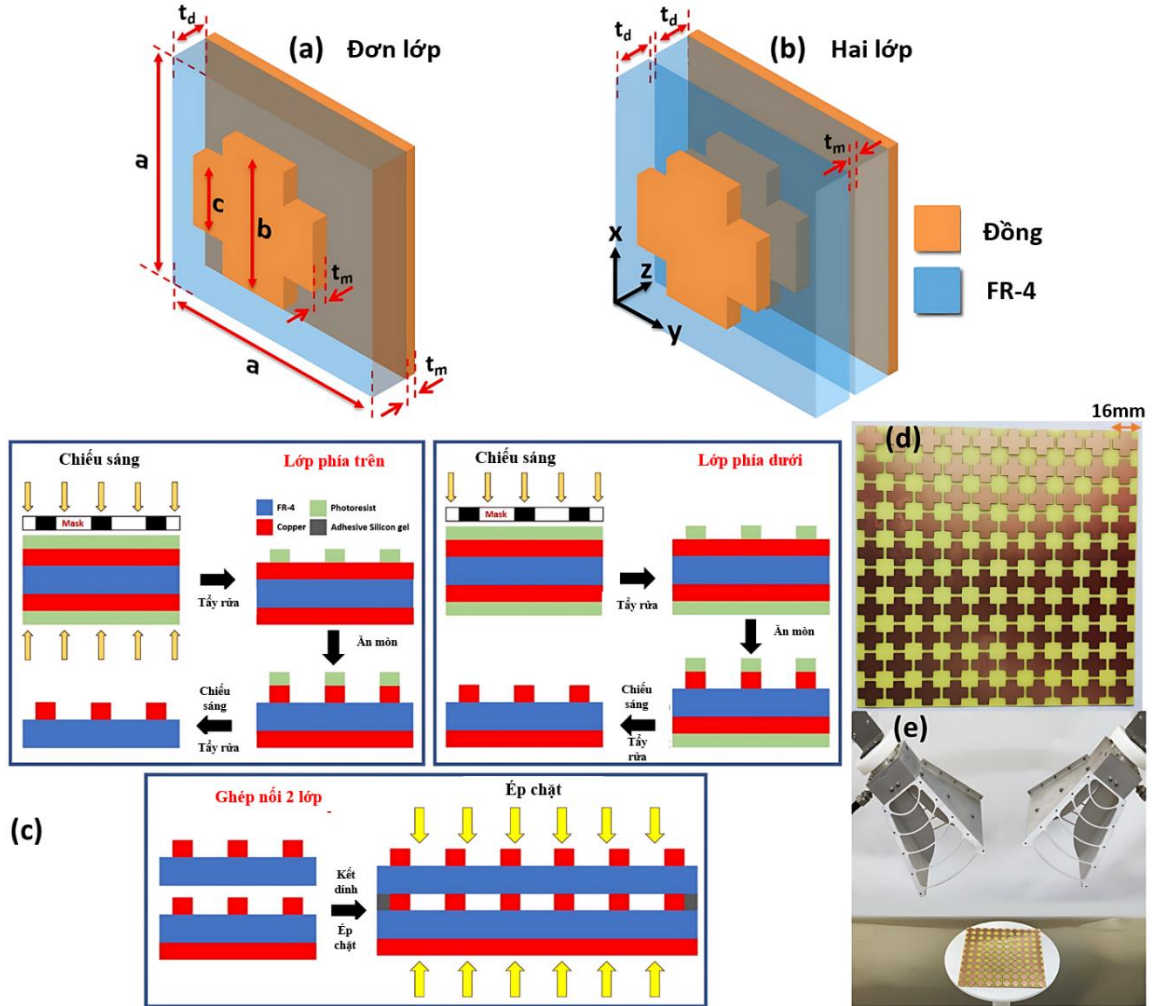
Để làm rõ hơn sự tăng cường băng thông hấp thụ của cấu trúc bằng cách tăng thêm nhiều lớp hơn, phổ hấp thụ của cấu trúc MMA với số lượng lớp hấp thụ khác nhau được thể hiện trong Hình 3.8. Các thông số thiết kế của cấu trúc 3 và 4 lớp giống hệt với các thông số của cấu trúc MMA 2 lớp được đề xuất. Tuy nhiên, để tối ưu độ hấp thụ và băng thông hấp thụ, độ dày của lớp điện môi, được ký hiệu là t_d , đã được điều chỉnh thành 0.3 mm đối với cấu trúc 3 lớp và 0.25 mm đối với cấu trúc 4 lớp. Cấu trúc MA đơn lớp chỉ cho 01 đỉnh hấp thụ lớn hơn 90% tại tần số 5.02 GHz. MMA hai lớp có băng thông hấp thụ trong khoảng từ tần số 4.84 đến 5.02 GHz, với độ hấp thụ lớn hơn 90%. Khi chuyển sang cấu trúc ba lớp, băng thông hấp thụ với độ hấp thụ lớn hơn 90% được tăng lên thành 4.68–4.89 GHz, tăng 16% so với cấu trúc MMA lớp. Với cấu trúc MMA 4 lớp, băng thông hấp thụ được mở rộng hơn nữa, dao động từ tần số 4.65 đến 4.89 GHz, tăng 33% so với cấu trúc MMA hai lớp và độ hấp thụ được duy trì lớn hơn 90%. Nghiên cứu này chứng minh rằng băng thông hấp thụ rộng của vật liệu là do các tương tác giữa

các lớp. Do đó, việc tăng số lượng lớp cũng làm tăng băng thông hấp thụ của MMA, so với các nghiên cứu trước đây liên quan đến MMA, thường bao gồm các lớp cộng hưởng có kích thước khác nhau hoặc các lớp cộng hưởng có hình dạng khác nhau [18], [113]. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một cấu trúc MMA hoạt động trong vùng tần số GHz với các lớp cộng hưởng có hình dạng/kích thước giống hệt nhau, dễ sản xuất hơn. Mặc dù băng thông hấp thụ tương đối hẹp, việc mở rộng băng thông hấp thụ cũng có thể đạt được bằng cách tăng số lượng lớp trong cấu trúc MMA.



Hình 3.8. Phổ hấp thụ của các cấu trúc MMA với số lớp khác nhau.

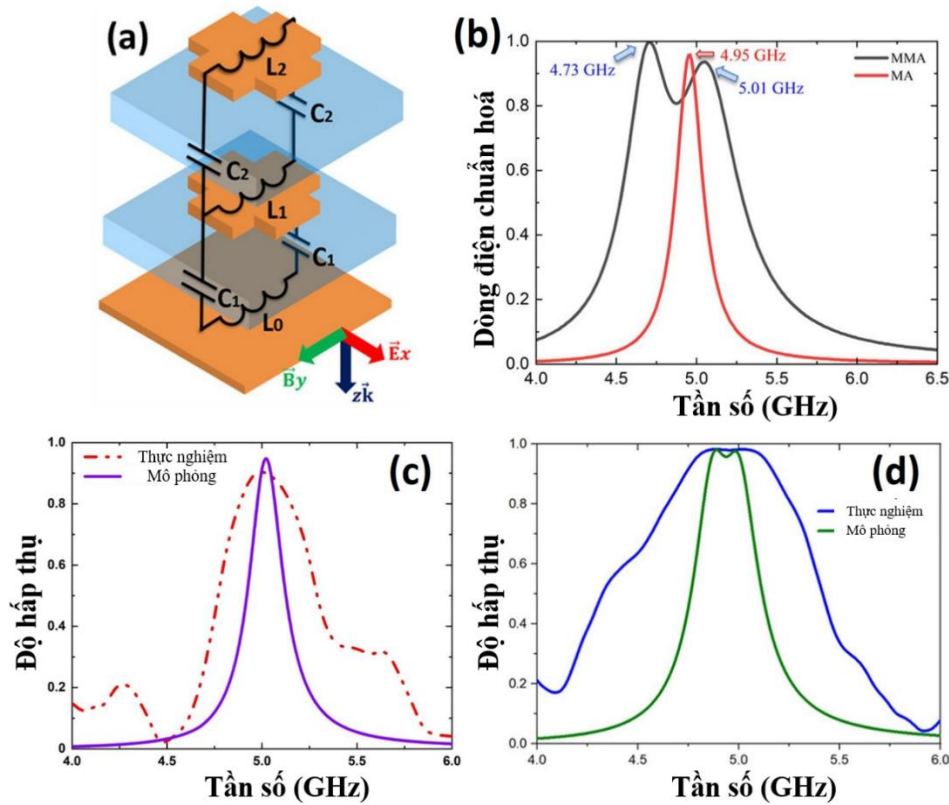
Để chứng minh các tính chất điện từ của MMA được đề xuất, một mẫu có 10×10 ô cơ sở đã được chế tạo trên một chất nền FR-4. Điện môi FR-4 được sử dụng có độ dày 0.35mm. Trong nghiên cứu này, MMA được chế tạo theo từng lớp, dựa trên phương pháp quang khắc, với tham số cấu trúc giống thiết kế tối ưu trong mô phỏng. Các lớp đơn lẻ sau khi chế tạo được liên kết chặt chẽ với nhau và được đặt trên một lớp kim loại liên tục. Để liên kết hai lớp đơn với nhau, gel silicon đã được sử dụng trên 4 cạnh ngoài của hai lớp, sau đó sử dụng các kỹ thuật ép và hút chân không. Điều này giúp gel silicon gần như không ảnh hưởng đến các tính chất điện từ của MMA. Hình 3.9 (c) trình bày sơ đồ quy trình chế tạo với các bước chi tiết. Hình 3.9 (d) là ảnh chụp mẫu chế tạo với kích thước tổng thể là $180 \times 180 \text{ mm}^2$. Kim loại đồng được sử dụng cho các lớp cộng hưởng ở trên cùng và lớp liên tục ở dưới cùng.



Hình 3.9. Cấu trúc MA (a) đơn lớp, (b) đa lớp. (c) Quy trình chế tạo vật liệu biến hoá có cấu trúc 2 lớp. Mẫu chế tạo (d) và (e) sơ đồ cấu hình thử nghiệm.

Các đặc tính hấp thụ của MMA chế tạo được đo trong không gian tự do. Hệ thống phân tích mạng vector được sử dụng để đo các tham số S trong Hình 3.9 (e). Trong thực nghiệm, do các lớp có mặt sau bằng đồng, độ hấp thụ được xác định bằng phương trình được ký hiệu là $A = 1 - |S_{11}|^2$, trong đó S_{11} biểu thị tham số tán xạ được xác định theo lý thuyết tương ứng với sóng phản xạ. Để tính hệ số S_{11} trong cấu hình đo không gian tự do, ăng-ten tuyến tính hình sừng đã được sử dụng. Các ăng-ten hình sừng được đặt ở cùng một phía so với mặt phẳng mẫu để đo sóng phản xạ từ mẫu MA. Ngoài ra, do kích thước vật lý của ăng-ten, không thể đo chính xác sự phản xạ lại ở góc tới vuông góc. Do đó, các ăng-ten được bố trí sao cho góc tới xấp xỉ 10° , mặc dù có độ lệch, nhưng được coi là điều kiện gần đúng của góc tới vuông góc.

Trong quá trình hiệu chuẩn, cần thiết cho thiết lập đo lường của chúng tôi, một tấm đồng phản chiếu các kích thước của cấu trúc MMA được sử dụng với vai trò là chuẩn tham chiếu. Tấm đồng được giả định là một bộ phản xạ hoàn hảo và được định vị ở vị trí giống hệt như mẫu MA trong môi trường thử nghiệm. Hiệu chuẩn được thực hiện bằng cách lấy tín hiệu tham chiếu từ phản xạ sóng điện từ được đo từ tấm đồng, được coi là vật thể phản xạ hoàn hảo trong điều kiện thử nghiệm này. Tín hiệu tham chiếu này được lấy làm chuẩn cho phản xạ từ các mẫu MA thực. Bằng cách chuẩn hóa tín hiệu phản xạ từ mẫu MA và tín hiệu phản xạ từ tấm đồng (tín hiệu tham chiếu), hệ số phản xạ được ước tính chính xác, do đó làm sáng tỏ các đặc điểm hấp thụ của cấu trúc MA được đề xuất.



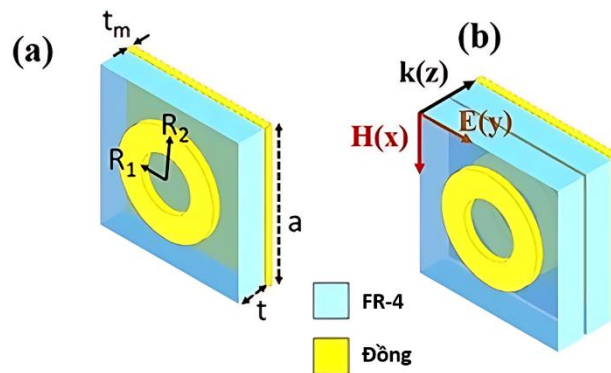
Hình 3.10. (a) Mô hình mạch tương đương của MMA. (b) Tính toán dòng điện chuẩn hóa trong MA đơn lớp và MMA, theo mô hình mạch LC. Phổ hấp thụ thực nghiệm và mô phỏng của (c) MA đơn lớp và (d) MMA.

Mô hình mạch điện tương đương của MMA được thể hiện trong hình 3.10 (a). Phổ hấp thụ trong MA tỷ lệ thuận với dòng điện cảm ứng, là tổng mức tiêu thụ dòng điện trong các mạch con. Hình 3.10 (b) trình bày phổ tính toán của tổng dòng điện của mô hình mạch cho MA đơn lớp và MMA. Trong trường hợp của MA đơn lớp, một đỉnh hấp

thụ xuất hiện ở 4.95 GHz. Mặt khác, đối với cấu hình MMA, hình dạng của phổ dòng điện phù hợp với hình dạng của phổ hấp thụ, cho thấy hai đỉnh ở 4.73 và 5.01 GHz.

So sánh phổ hấp thụ của MA một lớp và MMA trong thực nghiệm và mô phỏng được đưa ra trong Hình 3.10 (c) và 3.10 (d). Đối với cấu trúc MA đơn lớp, kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy một đỉnh duy nhất ở 5.02 và 5.00 GHz với độ hấp thụ lần lượt là 94.7% và 90.3%. Đối với MMA được đề xuất, trong mô phỏng, độ hấp thụ đạt lớn hơn 90% trong dải tần số 4.84 – 5.02 GHz. Độ hấp thụ thực nghiệm đạt 90% trong dải tần số rộng hơn là 4.72 – 5.18 GHz. Do đó, độ bán rộng MMA rộng hơn lần lượt là 163% và 200% so với MA một lớp. Sự sai khác giữa mô phỏng và thực nghiệm có thể là do lỗi trong quá trình chế tạo mẫu. Có một số yếu tố có thể dẫn đến sự khác biệt giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm, chẳng hạn như độ dẫn điện thực tế của các lớp kim loại thường thấp hơn, các yếu tố nhiễu của môi trường, sự khác biệt nhỏ về kích thước giữa các cấu trúc cộng hưởng ở các lớp khác nhau trong quá trình quang khắc hoặc sự không thẳng hàng giữa các lớp trong quá trình liên kết lớp. Ngoài ra, có thể có sự sai lệch về hệ số tổn hao điện môi trong thực tế và thực nghiệm, điều này cũng đóng góp vào sự sai khác giữa mô phỏng và thực nghiệm.

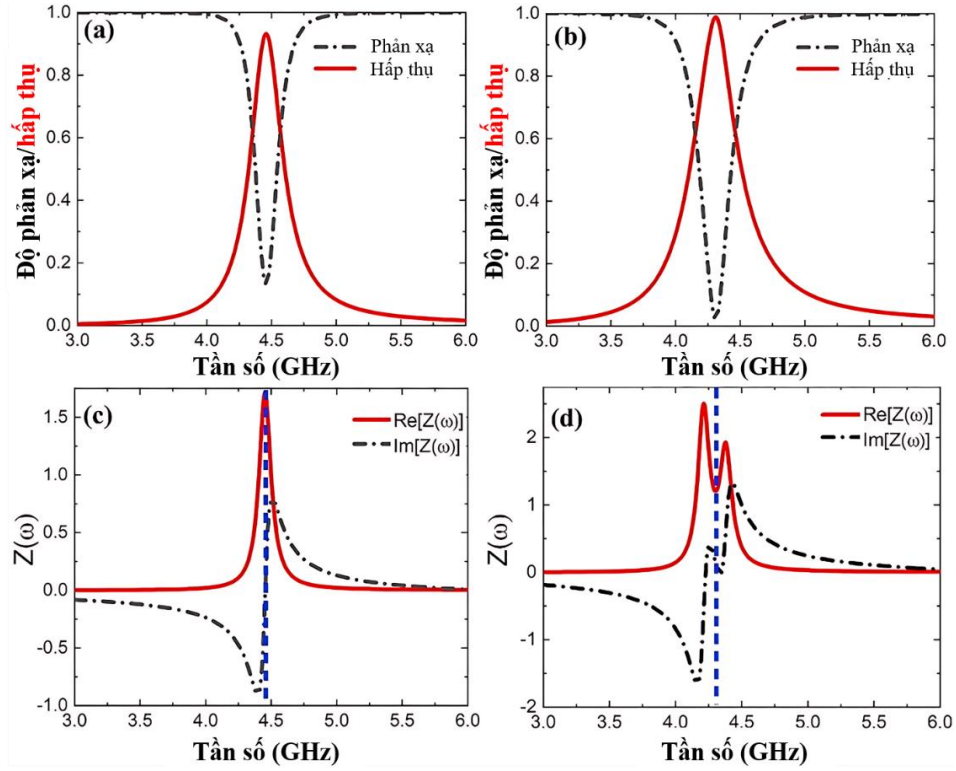
Ngoài ra, với mục tiêu nghiên cứu cấu trúc MMA duy trì độ hấp thụ với góc tới lớn, MMA được đề xuất bao gồm hai lớp cộng hưởng hình vòng. Dưới góc tới bình thường, MMA được đề xuất cho đỉnh hấp thụ ở 4.31 GHz với độ hấp thụ là 98.9%. MMA được đề xuất có đặc tính không nhạy với góc tới cho cả phân cực TE và TM. MMA được đề xuất có đỉnh hấp thụ rất ổn định dưới góc tới lớn, khiến nó có nhiều tiềm năng trong các ứng dụng thực tế.



Hình 3.11. Sơ đồ thiết kế MA (a) và MMA (b)

Hình 3.11 (a) và (b) trình bày cấu trúc ô cơ sở của MA đơn lớp và MMA. MA đơn lớp được cấu tạo từ một lớp cộng hưởng kim loại ở trên cùng, một lớp điện môi FR-4 ở giữa và một tấm kim loại liên tục ở dưới cùng. MMA được tạo thành bằng cách xếp

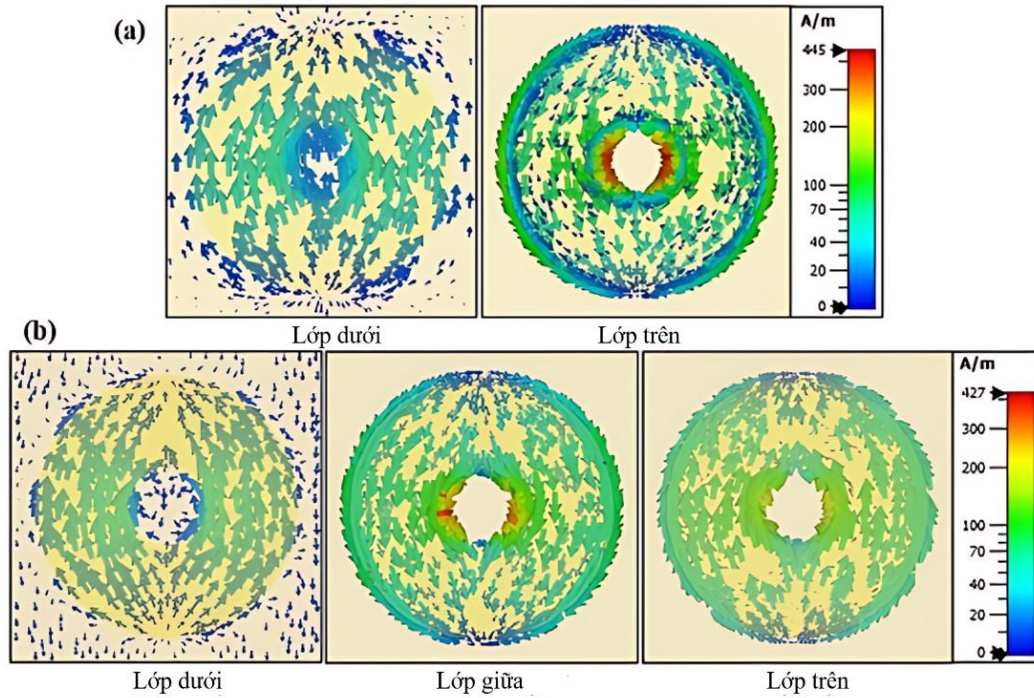
chồng các lớp điện môi và cấu trúc cộng hưởng kim loại. Cả MA đơn lớp và MMA đều có cùng thông số hình học. Kích thước ô cơ sở được tối ưu hóa là $a = 20$ mm. Cấu trúc cộng hưởng kim loại được thiết kế như một vòng cộng hưởng tròn, với độ dày $t_m = 0.036$ mm, bán kính ngoài $R_1 = 8.5$ mm và bán kính trong $R_2 = 2.5$ mm. FR-4 có hằng số điện môi là 4.3 và hệ số tổn hao là 0.025 với độ dày $t = 0.9$ mm và các lớp kim loại được làm bằng đồng có độ dẫn điện là 5.96×10^7 S/m.



Hình 3.12. Mô phỏng (a) phổ hấp thụ và (c) trở kháng hiệu dụng của MA đơn lớp; (b) phổ hấp thụ và (d) trở kháng hiệu dụng của cấu trúc MMA.

Hình 3.12 biểu diễn phổ hấp thụ của MA một lớp và MMA được thiết kế cho chế độ TE khi sóng điện từ chiếu vuông góc với bề mặt mẫu. Có thể thấy rằng MA đơn lớp có đỉnh hấp thụ ở tần số 4.45 GHz, với độ hấp thụ là 93.1%. Đáng chú ý là khi hai lớp cấu trúc được xếp chồng lên nhau tạo thành cấu trúc MMA, độ hấp thụ tăng lên 98.9% ở tần số 4.31 GHz. Để đạt được độ hấp thụ cao, các thông số hình học của cấu trúc đề xuất đã được tối ưu hóa để đáp ứng điều kiện phối hợp trở kháng giữa cấu trúc và môi trường tự do. Kết quả mô phỏng minh họa trong Hình 3.12 (c) cho thấy ở tần số 4.45 GHz, phần thực của trở kháng hiệu dụng của MA đơn lớp là khoảng 1.7 và phần ảo bằng 0, dẫn đến một phần sóng điện từ tới vẫn bị phản xạ và độ hấp thụ nhỏ hơn 1. Đối với trường hợp MMA, ở tần số 4.31 GHz, phần thực của trở kháng hiệu dụng là khoảng 1.2 và phần ảo bằng 0, trở kháng của MMA gần bằng trở kháng của không gian trống, dẫn

đến độ phản xạ giảm và độ hấp thụ tăng lên 98.9% (Như thể hiện trong hình 3.12 (b), (d)).

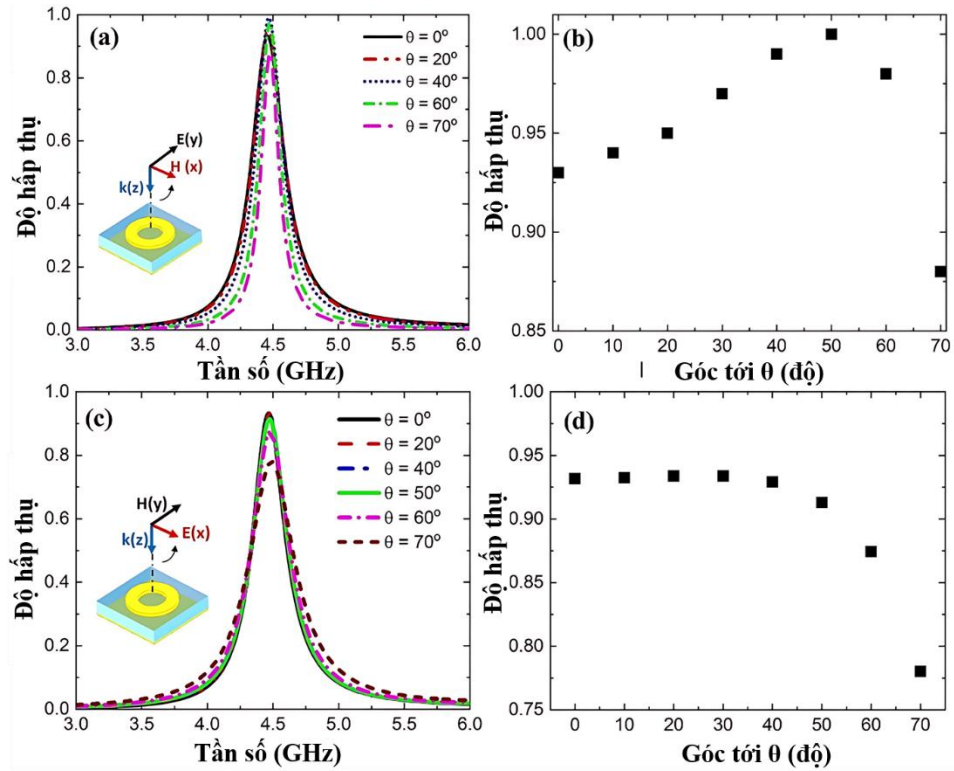


Hình 3.13. Phân bố dòng điện bề mặt trên (a) MA đơn lớp và (b) MMA tại các đỉnh hấp thụ.

Cơ chế hấp thụ của các cấu trúc MA và MMA được phân tích bằng sự phân bố dòng điện bề mặt trên các lớp kim loại. Đối với trường hợp một lớp, sự phân bố dòng điện bề mặt được trình bày trong Hình 3.13 (a). Kết quả cho thấy dòng điện bề mặt trên cùng và dưới cùng là ngược song song với nhau. Điều này khẳng định rằng cộng hưởng từ được kích thích và năng lượng điện từ được hấp thụ ở tần số 4.45 GHz. Sự phân bố dòng điện bề mặt trên các lớp kim loại của MMA được thể hiện trong Hình 3.13 (b). Kết quả cho thấy các dòng điện bề mặt trên các lớp kim loại ngược chiều nhau, cho thấy cộng hưởng từ được kích thích giữa các lớp này. Có thể thấy rằng đỉnh hấp thụ ở tần số 4.31 GHz xuất hiện do cộng hưởng từ giữa cả ba lớp kim loại, lớp dưới cùng, lớp giữa và lớp trên cùng của cấu trúc.

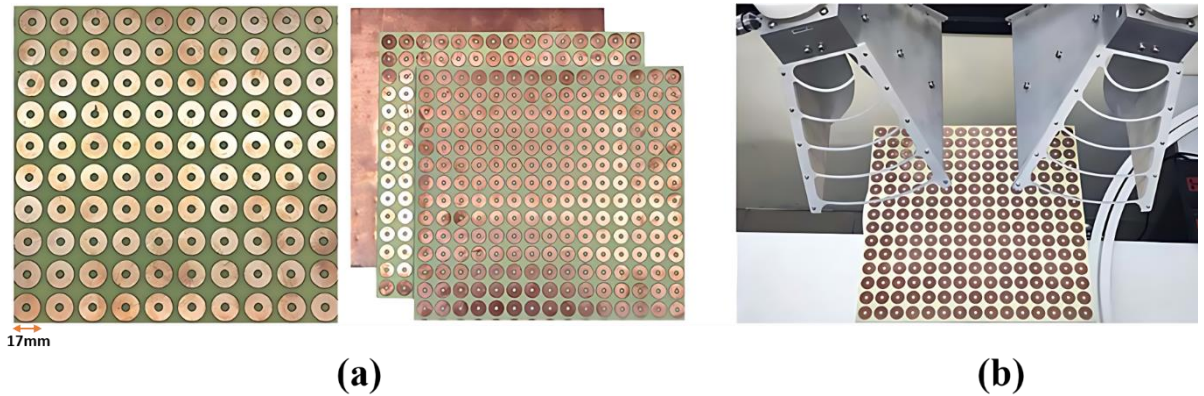
Để làm rõ vai trò của cấu trúc đa lớp trong việc hạn chế ảnh hưởng của góc tới lên phổ hấp thụ, trước tiên tác động của góc tới lên phổ hấp thụ của MA được nghiên cứu. Kết quả mô phỏng được trình bày trong hình 3.14. Trong trường hợp sóng phân cực TE, khi góc tới tăng, vị trí đỉnh hấp thụ của vật liệu hầu như không đổi. Tuy nhiên, khi góc tới tăng từ 0 đến 60°, cường độ hấp thụ tăng từ 93.1% lên 98.9%. Tương tự như trường hợp phân cực TE, với sóng điện từ phân cực TM, khi góc tới tăng, vị trí đỉnh hấp

thụ hầu như không đổi và cường độ hấp thụ vẫn đạt 91.4% với góc tới là 50° . Khi góc tới tăng lên 60° và 70° , độ hấp thụ giảm xuống lần lượt là 87.4% và 78.1%.



Hình 3.14. Sự thay đổi của phổ hấp thụ và đỉnh hấp thụ của MA dưới sóng phân cực TE (a), (b) và dưới sóng phân cực TM (c), (d) ở các góc tới khác nhau

Để đánh giá thực nghiệm các đặc tính điện từ của MMA được đề xuất, một mẫu với 15×15 ô cơ sở đã được chế tạo. Đầu tiên, MMA được chế tạo từng lớp một bằng kỹ thuật quang khắc. Thứ hai, hai lớp đơn được liên kết với nhau bằng gel silicon ở bốn cạnh ngoài và được đặt trên một lớp kim loại liên tục. Ba lớp này được ép lại với nhau trong môi trường chân không. Mẫu chế tạo được thể hiện trong hình 3.15 (a).

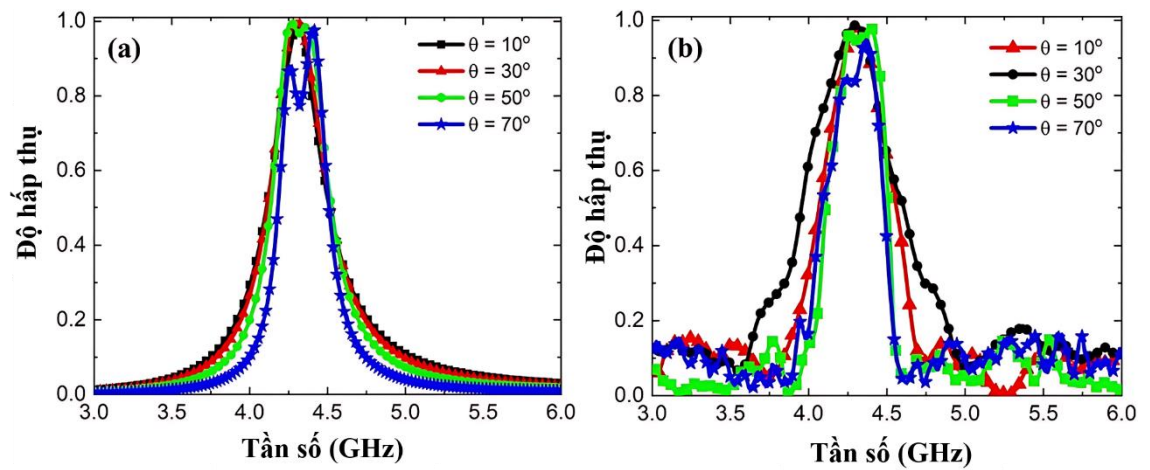


Hình 3.15. Mẫu chế thực nghiệm MMA (a), đo đặc tính chất MMA (b)

Các đặc tính điện từ của MMA đã được đo đạc thực nghiệm trong không gian tự do như minh họa trong Hình 3.15 (b). Do các lớp được phủ đồng, thành phần truyền qua được triệt tiêu và độ hấp thụ được xác định bởi $A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$, trong đó tham số S_{11} được đo bằng máy phân tích mạng vector R&SZNB20 được kết nối với hai ăng-ten sừng tuyến tính. Để đo sóng phản xạ từ mẫu MMA, hai ăng-ten này được bố trí cùng một phía so với mặt phẳng mẫu. Ngoài ra, do kích thước vật lý của ăng-ten, sóng phản xạ không thể được đo chính xác tại góc tới thông thường. Do đó, sóng phản xạ được đo trong trường hợp góc tới lớn hơn hoặc bằng 10° .

Quá trình hiệu chuẩn là cần thiết cho thiết lập phép đo để đảm bảo độ chính xác. Trong quá trình này, một tấm đồng có cùng kích thước với mẫu được sử dụng làm chuẩn tham chiếu. Tấm đồng được coi là một tấm phản xạ hoàn hảo và được đặt ở cùng vị trí với mẫu MMA trong môi trường thực nghiệm. Sóng phản xạ từ tấm đồng sẽ được đo. Tín hiệu tham chiếu này là chuẩn cho sóng phản xạ từ các mẫu MMA thực. Bằng cách chuẩn hóa tín hiệu phản xạ từ mẫu MMA và tín hiệu từ tấm đồng (tín hiệu tham chiếu), hệ số phản xạ được ước tính chính xác, qua đó giúp tính toán được khả năng hấp thụ của cấu trúc MA đề xuất. Với mỗi góc tới khác nhau, quá trình hiệu chuẩn sẽ được lặp lại trước khi đo độ phản xạ từ mẫu thực.

Ảnh hưởng của góc tới lên phổ hấp thụ của MMA được nghiên cứu cho cả sóng phân cực TE và TM. Hình 3.16 trình bày phổ hấp thụ mô phỏng và thực nghiệm của MA đa lớp dưới góc tới xiên với các góc 10° , 30° , 50° và 70° trong trường hợp sóng phân cực TE.

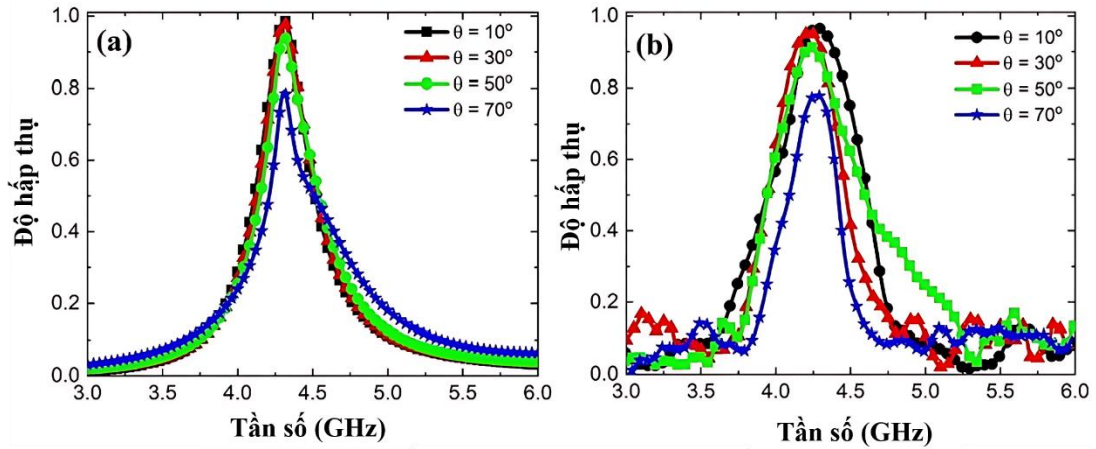


Hình 3.16. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng và (b) thực nghiệm của MMA ở các góc tới khác nhau dưới sóng phân cực TE, bao gồm 10° , 30° , 50° và 70° .

Trong cả mô phỏng và thực nghiệm, MMA được đề xuất cho thấy khả năng duy trì độ hấp thụ lớn, ngay cả ở góc tới 70° . Phổ mô phỏng cho thấy khi góc tới thay đổi từ 0 đến 30° , phổ hấp thụ vẫn không đổi, và có một đỉnh hấp thụ 98.9% xuất hiện ở tần số 4.31 GHz. Ở góc tới 50° , đỉnh này bị tách thành hai đỉnh ở tần số 4.27 và 4.37 GHz, với độ hấp thụ lần lượt là 99.6% và 98%. Khi góc tới tiếp tục tăng, cường độ hấp thụ của hai đỉnh này giảm xuống còn 88.7% và 97.5%. Kết quả thực nghiệm có sự phù hợp với mô phỏng. Cụ thể, phổ thực nghiệm chỉ ra rõ ràng một đỉnh hấp thụ ban đầu, quanh tần số 4.26 GHz với độ hấp thụ 98.1%, sau đó, dịch chuyển nhẹ sang tần số thấp hơn với độ hấp thụ 98.5% khi góc tới thay đổi từ 10° đến 30° . Đáng chú ý là đỉnh hấp thụ ban đầu được chia thành hai đỉnh ở 4.27 và 4.37 GHz dưới góc tới 50° . Hai đỉnh này giảm độ hấp thụ khi tăng góc tới lên 70° , với các giá trị giảm từ 96.7% và 98.3% xuống còn 84.3% và 95% tương ứng.

Kết quả chứng minh rằng cấu trúc hai lớp có ưu điểm vượt trội trong việc tăng cường khả năng hấp thụ của vật liệu trong cả trường hợp góc tới khác nhau. Cụ thể, khi góc tới bằng không, độ hấp thụ tăng từ 93.1% (đơn lớp) lên 98.9% (đa lớp) và cấu trúc đa lớp vẫn giữ được đỉnh hấp thụ với cường độ khoảng 97.5% khi góc tới là 70° . Ưu điểm của cấu trúc đa lớp có thể được làm rõ hơn thông qua hiệu ứng lai hóa. Trong trường hợp đơn lớp, đỉnh cộng hưởng bắt nguồn từ cộng hưởng từ xuất hiện do tương tác giữa cấu trúc cộng hưởng hình tròn và lớp kim loại liên tục. Khi góc tới tăng, cường độ cộng hưởng giảm, dẫn đến cường độ hấp thụ giảm dần. Trong trường hợp cấu trúc hai lớp, hiệu ứng lai hóa được hình thành ở các góc tới lớn. Kết quả là, đỉnh hấp thụ ban đầu (sóng tới pháp tuyến) bị chia thành hai đỉnh hấp thụ: một đỉnh dịch chuyển xanh và một đỉnh dịch chuyển đỏ so với đỉnh ban đầu (như thể hiện trong hình 3.15). Hai đỉnh hấp thụ này tương ứng với hai chế độ lai hóa [114-115]. Với các tham số hình học được tối ưu hóa, trở kháng hiệu dụng của cấu trúc đề xuất tương ứng với hai chế độ lai hóa này cho thấy xu hướng ngược nhau khi góc tới thay đổi. Ở tần số thấp hơn, vật liệu đạt được sự phối hợp trở kháng tốt nhất ở góc tới 50° . Nếu góc tới tiếp tục tăng lên 60° và 70° , sự phối hợp trở kháng giảm dần, dẫn đến giảm cường độ hấp thụ tại đỉnh này.

Hình 3.17 mô tả phổ hấp thụ mô phỏng và thực nghiệm của MMA đề xuất dưới sóng phân cực TM với các góc tới 10° , 30° , 50° và 70° . Cả kết quả mô phỏng và thực nghiệm đều cho thấy MMA được đề xuất có hiệu suất hấp thụ tốt, ngay cả ở góc tới 50° . Khác với trường hợp sóng phân cực TE, không quan sát thấy sự phân tách đỉnh hấp thụ khi góc tới lớn hơn 50° . Tuy nhiên, kết quả thực nghiệm cho thấy rõ ràng độ hấp thụ giảm khi góc tới tăng, từ 96.6% ở góc tới 10° và đạt 77.8% ở góc tới 70° . Sự sai lệch nhỏ



Hình 3.17. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng và (b) thực nghiệm của MMA ở các góc tới khác nhau dưới sóng phân cực TM, bao gồm 10° , 30° , 50° và 70° .

giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm là hiện tượng khó tránh khỏi do nhiều yếu tố vật lý và kỹ thuật chưa đạt trạng thái lý tưởng. Nguyên nhân chủ yếu xuất phát từ sự không hoàn hảo của vật liệu kim loại, điện môi thực tế và có thể bị chi phối bởi các yếu tố môi trường. Ngoài ra, các giới hạn của mô hình mô phỏng, điển hình là giả thiết điều kiện biên tuần hoàn vô hạn trong khi mẫu thực chỉ có kích thước hữu hạn, gây ra hiệu ứng biên, nhiễu trong phép đo, đều góp phần tạo nên sự sai khác quan sát được giữa kết quả lý thuyết và thực nghiệm. Sự khác nhau của sóng phân cực TE và TM ở các góc tới khác nhau có thể được giải thích bằng sự khác biệt trong các tương tác điện và từ của cấu trúc với sóng phân cực TE và TM. Đối với sóng phân cực TE, trường điện song song với bề mặt. Do đó, tương tác điện hầu như không thay đổi đối với các góc tới khác nhau. Tuy nhiên, bằng cách tăng góc tới, thành phần vuông góc của phân tử tăng lên, dẫn đến tăng cường tương tác giữa hai lớp và tạo ra một đỉnh hấp thụ mới. Ngược lại đối với sóng phân cực TM. Tương tác từ hầu như không thay đổi đối với các góc tới khác nhau vì thành phần từ trường luôn song song với bề mặt MA. Kết quả là, có một đỉnh hấp thụ được quan sát thấy dưới sóng phân cực TM tới ở góc xiên và sự hấp thụ giảm dần vì điều kiện phối hợp trở kháng không còn được thỏa mãn ở các góc tới lớn

3.1.2. MMA có độ tổn hao Ohmic lớn

Cấu trúc MMA sử dụng graphene gồm hai lớp đã thiết kế và mô phỏng hoạt động trong vùng GHz. Đầu tiên, một MA đơn lớp được tiến hành khảo sát bao gồm cấu trúc mực dẫn điện graphene trên chất nền điện môi FR-4 được đặt phía trên một tấm đồng liên tục. Sau đó, một lớp graphene-FR-4 thứ hai có kích thước giống hệt nhau được thêm vào để tạo ra cấu trúc hai lớp. Kết quả cho thấy, khi tăng số lớp graphene-FR-4, số lượng đỉnh hấp thụ cũng tăng lên, tuy nhiên chúng tách rời nhau, không đạt được hiệu ứng hấp

thụ băng thông rộng mong muốn. Để khắc phục hạn chế này, cấu trúc MMA gồm hai lớp graphene có thể thay đổi điện trở bề mặt được khảo sát. Nghiên cứu đã chứng minh rằng MMA graphene hai lớp đạt được độ hấp thụ lớn hơn 90% trải dài từ tần số 6.07 GHz đến 14.5 GHz với FBW đạt 81.96%. Sự mở rộng băng thông đáng kể này là do các tương tác và đóng góp giữa các lớp graphene và kim loại trong cấu trúc. Để hiểu sâu hơn về cơ chế hấp thụ cơ bản, sự phân bố dòng điện bề mặt, tác động của độ dẫn điện và các đóng góp riêng lẻ của từng lớp được nghiên cứu. Ngoài ra, nghiên cứu cũng đề cập đến ảnh hưởng của cả góc tới và góc phân cực đến hiệu suất hấp thụ của MMA hai lớp được đề xuất. Nghiên cứu này đóng góp vào sự phát triển của MA trong ứng dụng vào các công nghệ và thiết bị che chắn sóng điện từ hoạt động trong dải tần số GHz.

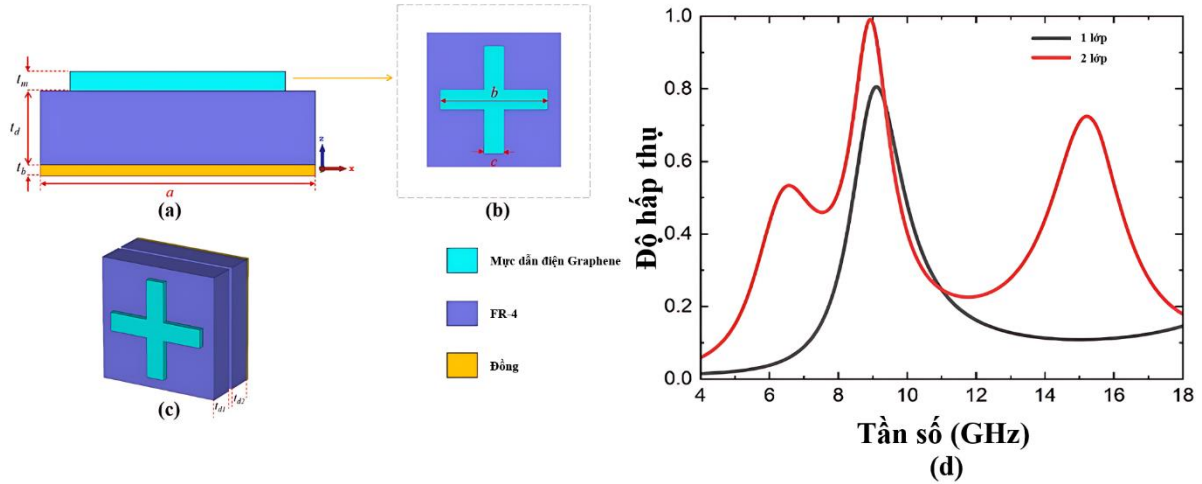
Sơ đồ cấu trúc MA đơn lớp được đề xuất được thể hiện trong Hình 3.18 (a). Cấu trúc MA graphene một lớp bao gồm một lớp graphene hình dấu cộng với chiều dài b , chiều rộng c và độ dày t_g (hình 3.18 (b)) và một lớp điện môi FR-4 có độ dày t_d được đặt trên một tấm kim loại đồng liên tục có độ dày t_m . Kích thước ô đơn vị là a , FR-4 được sử dụng với hằng số điện môi $\varepsilon = 4.3$ và độ tổn hao là 0.025. Độ dẫn điện của đồng là 5.96×10^7 S/m, trong khi mực dẫn điện graphene có điện trở bề mặt là khác nhau. Hình 3.18 (c) mô tả cấu trúc MMA graphene 2 lớp, trong đó 2 lớp graphene-FR-4 có cùng kích thước và được thiết kế giống với MA một lớp được đặt trên một tấm kim loại đồng liên tục. Các giá trị của các cấu trúc được thể hiện trong Bảng 3.1. Để mở rộng băng thông hấp thụ, nhiều nghiên cứu đã sử dụng các cấu trúc MMA. Tuy nhiên, những thiết kế này thường được thiết kế phức tạp, nhiều lớp với các kích thước lớp khác nhau, khiến việc chế tạo trở nên khó khăn. Dựa trên các nghiên cứu này và tận dụng các đặc tính của graphene, một cấu trúc MMA 2 lớp đã được đề xuất mang lại một số lợi thế như: chế tạo đơn giản, độ dày tối ưu và hiệu quả hấp thụ cao trên một băng thông rộng. Do thiết kế giống hệt nhau của hai lớp graphene-FR-4, nên quy trình chế tạo có thể tương đối đơn giản. Mỗi lớp có thể được chế tạo bằng cách in phun mực hoặc sử dụng lưới in mực graphene lên một chất nền điện môi FR-4. Sau đó, các lớp được liên kết với nhau bằng chất kết dính silicon chuyên dụng không làm giảm khả năng hấp thụ của cấu trúc.

Trong nghiên cứu này, các cấu trúc MA và MMA được thiết kế, mô phỏng và phân tích các tính chất điện từ của chúng bằng phần mềm CST Microwave Studio. Sự tương tác giữa sóng điện từ và vật liệu được mô tả bằng các phương trình Maxwell, được giải bằng cách sử dụng kỹ thuật phân tích hữu hạn. Trong quá trình mô phỏng, một sóng phẳng có vectơ sóng, $\mathbf{k}$, vuông góc với bề mặt MA và mặt phẳng $\mathbf{E}$ - $\mathbf{H}$ song song với bề mặt cấu trúc MA và MMA. Các điều kiện biên tuần hoàn được áp dụng cho các ô cơ sở

đọc theo trục x và y (mặt phẳng **E-H**), trong khi cấu trúc mở theo hướng **z**. Các kết quả mô phỏng chính bao gồm các tham số phản xạ (S_{11}) và các tham số truyền qua ($|S_{21}|$). Ngoài ra, độ hấp thụ của MA, được ký hiệu là $A(\omega)$, được tính bằng công thức:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (3.1)$$

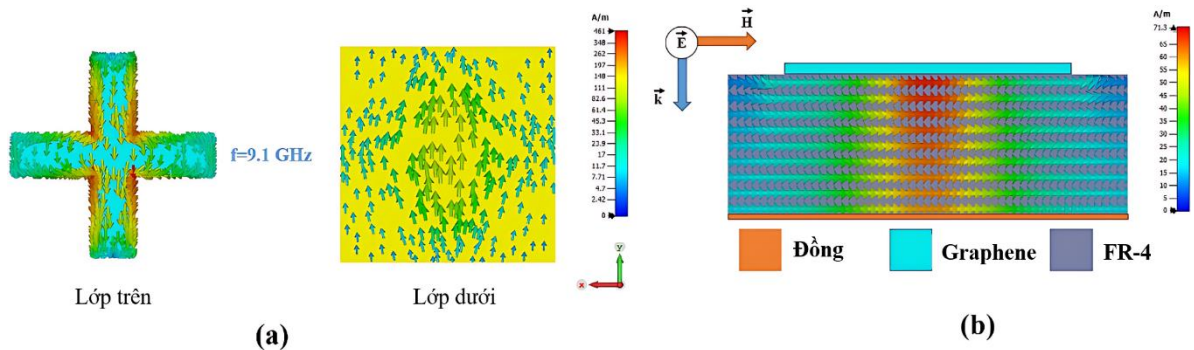
trong đó là $R(\omega) = |S_{11}|^2$ là độ phản xạ và $T(\omega) = |S_{21}|^2$ là độ truyền qua



Hình 3.18. Cấu trúc MA được đề xuất, (a) MA graphene, (b) thiết kế lớp cộng hưởng, (c) MMA graphene, (d) phổ hấp thụ của MA và MMA với lớp hấp thụ Graphene ($2\Omega/\text{sq}$).

Các thông số	a	b	c	t_d	t_b	t_m	t_{d1}	t_{d2}
Giá trị (mm)	10	8	1.5	3.5	0.035	0.1	1.7	1.7

Bảng 3.1. Thông số cấu trúc MA và MMA với lớp hấp thụ mực dẫn điện graphene

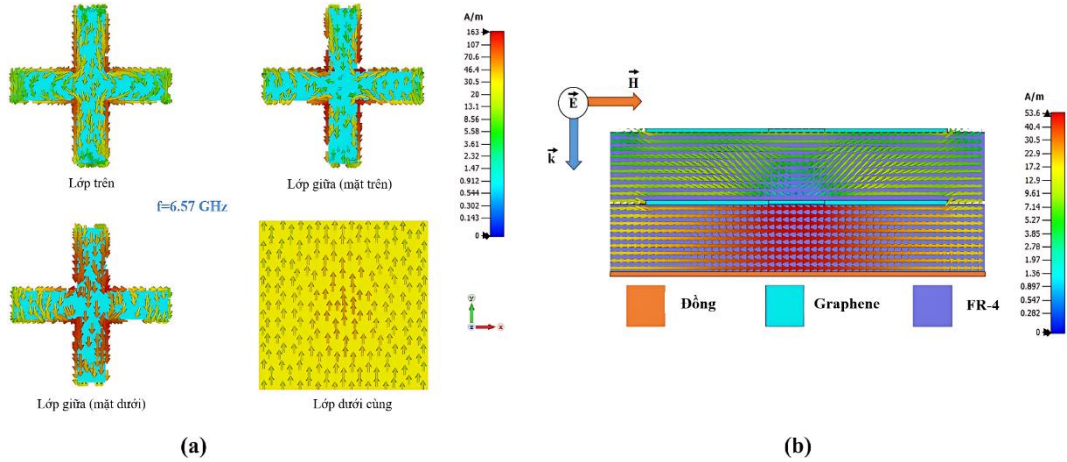


Hình 3.19. Phân bố dòng điện bề mặt (a) và phân bố từ trường (b) của MA đơn lớp graphene ($2\Omega/\text{sq}$) với độ dày lớp điện môi $t_d = 1.7\text{ mm}$ ở tần số 9.1 GHz .

Hình 3.18 (d) cho thấy phổ hấp thụ của MA đơn lớp và MMA graphene ($2\Omega/\text{sq}$) với độ dày lớp điện môi $t_d = 1.7\text{ mm}$. MA graphene đơn lớp có một đỉnh hấp thụ ở tần số 9.1 GHz với khả năng hấp thụ tương đối thấp là 80.55% . Khi số lớp tăng lên hai, số đỉnh hấp thụ tăng lên ba đỉnh trong phạm vi tần số $4\text{--}18\text{ GHz}$. Các đỉnh hấp thụ này xuất

hiện ở tần số 6.57 GHz, 8.92 GHz và 15.21 GHz, với cường độ hấp thụ tương ứng là 52.51%, 99.13% và 72.41%. Điều này chỉ ra rằng việc tăng số lớp trong cấu trúc MA sẽ tạo ra các đỉnh hấp thụ bổ sung, đây có thể là kết quả của sự tương tác giữa các lớp.

Để làm rõ cơ chế hấp thụ, phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc đã được khảo sát và nghiên cứu. Sự phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MA đơn lớp được thể hiện trong Hình 3.19 (a). Kết quả cho thấy dòng điện bề mặt của lớp cộng hưởng phía trên chạy song song và ngược chiều với dòng điện trên bề mặt của lớp kim loại liên tục dưới cùng. Do đó, ở tần số 9.1 GHz, cộng hưởng từ xuất hiện do sự tương tác giữa lớp cộng hưởng phía trên và lớp kim loại liên tục dưới cùng. Để xác nhận điều này, phân bố từ trường của cấu trúc cũng đã được mô phỏng và thể hiện trong Hình 3.19 (b). Từ trường di chuyển song song trong lớp điện môi với cường độ mạnh, cho thấy sự xuất hiện của cộng hưởng từ trong trường hợp này.

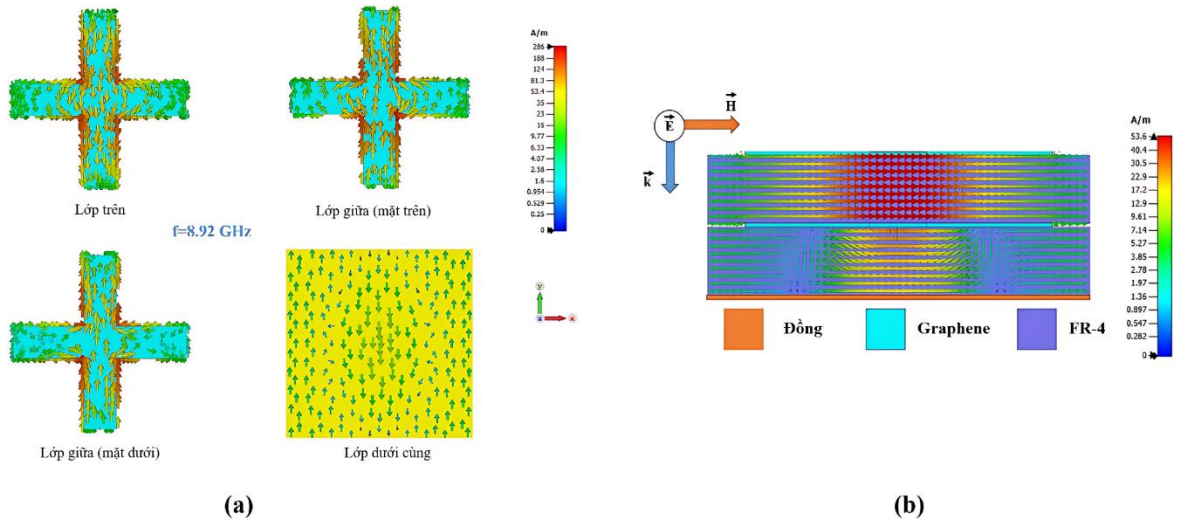


Hình 3.20. Phân bố dòng điện bề mặt (a) và phân bố từ trường (b) của MMA graphene 2 lớp ($2 \Omega/\text{sq}$) có độ dày lớp điện môi $t_d = 1.7 \text{ mm}$ ở $f_l = 6.57 \text{ GHz}$.

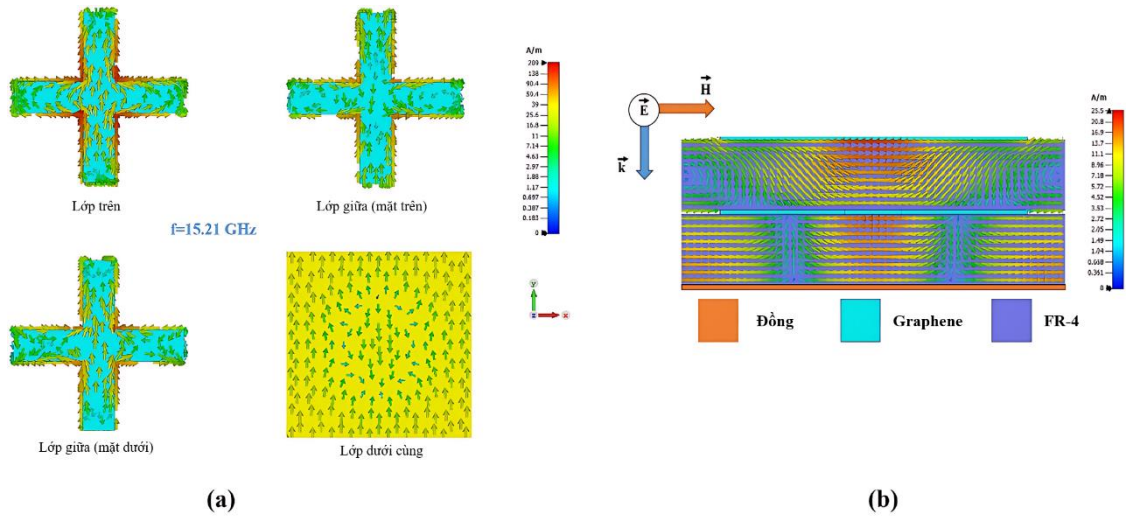
Hình 3.20 (a) biểu diễn sự phân bố dòng điện bề mặt của MMA graphene hai lớp ($2\Omega/\text{sq}$) với độ dày lớp điện môi $t_d = 1.7 \text{ mm}$ ở tần số cộng hưởng đầu tiên $f_l = 6.57 \text{ GHz}$. Ở tần số 6.57 GHz, hai lớp hoa văn cộng hưởng ở trên cùng có dòng điện song song chạy theo cùng một hướng, trong khi lớp hoa văn cộng hưởng ở giữa và lớp kim loại liên tục ở dưới cùng có dòng điện bề mặt song song chạy theo hướng ngược nhau. Do đó, đỉnh hấp thụ ở tần số này là do tương tác điện giữa hai lớp trên và tương tác từ giữa hai lớp dưới của cấu trúc. Để làm rõ hơn, sự phân bố từ trường cũng được nghiên cứu và thể hiện trong Hình 3.20 (b). Ở lớp điện môi dưới, từ trường tạo thành các đường song song với cường độ mạnh, cho thấy cộng hưởng từ đã xảy ra tại vị trí này.

Đỉnh hấp thụ thứ hai của cấu trúc tương ứng với tần số $f_2 = 8.92 \text{ GHz}$. Như được thể hiện trong Hình 3.21 (a), dòng điện bề mặt giữa hai lớp kim loại phía trên và dòng điện

bề mặt giữa hai lớp kim loại phía dưới đều có xu hướng chạy theo hướng ngược nhau. Điều này chỉ ra rằng cộng hưởng từ giữa các lớp liên kề là nguyên nhân gây ra đỉnh hấp thụ ở tần số 8.92 GHz. Để làm rõ hơn, phân bố từ trường của cấu trúc MMA ở tần số này được mô phỏng và thể hiện trong Hình 3.21 (b). Có thể thấy cộng hưởng từ rõ ràng đã xuất hiện ở lớp điện môi phía trên khi từ trường mạnh và tạo thành các đường song song theo cùng một hướng. Ở lớp điện môi phía dưới, tại vị trí tương ứng với cấu trúc có hình dấu cộng, cộng hưởng từ cũng xuất hiện, tạo thành các đường song song. Tuy nhiên, bên ngoài vị trí đó, từ trường đã thay đổi hướng. Hiệu ứng này cũng có thể quan sát được ở dòng điện bề mặt tấm kim loại liên tục ở dưới, như thể hiện trong Hình 3.21 (a).

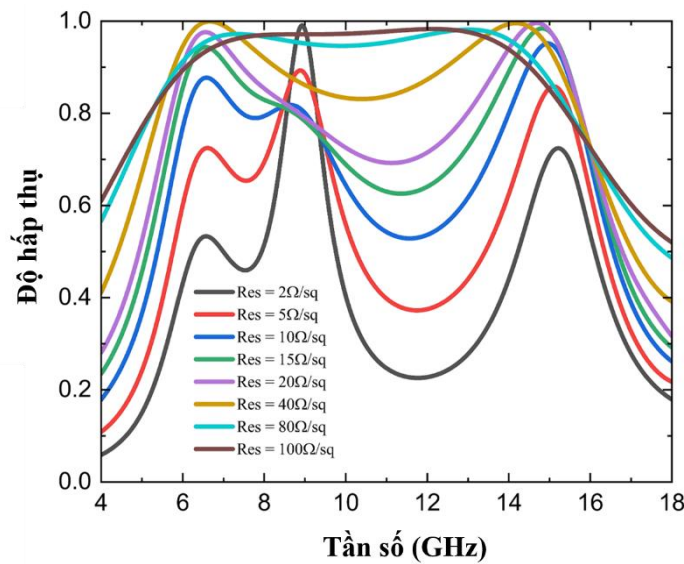


Hình 3.21. Phân bố dòng điện bề mặt (a) và phân bố từ trường (b) của MMA graphene 2 lớp ($2 \Omega/\text{sq}$) có độ dày lớp điện môi $t_d = 1.7 \text{ mm}$ ở $f_2 = 8.92 \text{ GHz}$.



Hình 3.22. Phân bố dòng điện bề mặt (a) và phân bố từ trường (b) của MMA graphene 2 lớp ($2 \Omega/\text{sq}$) có độ dày lớp điện môi $t_d = 1.7 \text{ mm}$ ở $f_3 = 15.21 \text{ GHz}$.

Hình 3.22 (a) biểu diễn sự phân bố dòng điện bề mặt ở tần số cộng hưởng $f_3 = 15.21$ GHz đối với cấu trúc MMA graphene hai lớp ($2\Omega/\text{sq}$) với độ dày điện môi $t_d = 1.7$ mm. Cộng hưởng xảy ra ở hai lớp kim loại trên, trong đó các lớp kim loại phía trên cho thấy cộng hưởng điện do dòng điện bề mặt chạy theo cùng một hướng và song song với nhau. Ở hai lớp kim loại phía dưới, dòng điện chạy theo hướng ngược song song tại vị trí tương ứng với hình dấu cộng. Tuy nhiên, trên tấm kim loại liên tục, một dòng điện cường độ cao xuất hiện ở vị trí phía bên ngoài hình dấu cộng, chạy theo cùng hướng với dòng điện bề mặt của lớp graphene giữa. Do đó, cả cộng hưởng điện và cộng hưởng từ đều xuất hiện ở đây. Điều này cũng được chứng minh bằng sự phân bố từ trường được thể hiện trong Hình 3.22 (b). Do cộng hưởng điện, từ trường ở lớp điện môi trên có dạng xoáy. Ở lớp điện môi dưới, cộng hưởng từ xảy ra rõ ràng ở vị trí dấu cộng, nhưng ở các vị trí liền kề, từ trường bị ảnh hưởng và đổi hướng. Điều này phù hợp với sự phân bố dòng điện bề mặt trên tấm kim loại liên tục phía dưới cùng như trong Hình 3.22 (a).

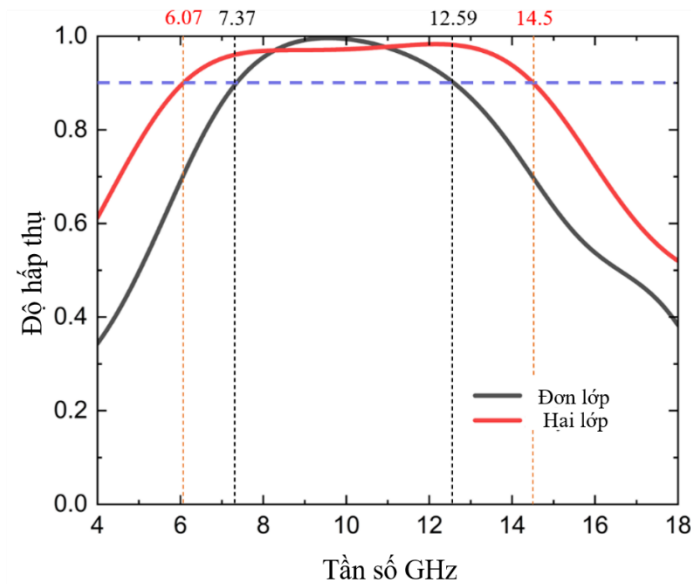


Hình 3.23. Phổ hấp thụ của MMA 2 lớp graphene có điện trở bề mặt khác nhau

Khi tăng số lớp trong cấu trúc MA, số đỉnh hấp thụ cũng tăng lên, tuy nhiên, cấu trúc cho phổ hấp thụ với băng thông hấp thụ hẹp. Do đó, điện trở bề mặt của graphene được thay đổi để nghiên cứu khả năng hấp thụ băng thông rộng của cấu trúc. Trong hình 3.23, khi điện trở bề mặt graphene là $2\Omega/\text{sq}$, phổ hấp thụ xuất hiện 03 đỉnh hấp thụ riêng biệt ở 6.81 GHz, 9.01 GHz và 15.59 GHz. Khi điện trở bề mặt graphene tăng lên, đỉnh hấp thụ đầu tiên và thứ ba tăng dần về cường độ, trong khi đỉnh hấp thụ thứ hai yếu đi và nền hấp thụ tổng thể được tăng dần. Ở giá trị điện trở bề mặt là $50\Omega/\text{sq}$, đỉnh hấp thụ thứ hai bị che lấp bởi nền hấp thụ. Khi điện trở bề mặt đạt giá trị $100\Omega/\text{sq}$, cấu trúc

MMA hai lớp có hai đỉnh hấp thụ ở tần số 8 GHz và 12.16 GHz, với độ hấp thụ đạt lần lượt là 96.86% và 98.29%.

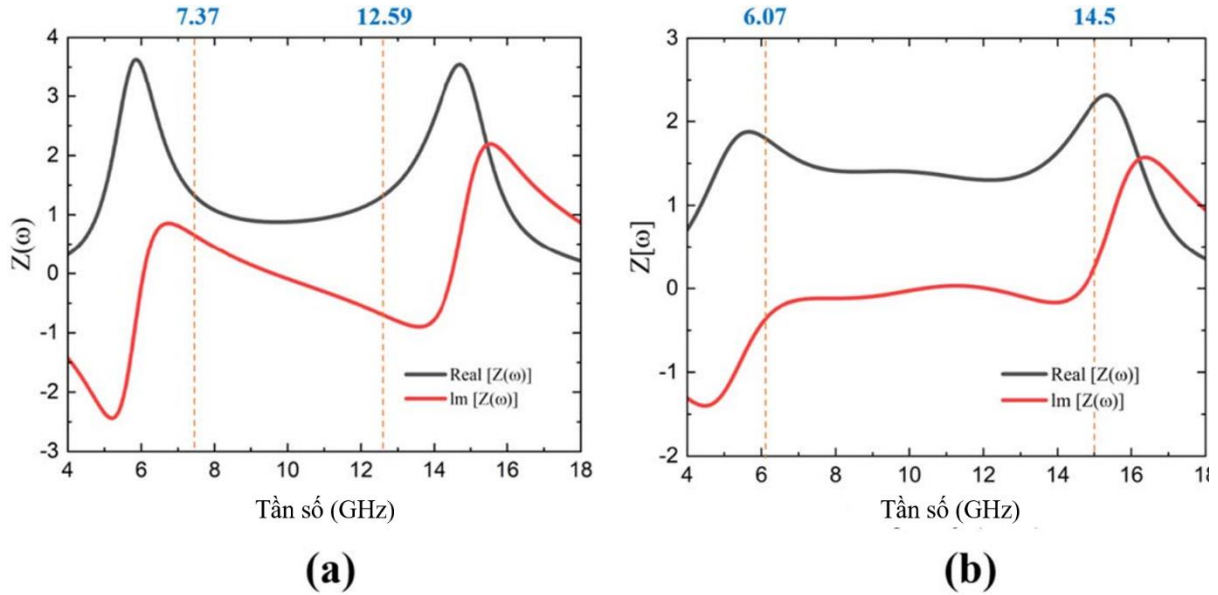
Phổ hấp thụ của cấu trúc MA đơn lớp ($t_d = 3.5$ mm) và MMA hai lớp ($t_{d1} = t_{d2} = 1.7$ mm) với lớp hấp thụ graphene ($100 \Omega/\text{sq}$) được trình bày trong Hình 3.24. Cả hai cấu trúc đều có kích thước tổng thể bằng nhau. MA đơn lớp có phổ hấp thụ với đỉnh hấp thụ ở tần số 9.57 GHz và độ hấp thụ đạt 99.57%. Đồng thời cấu trúc cũng có băng thông hấp thụ đạt 5.22 GHz, với độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số 7.37–12.59 GHz. Khi tăng thêm 1 lớp graphene-điện môi nhưng độ dày tổng thể của MA được giữ gần như không đổi, băng thông hấp thụ của MMA hai lớp được cải thiện đáng kể. MMA hai lớp có hai đỉnh hấp thụ ở tần số 8 GHz và 12.16 GHz, với độ hấp thụ đạt lần lượt là 96.86% và 98.29%. Ngoài ra, cấu trúc này cho thấy băng thông hấp thụ rộng trên 8.43 GHz với độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số 6.07-14.5 GHz. So với cấu trúc MA đơn lớp, băng thông hấp thụ của cấu trúc MMA hai lớp tăng 61.5%.



Hình 3.24. Phổ hấp thụ của MA đơn lớp ($t_d = 3.5\text{mm}$) và MMA hai lớp ($t_{d1} = t_{d2} = 1.7\text{mm}$) với lớp hấp thụ graphene ($100 \Omega/\text{sq}$).

Do thành phần truyền qua bị triệt tiêu hoàn toàn bởi tấm đồng liên tục dưới cùng, MMA hoạt động bằng cách giảm thiểu sự phản xạ thông qua việc phối hợp trở kháng với môi trường xung quanh. Hình 3.25 (a) minh họa phổ trở kháng của MA đơn lớp với $t_d = 3.5$ mm. Có thể thấy rằng phần thực trong phổ trở kháng của cấu trúc MA đơn lớp có giá trị tiến dần tới 1, trong khi phần ảo của nó tiến dần tới 0 trong dải tần số từ 7.37 đến 12.59 GHz. Điều này chỉ ra rằng điều kiện phối hợp trở kháng đã đạt được trong dải tần này đối với cấu trúc MA đơn lớp. Hình 3.25 (b) trình bày phổ trở kháng của MMA

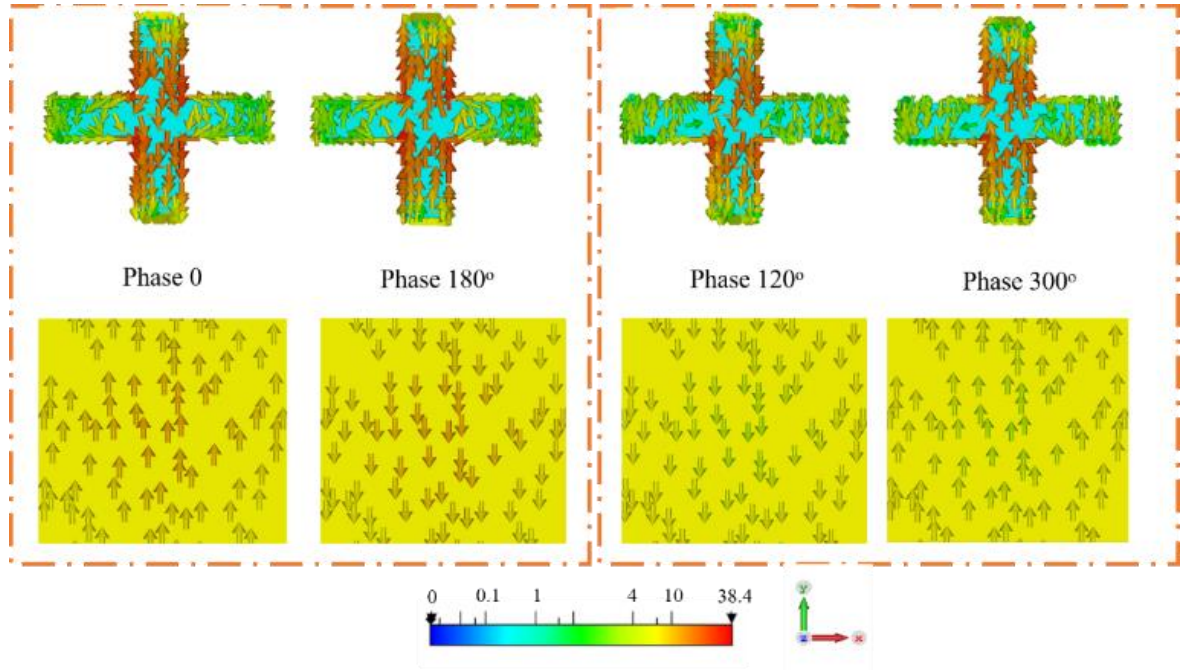
hai lớp với $t_{d1} = t_{d2} = 1.7$ mm. Tương tự như vậy, khi phần thực của trở kháng tiến tới 1 và phần ảo tiến tới 0, điều đó chỉ ra rằng điều kiện phối hợp trở kháng cũng đã đạt được đối với cấu trúc MMA, nhưng trên dải tần số rộng hơn từ 6.07 đến 14.5 GHz.



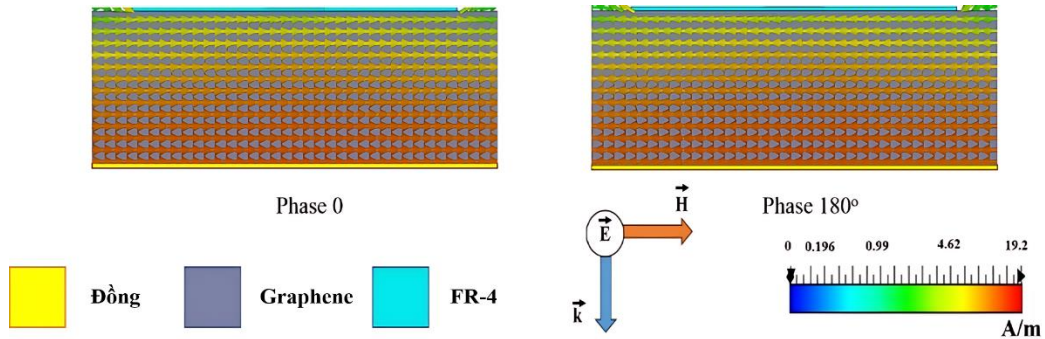
Hình 3.25. (a) Phổ trở kháng của MA đơn lớp có $t_d = 3.5$ mm và (b) MMA hai lớp với $t_{d1} = t_{d2} = 1.7$ mm.

Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MA đơn lớp với $t_d = 3.5$ mm tại $f = 9.57$ GHz đã được phân tích, như thể hiện trong Hình 3.26. Ở tần số này, dòng điện bề mặt trên lớp cộng hưởng graphene và lớp kim loại liên tục ở dưới cùng chạy song song nhưng theo hướng ngược nhau (với các pha tương ứng là 0° và 180°). Điều này chỉ ra rằng cộng hưởng từ giữa hai lớp graphene và kim loại đã xảy ra tại $f = 9.57$ GHz. Cường độ dòng điện tăng đáng kể tại vị trí tương ứng với hình dấu cộng. Ngoài ra, độ trễ pha giữa hai lớp đã được quan sát thấy ở 120° và 300° , điều này có thể là do sự khác biệt giữa các tính chất của lớp graphene và lớp đồng. Hình 3.27 cho thấy phân bố từ trường H của cấu trúc MA graphene đơn lớp tại $f = 9.57$ GHz. Từ trường mạnh tạo thành các đường thẳng song song theo cùng một hướng tại các pha 0° và 180° , điều này xác nhận sự xuất hiện của cộng hưởng từ, phù hợp với các kết quả quan sát được trong Hình 3.26.

Sự phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA hai lớp được biểu diễn trong Hình 3.28. Cấu trúc MMA được thiết kế gồm 2 lớp, do đó độ hấp thụ của cấu trúc cũng chịu ảnh hưởng của sự tương tác giữa các lớp. Dòng điện song song chạy theo cùng một hướng có thể quan sát được ở 2 lớp phía trên của cấu trúc MMA, cho thấy tương tác điện giữa hai lớp này Hình 3.28 (a, b, e, f). Độ trễ pha giữa hai lớp được thể hiện trong Hình 3.28 (c, d, g, h) ở các pha 150° và 330° . Trong khi đó, ở hai lớp dưới cùng của cấu trúc MMA, tương tác từ có thể được quan sát thấy. Cộng hưởng từ gây ra các dòng điện song

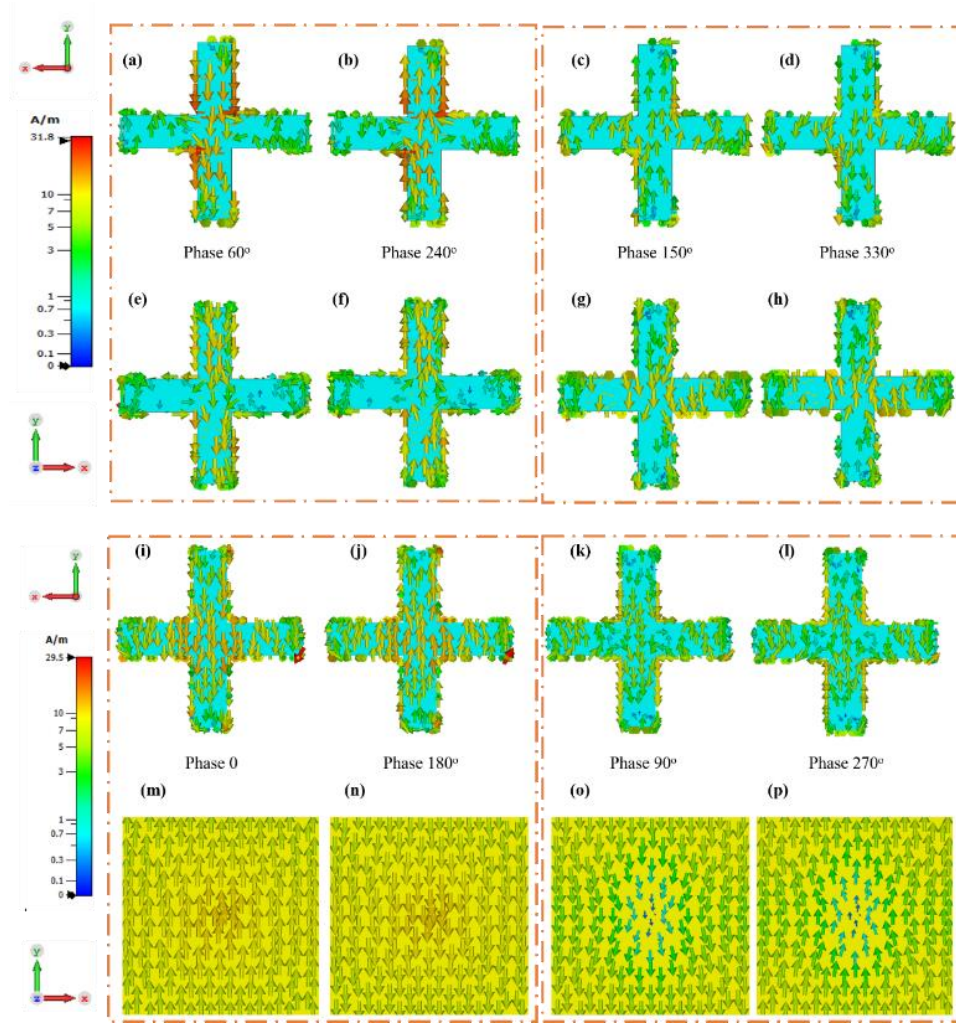


Hình 3.26. Phân bố dòng điện bề mặt của MMA graphene đơn lớp với $t_d = 3.5\text{mm}$ tại tần số 9.57 GHz.

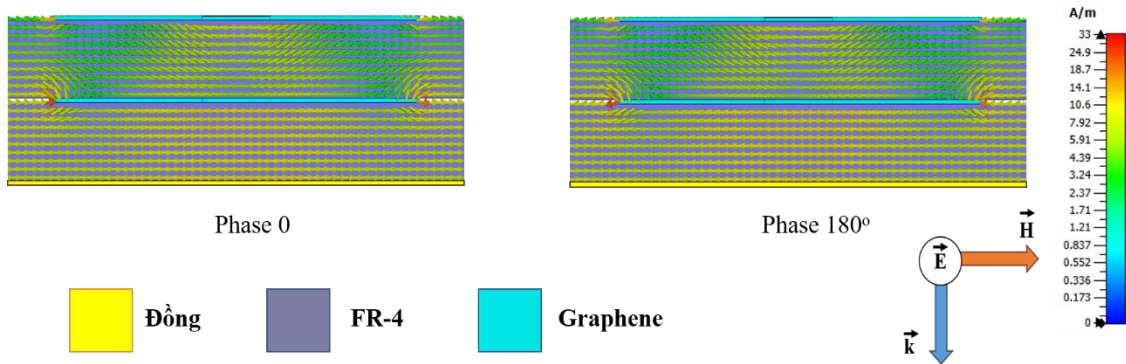


Hình 3.27. Phân bố từ trường của MA graphene đơn lớp với $t_d = 3.5\text{mm}$ tại tần số 9.57 GHz.

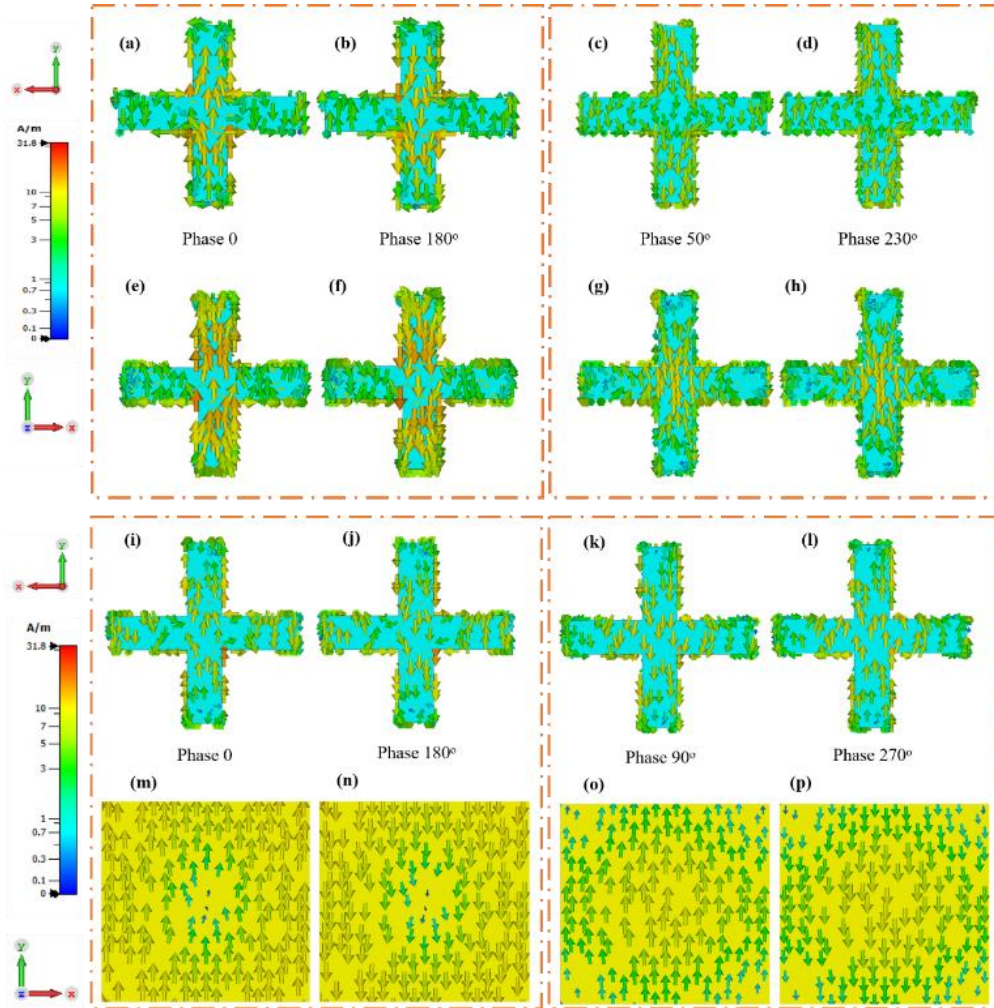
song chạy ngược chiều trong hai lớp dưới cùng, điều này được mô tả trong Hình 3.28 (i, j, m, n). Cộng hưởng từ được quan sát thấy mạnh nhất ở các vị trí tương ứng với vị trí hoa văn hình dấu cộng của cấu trúc. Hình 3.28 (k, l, o, p) cho thấy độ trễ pha giữa hai lớp. Sự phân bố từ trường H ở tần số 8 GHz tại pha 0° và 180° của cấu trúc MMA hai lớp cũng được mô phỏng trong Hình 3.29. Tại vị trí dấu cộng ở lớp điện môi phía trên, từ trường H tạo thành các đường xoáy, biểu thị sự xuất hiện của cộng hưởng điện giữa hai lớp trên. Ở lớp điện môi dưới, từ trường H di chuyển song song cùng với đó cường độ mạnh nhất của nó có thể quan sát thấy tại vị trí dấu cộng, điều này chứng minh cộng hưởng từ giữa hai lớp dưới.



Hình 3.28. Phân bố dòng điện bề mặt của MMA graphene có $t_{d1} = t_{d2} = 1.7 \text{ mm}$ tại tần số $f_1 = 8 \text{ GHz}$:
 (a)-(d) dòng điện bề mặt ở lớp graphene trên cùng; (e)-(h) dòng điện bề mặt phía trên của lớp graphene giữa; (i)-(l) dòng điện bề mặt phía dưới của lớp graphene giữa; (m)-(p) dòng điện bề mặt của tấm kim loại liên tục dưới cùng.

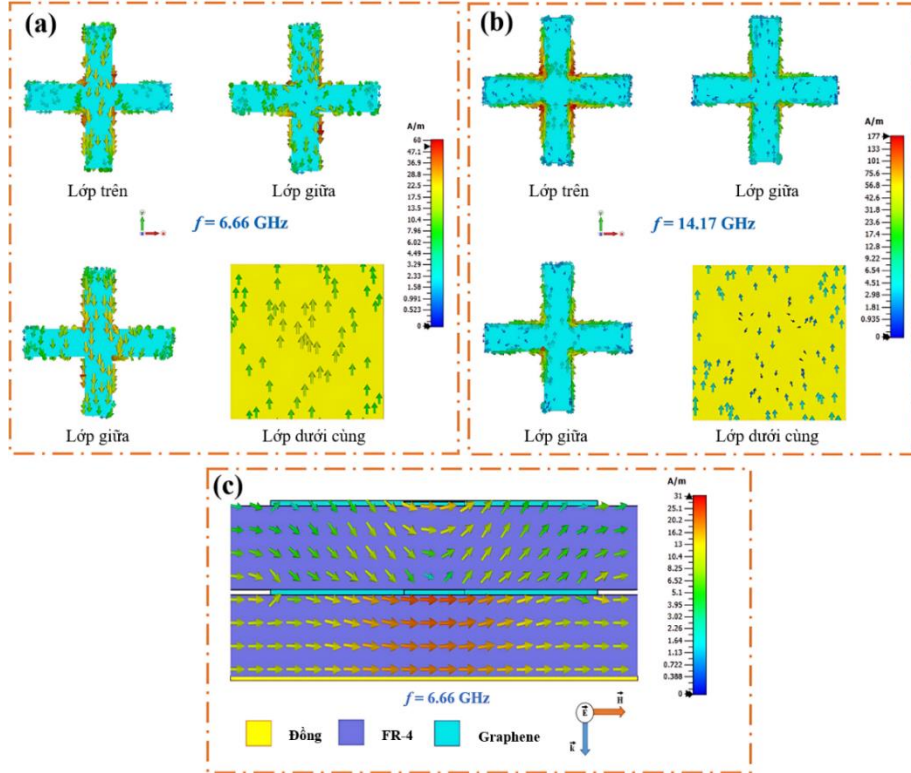


Hình 3.29. Phân bố từ trường của MMA graphene hai lớp với độ dày lớp điện môi $t_{d1} = t_{d2} = 1.7 \text{ mm}$ tại tần số $f_1 = 8 \text{ GHz}$

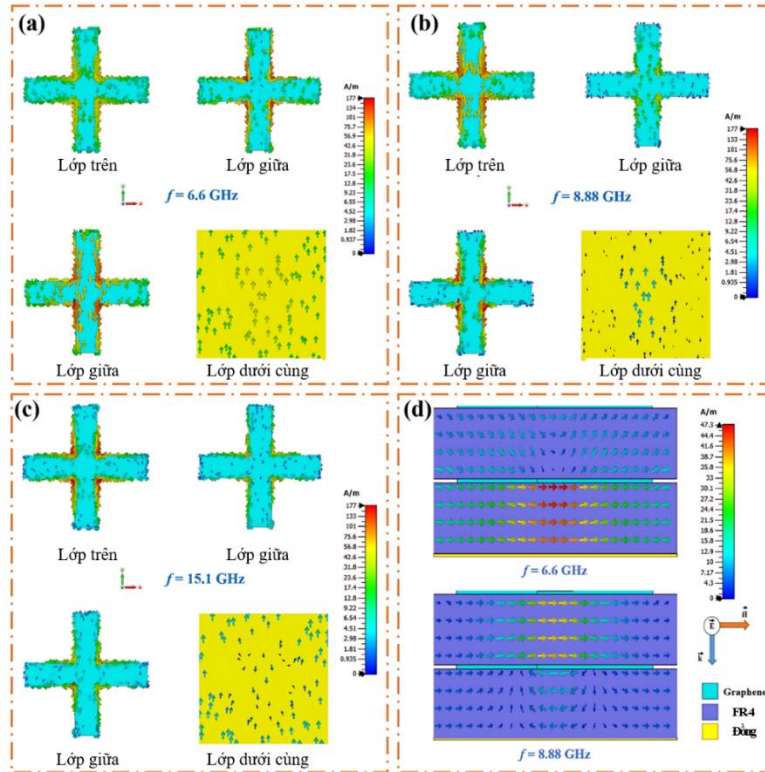


Hình 3.30. Phân bố dòng điện bề mặt của MMA graphene với $t_{d1} = t_{d2} = 1.7\text{mm}$ tại tần số $f_2 = 12.16\text{ GHz}$: (a)-(d) dòng điện bề mặt ở lớp graphene trên cùng; (e)-(h) dòng điện bề mặt phía trên của lớp graphene ở giữa; (i)-(l) dòng điện bề mặt phía dưới của lớp graphene ở giữa; (m)-(p) dòng điện bề mặt của tấm kim loại liên tục dưới cùng.

Sự phân bố dòng điện bề mặt của MMA graphene hai lớp có độ dày điện môi $t_{d1} = t_{d2} = 1.7\text{ mm}$ ở tần số $f_2 = 12.16\text{ GHz}$ được mô tả trong Hình 3.30. Kết quả cho thấy ở tần số này, hai lớp phía trên xuất hiện cộng hưởng điện, với dòng điện bề mặt giữa hai lớp song song và chạy cùng hướng. Cộng hưởng điện giữa hai lớp này được quan sát thấy ở pha 0 và 180°, với độ trễ pha được quan sát thấy ở 50° và 230°. Tương tự như vậy, ở hai lớp phía dưới của cấu trúc MMA, cộng hưởng điện cũng được quan sát thấy ở pha 0° và 180°, với độ trễ pha được ghi nhận tại pha 90° và 270°. Mô phỏng sự phân bố dòng điện bề mặt cho thấy cộng hưởng điện được tạo ra ở 12.16 GHz.

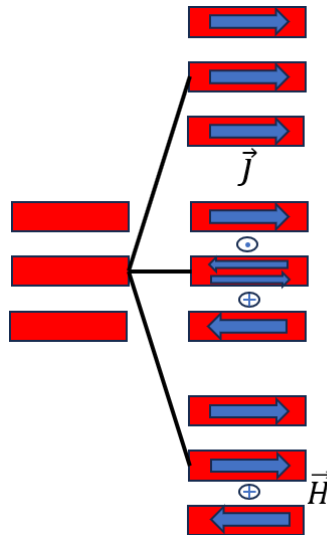


Hình 3.31. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA graphene (40 Ω/sq): (a) ở tần số $f_1 = 6.66$ GHz, (b) ở tần số $f_2 = 15.17$ GHz. (c) Phân bố từ trường ở tần số $f_1 = 6.66$ GHz.



Hình 3.32. Phân bố dòng điện bề mặt của MMA graphene (5 Ω/sq): (a) ở tần số $f_1 = 6.6$ GHz, (b) ở tần số $f_2 = 8.88$ GHz, (c) ở tần số $f_3 = 15.1$ GHz. (d) Phân bố từ trường ở tần số $f = 6.6$ GHz và 8.88 GHz

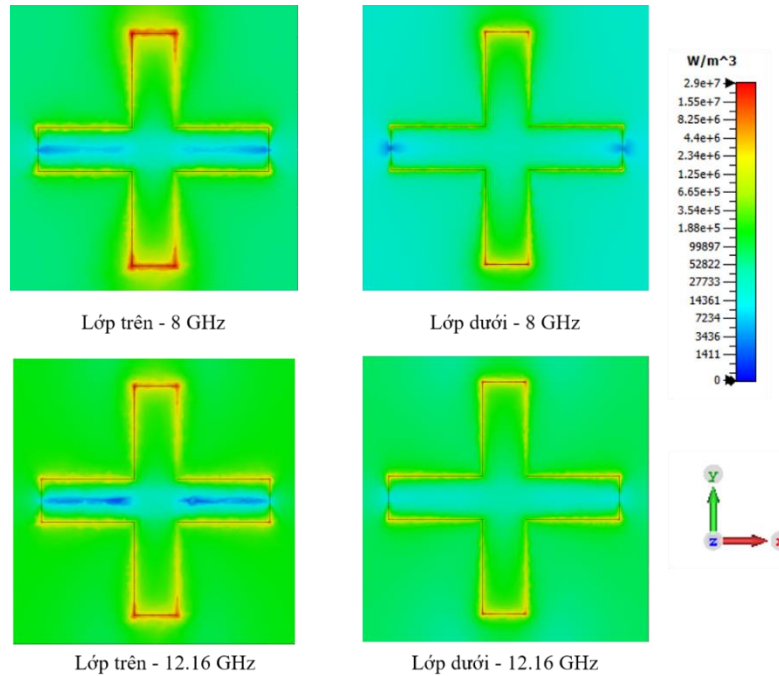
Để hiểu sâu hơn về tính chất điện từ được mô tả ở trên, phân bố dòng điện bề mặt và trường từ tại các đỉnh hấp thụ của MMA có điện trở bề mặt $40 \Omega/\text{sq}$ và $5 \Omega/\text{sq}$ đã được mô phỏng và biểu diễn trong hình 3.31 và 3.32. Đối với điện trở bề mặt $40 \Omega/\text{sq}$, tại tần số cộng hưởng thấp hơn 6.66 GHz , một cộng hưởng điện (electric resonance) được tạo ra giữa hai lớp trên. Dòng điện song song và sự hình thành một xoáy trong trường H cho thấy loại cộng hưởng này. Ngược lại, một cộng hưởng từ (magnetic resonance) lại được tạo ra giữa hai lớp dưới, được minh chứng bằng dòng điện chạy ngược chiều nhau và một trường H mạnh, chạy song song. Tại tần số cộng hưởng cao hơn 14.17 GHz , một cộng hưởng điện được tạo ra, thể hiện qua dòng điện song song ở cả ba lớp. Tính chất điện từ của MMA ở điện trở bề mặt $40 \Omega/\text{sq}$ tương tự với tính chất được quan sát ở $100 \Omega/\text{sq}$. Kết quả xác nhận rằng việc giảm điện trở bề mặt từ $100 \Omega/\text{sq}$ xuống $40 \Omega/\text{sq}$ chủ yếu làm hai đỉnh cộng hưởng tách xa nhau hơn mà không làm thay đổi bản chất cộng hưởng cơ bản của chúng. Đối với điện trở bề mặt $5 \Omega/\text{sq}$, các đỉnh cộng hưởng thấp nhất và cao nhất vẫn giữ tính chất điện từ tương tự như đã quan sát ở $100 \Omega/\text{sq}$ và $40 \Omega/\text{sq}$. Tuy nhiên, đỉnh mới xuất hiện ở 8.88 GHz cho thấy một tính chất điện từ khác biệt. Tại đây, dòng điện trên hai mặt của lớp giữa chạy ngược chiều nhau, kết hợp với dòng điện trên lớp trên cùng và lớp dưới cùng, có hai cặp dòng điện bề mặt ngược chiều có thể quan sát được. Điều này dẫn đến sự hình thành hai cộng hưởng từ, đặc trưng bởi các trường H ngược chiều nhau, trong các lớp điện môi phía trên và phía dưới.



Hình 3.33. Sơ đồ ghép nối các lớp trong cấu trúc nhiều lớp được đề xuất.

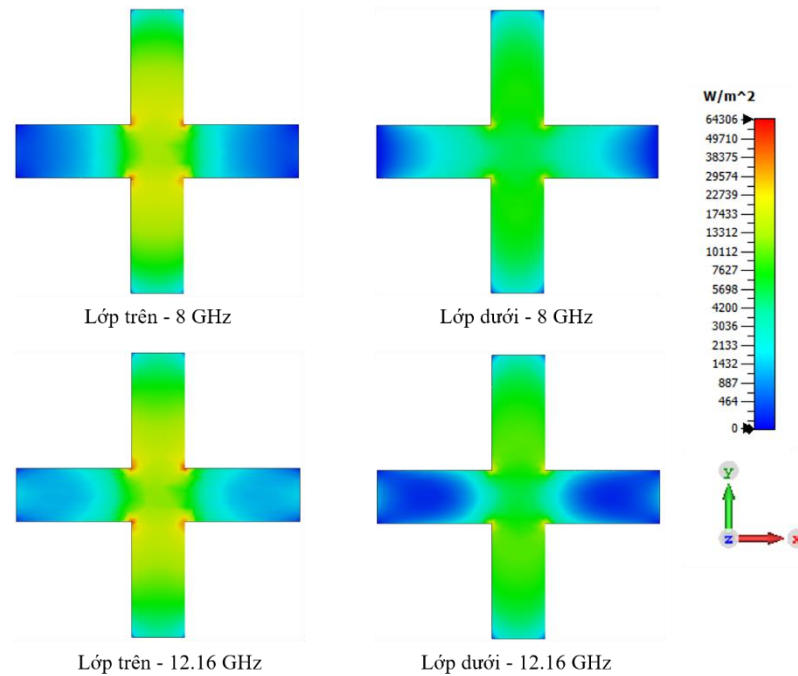
Dựa trên các phân tích trên, một mô hình ghép nối các lớp trong cấu trúc hấp thụ MMA đã đề xuất, như minh họa trong hình 3.33. Đối với sự ghép nối ba lớp, có ba cơ chế điện từ có thể xảy ra. Đầu tiên là cộng hưởng toàn điện (all-electric response), đặc

trung bởi các dòng điện song song được tạo ra trên tất cả các lớp. Thứ hai là cộng hưởng toàn từ (all-magnetic response), trong đó hai trường H cảm ứng có hướng ngược chiều nhau. Cuối cùng là cộng hưởng hỗn hợp (mixed electric and magnetic response), khi một cặp hai lớp liên kề có cộng hưởng từ trong khi lớp còn lại có cộng hưởng điện. Khi điện trở bề mặt của mực dẫn điện graphene lớn, cường độ cộng hưởng của các bộ cộng hưởng riêng lẻ bị suy yếu, dẫn đến sự ghép nối giữa các lớp cũng yếu đi. Do đó, cơ chế cộng hưởng toàn từ có thể biến mất, chỉ còn lại hai cơ chế cộng hưởng điện từ khác.



Hình 3.34. Mô phỏng phân bố năng lượng tổn hao trên từng lớp của MMA.

Phân bố năng lượng tổn hao trên từng lớp của MMA được mô phỏng và trình bày trong hình 3.34. Kết quả cho thấy rõ vai trò cộng hưởng và khả năng hấp thụ đa dải của cấu trúc. Tại tần số 8 GHz, mật độ năng lượng tổn hao tập trung mạnh quanh các viền ngoài của lớp trên, đặc biệt ở các nhánh của hình dấu cộng, với mức độ tổn hao lớn. Lớp dưới ở cùng tần số cũng xuất hiện các vùng tiêu tán mạnh tại viền nhưng cường độ giảm đáng kể so với lớp trên, phản ánh sự suy giảm của năng lượng điện từ sau khi xuyên qua lớp đầu tiên. Ở tần số cao hơn 12.16 GHz, cả lớp trên và lớp dưới đều cho thấy phân bố tiêu tán rộng hơn, dọc theo các nhánh của cấu trúc, nhưng mật độ tổn hao vẫn cao nhất tại các vùng biên của lớp trên. Sự khác biệt giữa hai lớp cho thấy lớp trên đón nhận phần lớn năng lượng điện từ và đóng vai trò chính trong hấp thụ cộng hưởng, còn lớp dưới hỗ trợ, tiếp tục tiêu tán phần năng lượng còn lại.

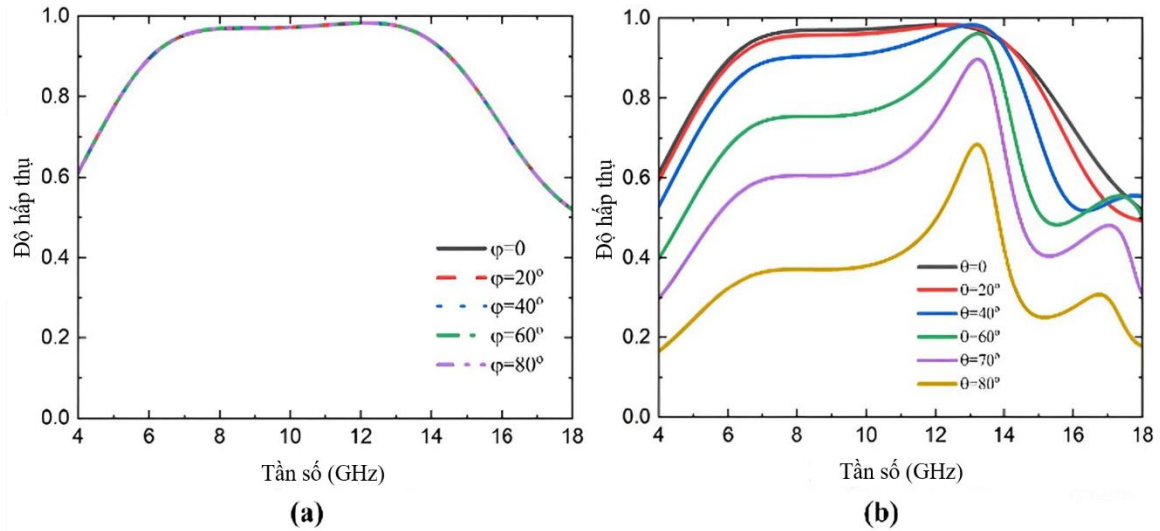


Hình 3.35. Mô phỏng phân bố năng lượng tổn hao trên bề mặt từng lớp của MMA.

Phân bố mật độ năng lượng tổn hao bề mặt trên cấu trúc MMA được thể hiện trong hình 3.35. Ở cả hai tần số, lớp trên xuất hiện các vùng có mật độ tổn hao lớn hơn tập trung chủ yếu tại khu vực trung tâm hình dấu cộng. Điều này cho thấy vùng trung tâm chính là vùng cộng hưởng mạnh, nơi trường điện từ bị tiêu tán nhiều nhất, làm tăng hiệu suất hấp thụ tổng thể của cấu trúc. Đối với lớp dưới, mức độ tiêu tán năng lượng thấp hơn đáng kể và chủ yếu có mặt ở gần trung tâm của cấu trúc, giảm dần về phía rìa. So sánh giữa hai tần số, phân bố năng lượng tổn hao trên từng lớp tương đối ổn định, nhưng ở 12.16 GHz, mức tổn hao tổng thể nhỏ hơn. Điều này cho thấy lớp phía trên đóng vai trò hấp thụ năng lượng chủ đạo, còn lớp dưới tiếp tục khuếch tán và hấp thụ phần dư sót lại, góp phần vào hiệu suất hấp thụ đa băng rộng.

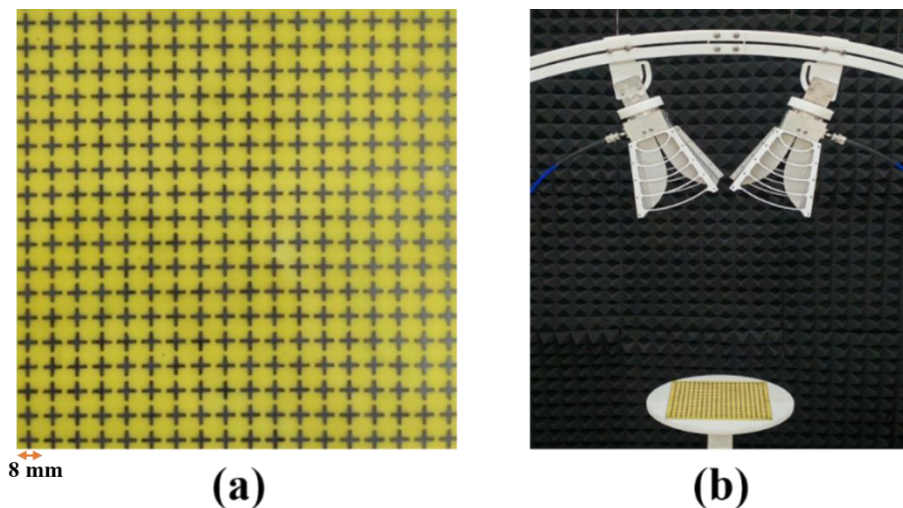
Phổ hấp thụ của cấu trúc MMA hai lớp với các góc phân cực khác nhau (φ) được thể hiện trong Hình 3.36 (a). Kết quả chứng minh rằng mặc dù góc phân cực thay đổi từ 0° đến 80° , cường độ hấp thụ của cấu trúc vẫn không đổi. Thiết kế đối xứng của cấu trúc MMA hai lớp, đảm bảo rằng cường độ hấp thụ không bị ảnh hưởng bởi những thay đổi trong góc phân cực. Ảnh hưởng của góc tới (θ) đến khả năng hấp thụ của cấu trúc MMA hai lớp được thể hiện trong Hình 3.36 (b). Kết quả cho thấy hiệu ứng hấp thụ băng thông rộng được duy trì tốt đối với các góc tới θ nhỏ hơn hoặc bằng 40° . Khi θ vượt quá 40° , độ hấp thụ giảm xuống dưới 90% trong dải tần số dưới 12 GHz. Sự suy giảm cường độ hấp thụ này được cho là do cộng hưởng từ giữa hai lớp dưới của cấu trúc ở tần số này

(như thể hiện trong Hình 3.28 và 3.29). Góc tới tăng dần làm cộng hưởng từ giảm dần, dẫn đến đỉnh hấp thụ nhỏ hơn. Ở tần số 13.16 GHz, sự hấp thụ ít bị ảnh hưởng bởi những thay đổi trong góc tới vì đỉnh hấp thụ ở tần số này chủ yếu là do cộng hưởng điện giữa các lớp (như thể hiện trong Hình 3.30).



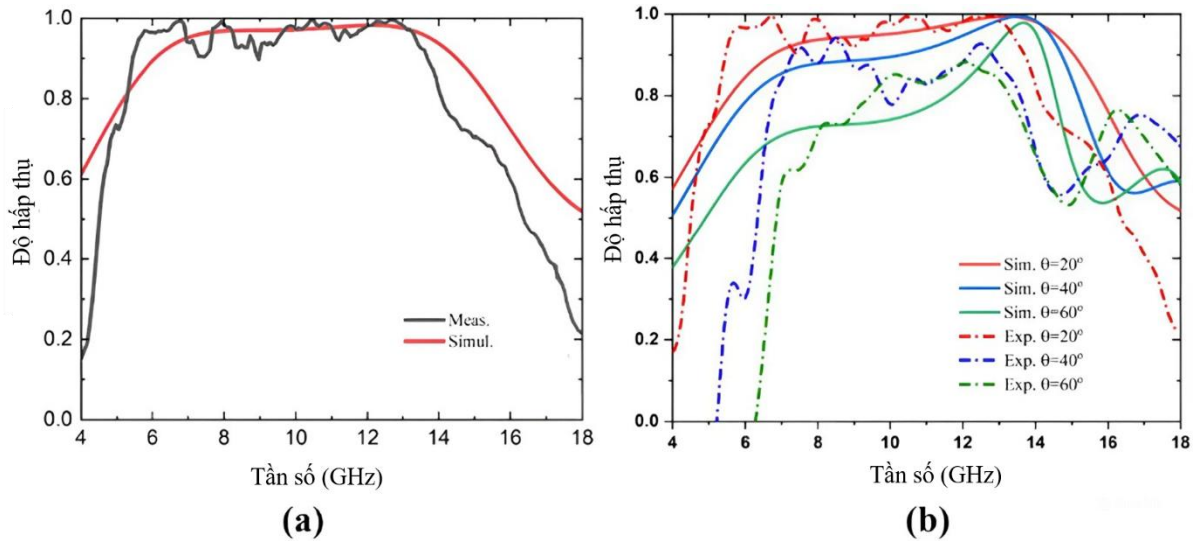
Hình 3.36. (a) Ảnh hưởng của góc phân cực (φ) đến phổ hấp thụ của MMA graphene. (b) Phổ hấp thụ của MMA graphene hai lớp với các góc tới khác nhau (θ).

Để chứng minh kết quả mô phỏng, tính toán, một mẫu gồm 20 x 20 ô cơ sở đã được chế tạo như thể hiện trong Hình 3.37 (a). Cấu trúc MMA hai lớp được tạo ra từng lớp một bằng phương pháp in lưới. Các lớp đơn chế tạo được liên kết chặt chẽ với nhau bằng chất kết dính. Các đặc tính của mẫu MA hai lớp đã được nghiên cứu bằng cách sử dụng Vector Network Analyzer với hai ăng-ten hình sừng tuyến tính như thể hiện trong Hình 3.37 (b).



Hình 3.37. (a) Mẫu MA được chế tạo. (b) Nghiên cứu tính chất điện từ trên hệ thống phân tích mạng VNA.

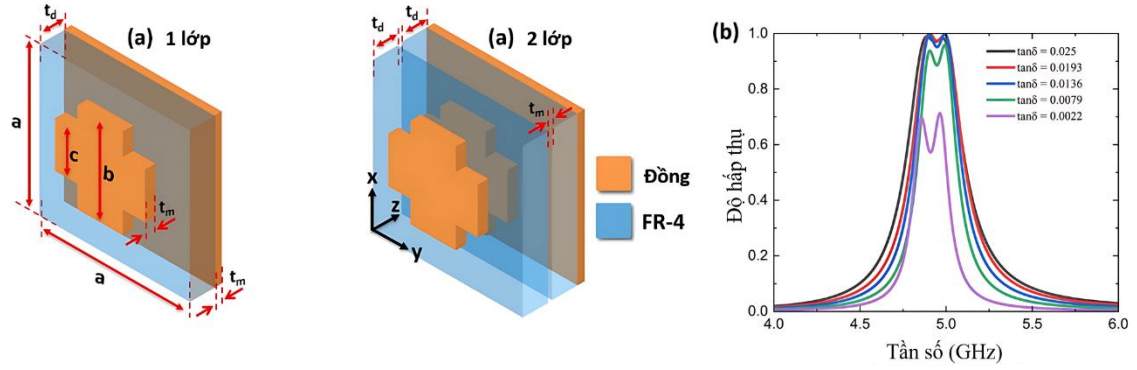
Hình 3.38 (a) cho thấy phổ hấp thụ thực nghiệm và mô phỏng của cấu trúc MMA hai lớp được đề xuất. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm rất phù hợp, chứng minh rằng cấu trúc MMA hai lớp được chế tạo đạt được khả năng hấp thụ trên 90% trong dải tần số từ 5.43 đến 13.65 GHz. Sự khác biệt về tần số hấp thụ và băng thông hấp thụ giữa mô phỏng và thực nghiệm là do lỗi chế tạo. Sự thay đổi hằng số điện môi thực tế của lớp điện môi FR-4 so với giá trị mô phỏng có thể gây ra sự dịch chuyển phổ. Bên cạnh đó, các yếu tố nhiễu từ môi trường có thể ảnh hưởng đến phép đo hấp thụ của MMA. Ngoài ra, độ dẫn điện không đồng đều trong mực dẫn điện graphene, do độ dày hoặc mật độ lớp không đồng đều trong quá trình chế tạo, có thể làm thay đổi sự phối hợp trở kháng, dẫn đến sự khác biệt về cường độ hấp thụ. Hình 3.38 (b) cho thấy phổ hấp thụ của cấu trúc MMA graphene hai lớp được đề xuất dưới các góc tới khác nhau. Kết quả thực nghiệm cho thấy sự phù hợp tương đối tốt với mô phỏng và khả năng hấp thụ của cấu trúc giảm dần khi góc tới tăng. Tương tự như mô phỏng, kết quả thực nghiệm cũng cho thấy khả năng hấp thụ giảm nhiều hơn trong dải tần dưới 13.16 GHz.



Hình 3.38. (a) Phổ hấp thụ được thực nghiệm và mô phỏng của MMA graphene. (b) Phổ hấp thụ thực nghiệm của MMA graphene với các góc tới khác nhau.

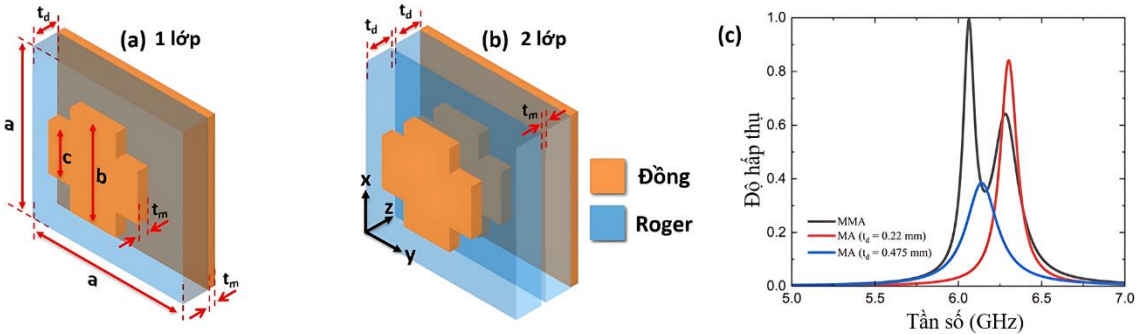
3.2. Ảnh hưởng của tổn hao điện môi lên tương tác giữa các lớp và tính chất hấp thụ sóng điện từ

Tổn hao điện môi đóng vai trò quan trọng trong việc điều chỉnh và tối ưu hóa đặc tính điện từ của các cấu trúc MMA. Quá trình này xảy ra khi vật liệu điện môi chịu tác động của từ trường ngoài, dẫn đến tiêu tán năng lượng dưới dạng nhiệt. Việc lựa chọn vật liệu điện môi có hệ số tổn hao phù hợp cho phép MMA đạt được những tính chất điện từ mong muốn.



Hình 3.39. (a) Sơ đồ cấu trúc MMA, (b) phổ hấp thụ của MMA với sự thay đổi hệ số tan tổn hao của điện môi

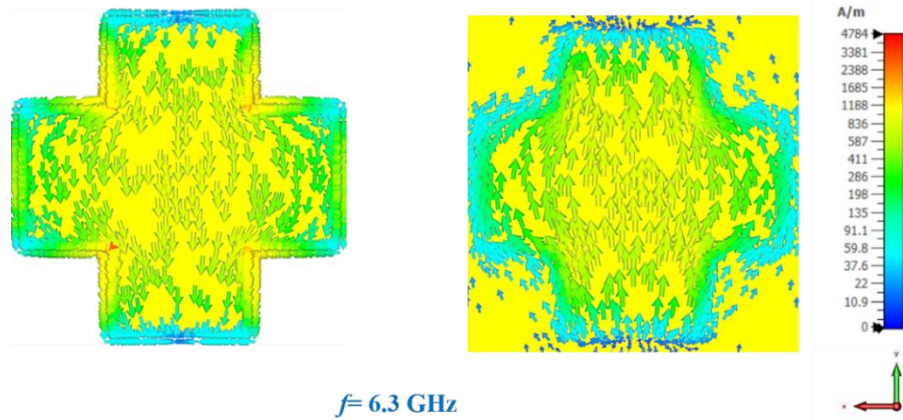
Xuất phát từ cấu trúc MMA 2 lớp Cu-FR-4 đã thảo luận phía trên. Để khảo sát sự ảnh hưởng của điện môi đến khả năng hấp thụ của cấu trúc. Phổ hấp thụ của MMA đã được khảo sát và mô phỏng với các hệ số tan tổn hao khác nhau, như thể hiện trong hình 3.39. Phổ hấp thụ của MMA cho thấy khi giảm dần độ tổn hao của điện môi từ giá trị $\tan\delta = 0.025$ xuống giá trị $\tan\delta = 0.0022$ độ hấp thụ của cấu trúc giảm dần. Tại tần số 4.85 GHz và 4.96 GHz độ hấp thụ đạt giá trị 69.67% và 71.26% với $\tan\delta = 0.0022$. Kết quả chỉ ra sự ảnh hưởng của điện môi hay tổn hao điện môi đến khả năng hấp thụ của cấu trúc MMA.



Hình 3.40. Sơ đồ cấu trúc (a) MA đơn lớp, (b) MMA, (c) Phổ hấp thụ của MA và MMA

Để làm rõ sự ảnh hưởng của độ tổn hao điện môi, lớp điện môi FR-4 của cấu trúc MA và MMA được thay thế bằng Roger với hằng số điện môi là 11.2 và $\tan\delta = 0.0022$, như thể hiện trong hình 3.40 (a), (b). Các tham số cấu trúc của ô cơ sở bao gồm $a = 18$ mm, $b = 16$ mm, $c = 7$ mm, $t_b = 0.035$ mm $t_d = 0.022$ mm và $t_m = 0.035$ mm. Phổ hấp thụ của cấu trúc MA và MMA được biểu diễn trong hình 3.40 (c). Trong đó, MA với độ dày lớp điện môi $t_d = 0.22$ mm cho đỉnh hấp thụ tại tần số 6.3 GHz với độ hấp thụ 84.12%. Với cấu trúc MA với $t_d = 0.475$ mm, đỉnh hấp thụ chỉ còn 38.45% tại tần số 6.14 GHz.

Phổ hấp thụ của MMA cho 2 đỉnh hấp thụ đạt 99.35% và 64.19% tại tần số 6.06 GHz và 6.28 GHz.

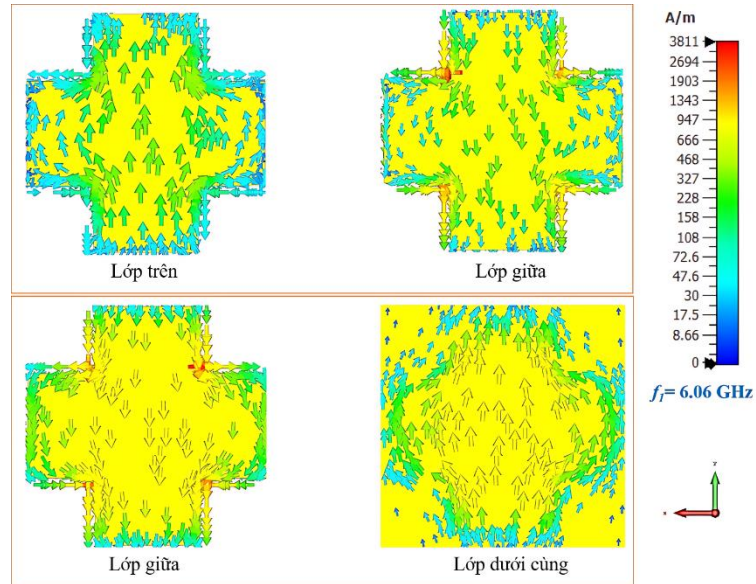


Hình 3.41. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MA ($t_d = 0.35\text{mm}$) tại tần số 6.3 GHz

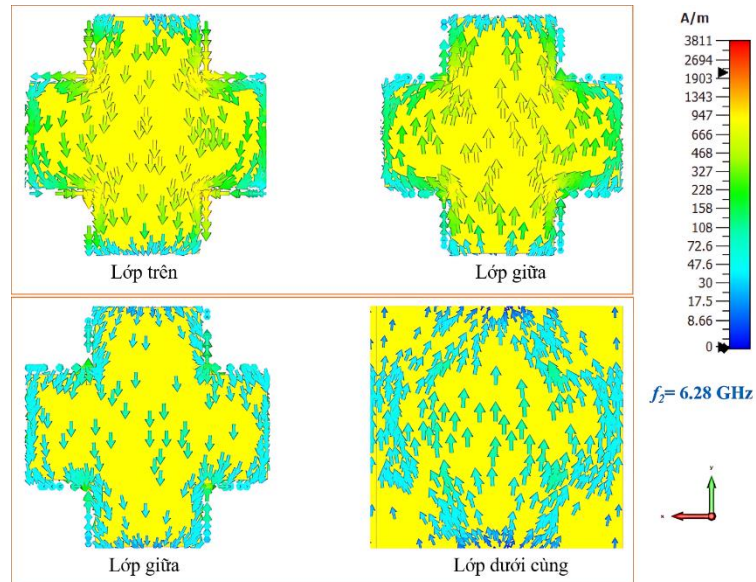
Phân bố dòng điện bề mặt của MA ($t_d = 0.22\text{ mm}$) tại tần số 6.3 GHz được khảo sát để làm rõ cơ chế hấp thụ như thể hiện trong hình 3.41. Quan sát trên hình có thể thấy, dòng điện bề mặt trên 2 tấm kim loại chạy song song, ngược chiều nhau. Đồng thời, dòng điện có cường độ lớn tập trung tại vị trí tương ứng vị trí đầu cộng. Điều này cho thấy, cộng hưởng từ đã xảy ra tại tần số này.

Hình 3.42 biểu diễn mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA tại tần số $f_1 = 6.06\text{ GHz}$, tương ứng với đỉnh hấp thụ đầu tiên. Tại hai lớp kim loại phía trên của cấu trúc, dòng điện chạy song song, ngược chiều nhau, cho thấy cộng hưởng từ xuất hiện. Tương tự, tại 2 lớp kim loại phía dưới, dòng điện bề mặt chạy song song, ngược chiều nhau, cũng cho thấy cộng hưởng từ xuất hiện, cường độ dòng điện tập trung mạnh ở giữa tấm kim loại. Phân bố dòng điện bề mặt cũng cho thấy, cường độ dòng điện bề mặt giữa 2 lớp kim loại phía dưới lớn hơn so với 2 lớp phía trên. Tại tần số $f_2 = 6.28\text{ GHz}$, dòng điện bề mặt ở 2 lớp kim loại phía trên của cấu trúc MMA có cường độ mạnh, tập trung chủ yếu ở giữa tấm kim loại, như thể hiện trong hình 3.43. Kết quả mô phỏng cho thấy, các dòng điện chạy ngược chiều và song song, cho thấy cộng hưởng từ xuất hiện. Tại 2 lớp kim loại dưới cùng, dòng điện bề mặt trên 2 lớp kim loại cũng chạy đối song nhau, tuy nhiên cường độ dòng điện nhỏ hơn so với 2 lớp kim loại phía trên.

Hình 3.44 thể hiện phổ hấp thụ của cấu trúc MMA với các góc phân cực và góc tới khác nhau tới khác nhau. Sự ảnh hưởng của góc phân cực đến tính chất của cấu trúc MMA được biểu diễn trong hình 3.44 (a). Có thể thấy, do được thiết kế có tính đối xứng, MMA có tính chất không nhạy với góc phân cực. MMA cho thấy khả năng duy trì độ hấp thụ ổn định với các góc phân cực khác nhau. Phổ hấp thụ của MMA với các góc tới



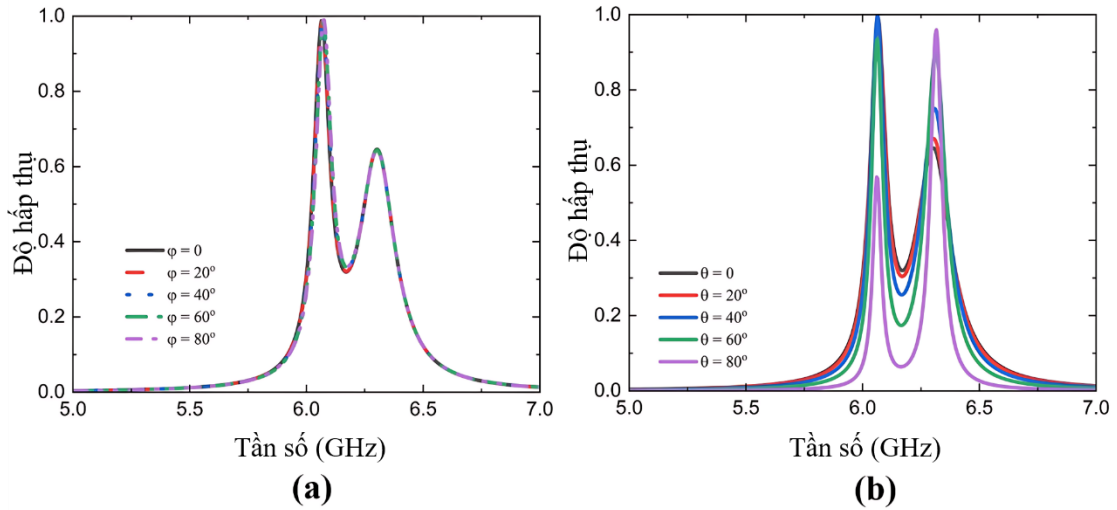
Hình 3.42. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA tại tần số $f_1 = 6.06$ GHz



Hình 3.43. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA tại tần số $f_2 = 6.28$ GHz

khác nhau được thể hiện trong hình 3.44 (b). Tại đỉnh hấp thụ đầu tiên $f_1 = 6.06$ GHz, khi tăng dần góc tới, phổ hấp thụ giảm dần. Đỉnh hấp thụ đầu tiên cho thấy khả năng duy trì khả năng hấp thụ với góc tới lớn tương đối tốt. Tại góc tới $\theta = 60^\circ$, MMA vẫn duy trì được độ hấp thụ đạt 93.64%. Khi góc tới $\theta = 80^\circ$, độ hấp thụ giảm mạnh xuống giá trị tương ứng 56.49%. Đối với đỉnh hấp thụ thứ 2 tương ứng $f_2 = 6.28$ GHz lại có xu hướng tăng dần khi tăng góc tới. Tại góc tới 80° , độ hấp thụ tại đỉnh thứ 2 đạt giá trị 95.99%. Điều này có thể được giải thích là do, tại tần số tương ứng đỉnh hấp thụ số 1, MMA đạt điều kiện phối hợp trở kháng tại góc tới $\theta = 0$, khi góc tới tăng dần, điều kiện phối hợp trở kháng không còn được thỏa mãn, dẫn đến cường độ hấp thụ giảm. Ngược lại, tại tần

số tương ứng đỉnh hấp thụ thứ 2, do chưa thỏa mãn điều kiện phối hợp trở kháng, nên khi tăng dần góc tới, MMA dần đạt điều kiện phối hợp trở kháng, dẫn đến cường độ hấp thụ tăng dần.



Hình 3.44. Phổ hấp thụ của MMA với (a) các góc phân cực φ khác nhau, (b) các góc tới θ khác nhau

Dải tần số/ Đỉnh hấp thụ (với độ hấp thụ >90%)	FBW (%)	Vật liệu; số lớp	Phương pháp chế tạo	Tương tác giữa các lớp	Độ dày mẫu	Tài liệu tham khảo
4.84 – 5.02 (GHz)	3.65	Đồng, FR-4; 2 lớp	Quang khắc	Có	0.805 mm	Nghiên cứu này
6.07-14.5 (GHz)	81.96	Mực dẫn điện Graphene, FR-4, đồng; 2 lớp	In lưới	Có	3.635 mm	
6.06 GHz và 6.28 (GHz)		Đồng, Roger; 2 lớp			0.545 mm	
7.7–36.8 (GHz)	130.4	Nhựa acrylic nhảy sáng, nước cất, đồng; 1 lớp	In 3D		3.82 mm	[116]
11.39 - 20.46 và 22.76 - 34.76 (GHz)	56.95 và 41.72	Hỗn hợp bạc dẫn điện, Nhựa nhảy sáng, đồng; 20 lớp;	In 3D	Không	4 mm	[64]
8.43-10.38 (GHz)	20.7%	Giấy mờ cao cấp, lưới	In phun mực	Không	1.06mm	[117]

		kim loại bạc; 4 lớp				
8.6–18.0 (GHz)	70.67	Màng điện trở, đồng, lõi xốp hình tổ ong với hằng số điện môi khác nhau, nhôm; 2 lớp;	In lưới và quang khắc	Không	12 mm	[118]

Bảng 3.2. So sánh các cấu trúc MMA được đề xuất với một số nghiên cứu khác trong vùng tần số GHz

Các cấu trúc MMA đề xuất được so sánh với một số cấu trúc MA và MMA trong một số nghiên cứu khác. Kết quả cho thấy, cấu trúc MMA được đề xuất có băng thông hấp thụ tương đối rộng (81.96%) với cấu trúc đơn giản gồm 2 lớp và phương pháp chế tạo đơn giản (quang khắc). Bên cạnh đó, khác với các nghiên cứu khác, các cấu trúc MMA đề xuất đều được nghiên cứu sự tương tác điện- từ giữa các lớp. Ngoài ra, cấu trúc MMA hấp thụ băng thông rộng được đề xuất cũng có độ dày nhỏ (3.635 mm). So với các cấu trúc MMA trong các nghiên cứu khác, MMA được đề xuất có nhiều lợi thế về cả băng thông hấp thụ, độ dày và khả năng chế tạo.

3.3. Kết luận chương 3

Đã làm rõ sự tương tác giữa các lớp thông qua nghiên cứu MMA có tổn hao Ohmic lớn và nhỏ, MMA có tổn hao điện môi nhỏ hoạt động trong vùng tần số GHz:

- Đã thiết kế, mô phỏng và chế tạo thành công MMA có độ tổn hao Ohmic nhỏ dựa trên vật liệu Cu-FR-4. Cấu trúc MMA nhiều lớp cho kết quả phổ hấp thụ với độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số 4.84 – 5.02 GHz, với FBW là 3.65%.

- Đã thiết kế, mô phỏng và chế tạo thành công MMA có độ tổn hao Ohmic lớn, dựa trên lớp hấp thụ là mực dẫn điện có thành phần Graphene. MMA graphene hai lớp đạt được độ hấp thụ lớn hơn 90% trải dài từ tần số 6.07 GHz đến 14.5 GHz với FBW đạt 81.96%.

- Đã thiết kế, mô phỏng các tính chất điện từ của MMA có tổn hao điện môi nhỏ với vật liệu Cu-Roger cho các đỉnh hấp thụ lần lượt 99.35% và 64.19% tại 6.06 và 6.28 GHz.

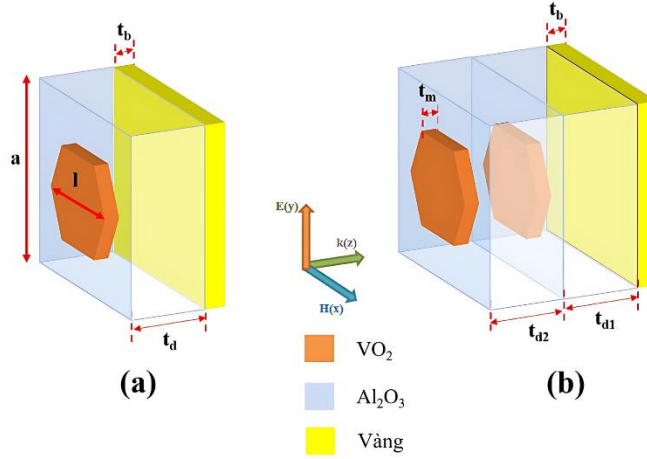
CHƯƠNG 4. SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA TƯƠNG TÁC GIỮA CÁC LỚP ĐỀN TÍNH CHẤT HẤP THỤ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HOÁ CÓ CẤU TRÚC ĐA LỚP TRONG VÙNG TẦN SỐ THz

MMA hoạt động trong vùng tần số THz đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát và khai thác năng lượng sóng ở dải tần cao, nơi các vật liệu truyền thống thường gặp giới hạn về hiệu suất. MMA trong vùng THz được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống cảm biến, thiết bị tàng hình... Cũng giống như vùng tần số GHz, các tính chất điện từ của MMA với độ tổn hao Ohmic khác nhau, độ tổn hao điện môi khác nhau cũng được thiết kế, mô phỏng và nghiên cứu. Lớp cộng hưởng các MMA trong chương này được thiết kế theo hình lục giác giúp giảm kích thước của ô cơ sở so với cấu trúc dấu cộng. Nhờ hình dạng đều và các cạnh gần nhau, cấu trúc lục giác được sắp xếp nhỏ gọn mà vẫn giữ hiệu quả cộng hưởng, vì vậy kích thước ô cơ sở được giảm xuống so với hình dấu cộng. Điều này rất có lợi khi cần chế tạo các vật liệu mỏng, mật độ cao và tiết kiệm diện tích hấp thụ trong công nghệ THz hiện đại. VO₂ thường được sử dụng trong cấu trúc MA hoạt động tại vùng THz [119-122]. Do có khả năng điều chỉnh độ dẫn linh hoạt nên MMA có thành phần VO₂ được sử dụng để khảo sát sự ảnh hưởng của tổn hao Ohmic. Cấu trúc VO₂-Al₂O₃ với VO₂ độ dẫn điện 17500 S/m tương ứng cấu trúc có tổn hao Ohmic lớn, độ dẫn 25000 S/m tương ứng tổn hao Ohmic nhỏ. Để khảo sát sự ảnh hưởng của tổn hao điện môi, cấu trúc Au-SiC với hệ số tổn hao điện môi khác nhau. Ngoài ra, ứng dụng MMA trong phát xạ hồng ngoại cũng được nghiên cứu và trình bày trong chương này. Kích thước ô cơ sở trong chương này được lựa chọn để MMA hoạt động tại vùng tần số 4-25 THz, phù hợp với ứng dụng MMA trong các thiết bị cảm biến, phát xạ...

4.1. Ảnh hưởng của kim loại lên tương tác giữa các lớp và tính chất hấp thụ

4.1.1. MMA có tổn hao Ohmic lớn

Để quan sát thấy sự ảnh hưởng của tổn hao Ohmic đến khả năng hấp thụ, một cấu trúc MMA VO₂-Al₂O₃ được thiết kế như thể hiện trong hình 4.1. MMA được đề xuất có cấu trúc 2 lớp, thông số cấu trúc được tối ưu với các giá trị: $a = 0.5 \mu\text{m}$, $t_b = 0.2 \mu\text{m}$, $t_{d1} = 2.5 \mu\text{m}$, $t_{d2} = 0.5 \mu\text{m}$, $t_m = 0.1 \mu\text{m}$, $l = 0.2 \mu\text{m}$. Tầm kim loại liên tục dưới cùng là vàng với độ dẫn $4.56 \times 10^7 \text{ S/m}$.



Hình 4.1. Sơ đồ cấu trúc (a) MA đơn lớp, (b) MMA hai lớp với lớp hấp thụ VO₂

Trong đó, VO₂ trong vùng tần số THz được định nghĩa dựa trên hàm Drude [123-124]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \quad (4.1)$$

Trong đó:

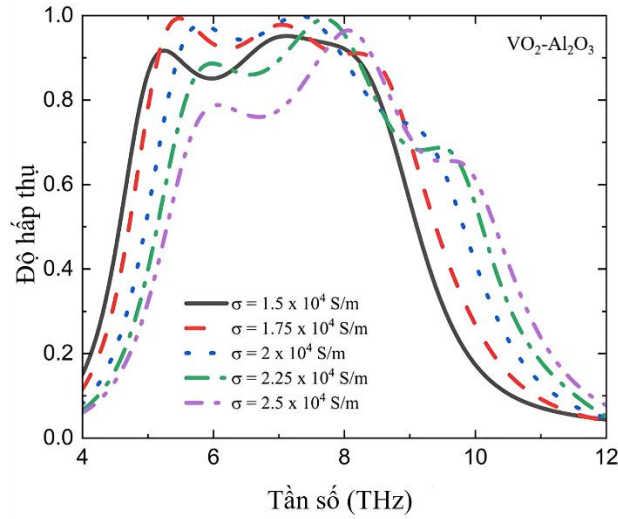
- ε_{∞} là hằng số điện môi ở tần số cao, có giá trị 12
- ω_p là tần số plasma, có giá trị 3.6228×10^{14} rad/s
- γ là tần số va chạm, phản ánh mức độ tổn thất, với giá trị $5.75/2\pi \times 10^{13}$.

Điện môi Al₂O₃ với hằng số điện môi 9.9, tan tổn hao 0.0001 được sử dụng làm chất nền điện môi trong trường hợp này.

Để khảo sát sự ảnh hưởng của tổn hao Ohmic, độ dẫn điện của VO₂ được thay đổi để khảo sát sự ảnh hưởng đến phổ hấp thụ. Khi đó, độ dẫn điện của VO₂ được tính theo công thức: [125]

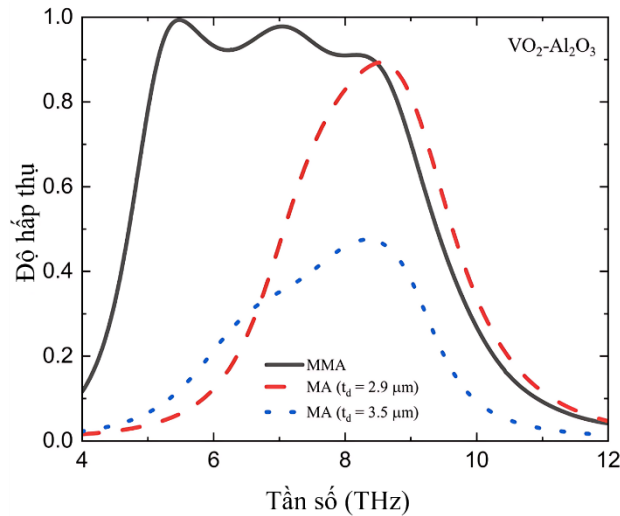
$$\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0} \cdot \omega_p^2(\sigma_0) \quad (4.2)$$

Hình 4.2 trình bày phổ hấp thụ của MMA với độ dẫn VO₂ khác nhau. Kết quả cho thấy, khi độ dẫn đạt giá trị 25000 S/m, MMA có 3 đỉnh hấp thụ trong khoảng 4-12 THz. Khi tăng dần giá trị độ dẫn, các đỉnh hấp thụ tăng dần và dịch chuyển về phía tần số thấp. Khi độ dẫn đạt giá trị 17500 S/m, MMA duy trì được hấp thụ băng thông rộng với FBW là 47.89%, độ hấp thụ duy trì lớn hơn 90% trong khoảng 5.16-8.41 THz.



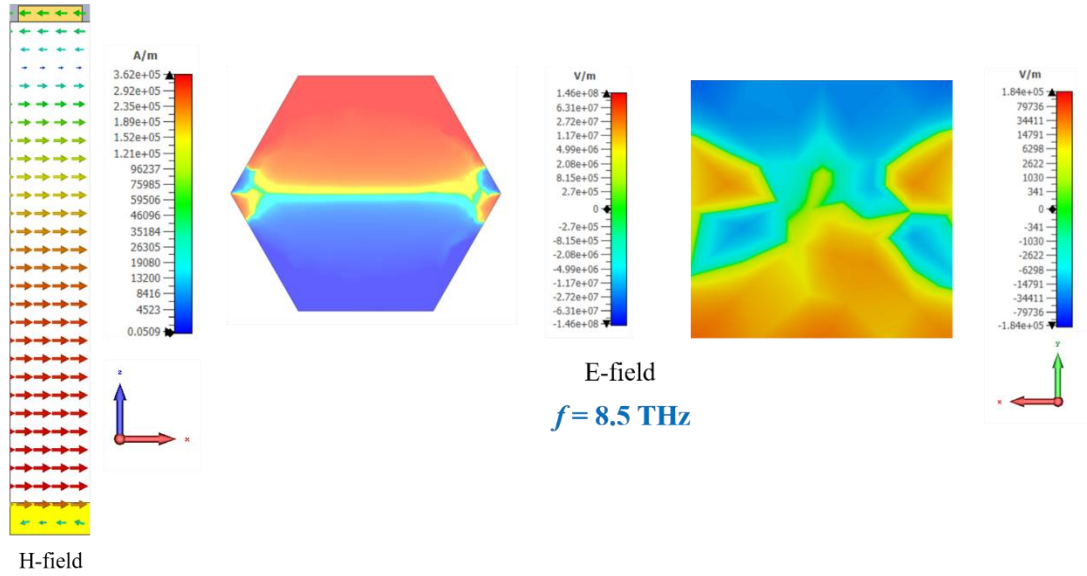
Hình 4.2. Phổ hấp thụ của MMA với VO_2 có độ dẫn khác nhau

Phổ hấp thụ của MA đơn lớp và MMA với VO_2 có độ dẫn là 17500 S/m cũng được khảo sát và trình bày trong hình 4.3. Trong đó, MA đơn lớp được khảo sát với 2 giá trị t_d là $2.9 \text{ }\mu\text{m}$ và $3.5 \text{ }\mu\text{m}$. Với giá trị $t_d = 2.9 \text{ }\mu\text{m}$, MA có 1 đỉnh hấp thụ tại tần số 8.5 THz với độ hấp thụ đạt 89.27% . Với giá trị $t_d = 3.1 \text{ }\mu\text{m}$, đỉnh hấp thụ đạt giá trị 47.52% tại 8.33 THz . Cấu trúc MMA có 03 đỉnh hấp thụ tương ứng tại 5.48 THz , 7.04 THz và 8.31 THz với độ hấp thụ lần lượt là 99.34% , 97.83% và 90.79% .

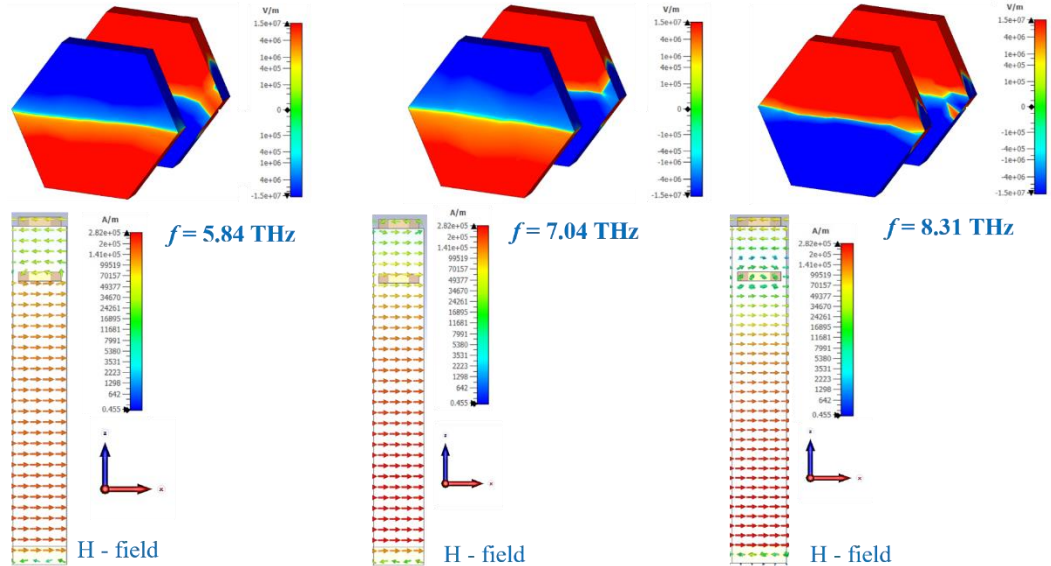


Hình 4.3. Phổ hấp thụ của MA và MMA với VO_2 có độ dẫn 17500 S/m

Hình 4.4 biểu diễn phân bố từ trường của MA tại tần số 8.5 THz với độ dày điện môi là $t_d = 2.9 \text{ }\mu\text{m}$. Qua phân bố từ trường có thể thấy, từ trường tập trung mạnh tại gần vị trí lớp kim loại dưới cùng. Từ trường tạo thành các đường thẳng song song, cho thấy cộng hưởng từ đã xảy ra khi 2 lớp kim loại tương tác với nhau. Quan sát phân bố điện trường cho thấy, điện trường chỉ tập trung tại vị trí lớp kim loại phía trên.

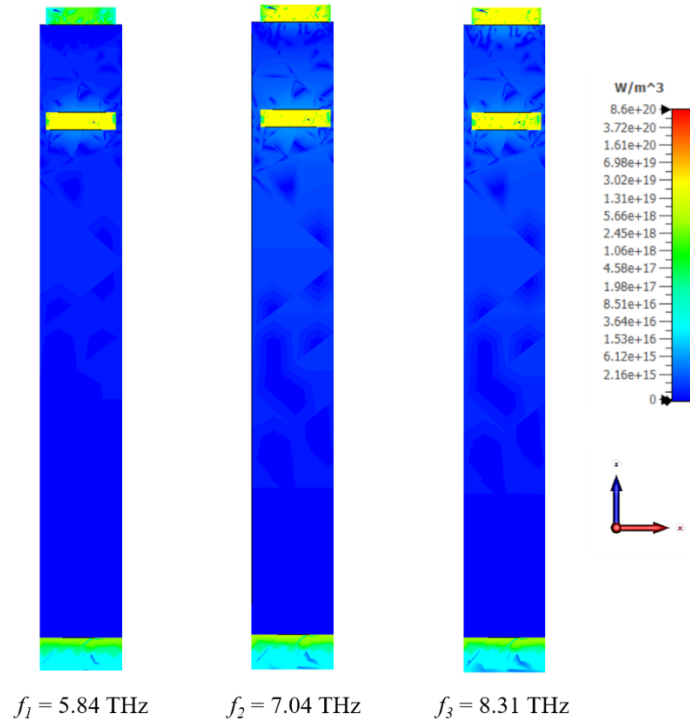


Hình 4.4. Phân bố từ trường và điện trường trên MA với $t_d = 2.9 \mu\text{m}$ tại tần số 8.5 THz



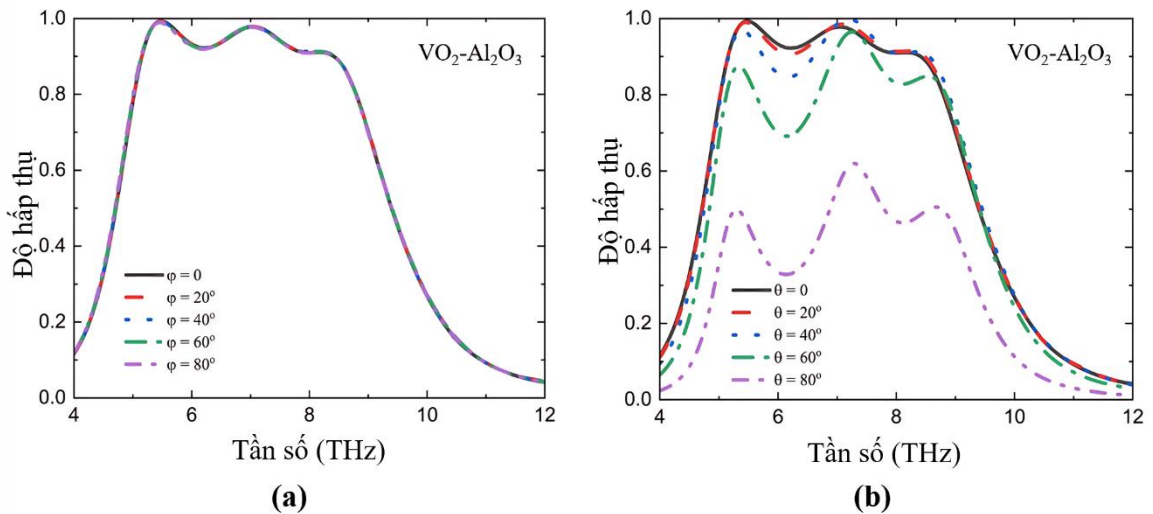
Hình 4.5. Phân bố từ trường và điện trường của MMA ở các tần số cộng hưởng

Phân bố từ trường của MMA ở các tần số cộng hưởng khác nhau được trình bày trong hình 4.5. Tại các tần số 5.84, 7.04 và 8.31 THz, ở 2 lớp phía dưới, từ trường có cường độ lớn, phân bố chạy song song nhau. Điều này cho thấy cộng hưởng từ mạnh xảy ra giữa 2 lớp kim loại phía dưới. Ở vị trí giữa 2 lớp phía trên, tại tần số 5.84, 7.04 và 8.31 THz, có thể quan sát thấy từ trường cũng được phân bố song song, tuy nhiên cường độ yếu hơn. Quan sát phân bố điện trường, có thể thấy, điện trường chủ yếu tập trung gần các lớp kim loại cộng hưởng. Tại tần số 8.31 THz, điện trường giữa 2 lớp phía dưới có cường độ rất nhỏ, tuy nhiên điện trường giữa 2 lớp phía trên lại có cường độ lớn.



Hình 4.6. Phân bố tổn hao năng lượng của MMA ở các tần số cộng hưởng khác nhau

Phân bố mật độ tổn hao năng lượng của MMA được minh họa trong hình 4.6 cho thấy đặc trưng cộng hưởng tại các tần số cộng hưởng chính. Tại ba tần số $f_1 = 5.84$ THz, $f_2 = 7.04$ THz và $f_3 = 8.31$ THz, mật độ tổn hao năng lượng tập trung chủ yếu tại vị trí gần các lớp kim loại. Ở các tần số khác nhau, vùng tiêu tán năng lượng giống nhau, nhưng cường độ có sự khác nhau, cho thấy sự phù hợp tần số của cấu trúc với từng cộng hưởng. Các khu vực ở xa các lớp kim loại chỉ đóng vai trò phụ, không có nhiều đóng góp vào quá trình hấp thụ, nhờ đó tổn hao nền được giảm thiểu.

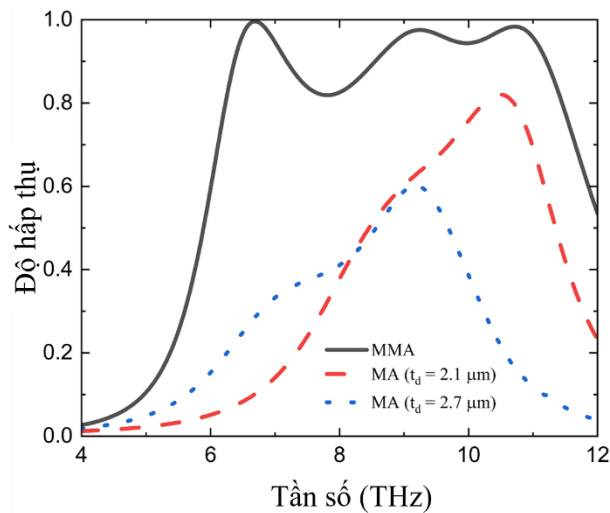


Hình 4.7. Phổ hấp thụ của MMA với lớp hấp thụ VO_2 với (a) góc phân cực và (b) góc tới khác nhau

Hình 4.7 trình bày phổ hấp thụ của MMA được đề xuất với lớp hấp thụ VO_2 ở các góc phân cực và góc tới khác nhau. Nhờ có cấu trúc đối xứng, khi thay đổi góc phân cực sóng điện từ, tính chất hấp thụ của MMA không thay đổi, như quan sát trên hình 4.7 (a). Phổ hấp thụ của cấu trúc với các góc tới khác nhau được thể hiện trong hình 4.7 (b). Kết quả cho thấy, cấu trúc MMA có khả năng duy trì độ hấp thụ ở một số tần số cộng hưởng tốt với các góc tới lớn. Khi thay đổi góc tới của sóng điện từ, các đỉnh hấp thụ có sự dịch chuyển nhỏ. Đỉnh hấp thụ đầu tiên có xu hướng dịch chuyển về phía tần số thấp tương ứng giá trị 5.48 THz với $\theta = 0$ và 5.29 THz với $\theta = 80^\circ$. Ngược lại, đỉnh hấp thụ thứ 2 và 3 có xu hướng dịch dần về phía tần số cao hơn. Đối với đỉnh hấp thụ thứ 2, tần số hấp thụ khi $\theta = 0$ và $\theta = 80^\circ$ tương ứng là 7.04 THz và 7.28 THz. Đối với đỉnh hấp thụ thứ 3, tần số hấp thụ khi $\theta = 0$ và $\theta = 80^\circ$ tương ứng là 8.31 THz và 8.67 THz. Bên cạnh đó, khi tăng dần góc tới, độ hấp thụ của MMA cũng giảm dần. Với $\theta = 20^\circ$, phổ hấp thụ của MMA gần như không thay đổi. Khi $\theta = 40^\circ$ FBW đạt giá trị 10.43% (5.18-5.75 THz) và 25.62% (6.6-8.54 THz). Khi $\theta = 60^\circ$, MMA còn 1 đỉnh hấp thụ với độ hấp thụ lớn hơn 90% tại tần số 7.25 THz. Đối với $\theta = 80^\circ$, độ hấp thụ của MMA giảm mạnh xuống dưới 70%.

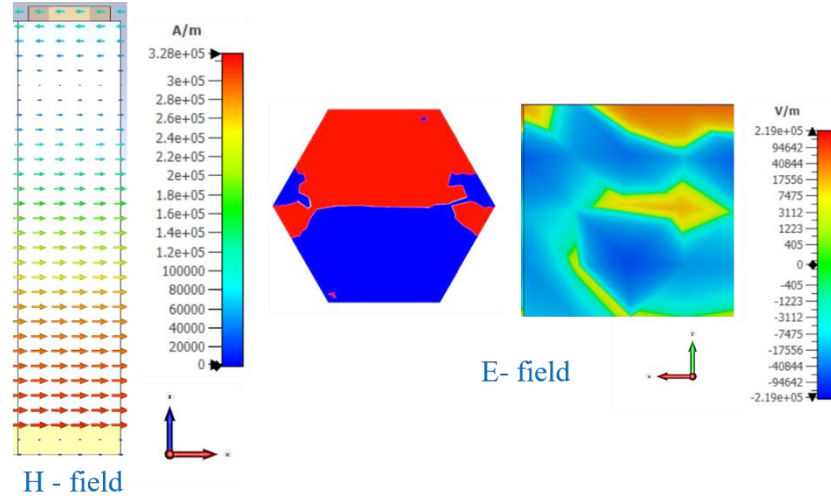
4.1.2. MMA có tổn hao Ohmic nhỏ

Để làm rõ sự ảnh hưởng của tổn hao Ohmic đến khả năng hấp thụ của, cấu trúc MMA $\text{VO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ được sử dụng với thiết kế như trên, tuy nhiên độ dẫn VO_2 được điều chỉnh đến giá trị 25000 S/m (như hình 4.1). Khi đó cấu trúc MMA được tối ưu với các thông số như sau: $a = 0.5 \mu\text{m}$, $t_b = 0.2 \mu\text{m}$, $t_{d1} = 2.1 \mu\text{m}$, $t_{d2} = 0.5 \mu\text{m}$, $t_m = 0.1 \mu\text{m}$, $l = 0.2 \mu\text{m}$.



Hình 4.8. Phổ hấp thụ của MA và MMA với lớp hấp thụ VO_2 ($\sigma = 25000 \text{ S/m}$)

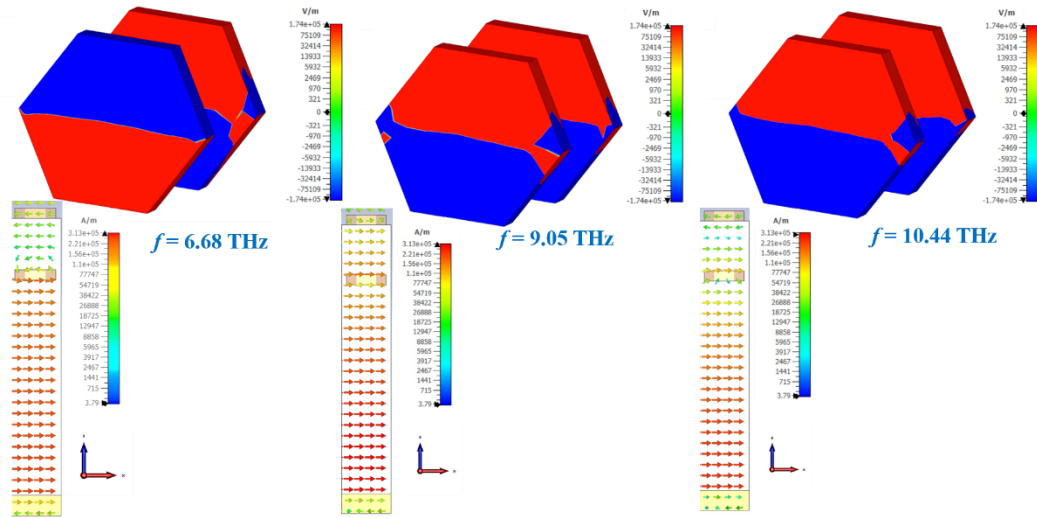
Hình 4.8 trình bày phổ hấp thụ của MA đơn lớp và MMA VO₂-Al₂O₃ với độ dẫn VO₂ là $\sigma = 25000$ S/m. Kết quả cho thấy, cấu trúc MMA cho 03 đỉnh hấp thụ tại các tần số 6.68, 9.24 và 10.7 THz với độ hấp thụ lần lượt là 99.61%, 97.54% và 98.35%. Các cấu trúc MA với các độ dày điện môi khác nhau $t_d = 2.1$ μm và 2.7 μm cũng được khảo sát. Trong đó cấu trúc MA với $t_d = 2.1$ μm có 1 đỉnh hấp thụ cực đại tại 10.5 THz với độ hấp thụ đạt 82.03%, đối với $t_d = 2.7$ μm , MA có 1 đỉnh cực đại tại 9.17 THz với độ hấp thụ 60.1%.



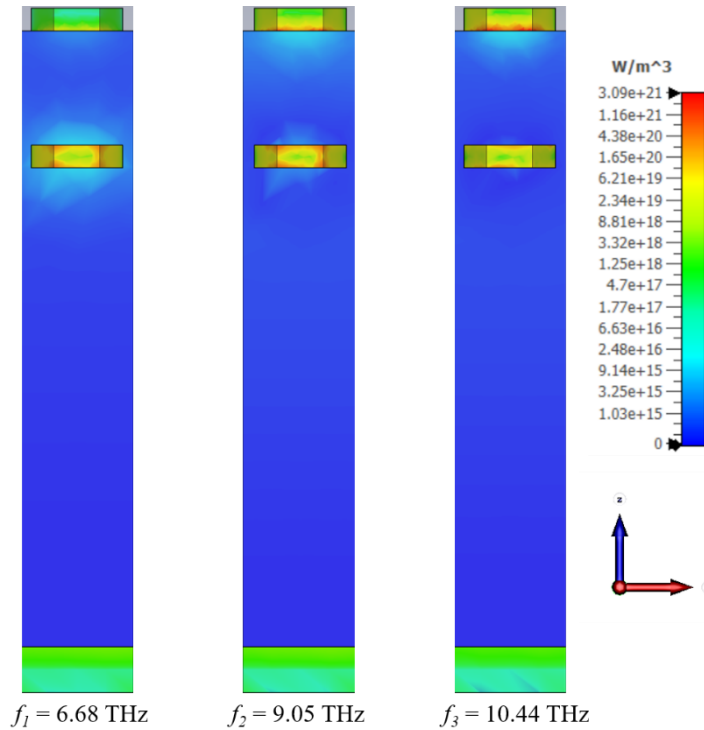
Hình 4.9. Phân bố từ trường và điện trường của MA $t_d = 2.1$ μm với lớp hấp thụ VO₂ ($\sigma = 25000$ S/m)

Phân bố từ trường và điện trường của MA $t_d = 2.1$ μm được mô phỏng và thể hiện trong hình 4.9. Trong đó, từ trường được phân bố với cường độ lớn tập trung tại phía dưới của cấu trúc MA. Từ trường được phân bố thành những đường thẳng song song, cho thấy cộng hưởng từ xảy ra giữa 2 lớp kim loại tại tần số này. Tại tần số này, điện trường tại vị trí gần lớp kim loại phía trên có cường độ lớn hơn. Từ phân bố từ trường và điện trường cho thấy, cộng hưởng tại tần số này chủ yếu do đóng góp của cộng hưởng từ.

Để làm rõ cơ chế hấp thụ của MMA, phân bố từ trường và điện trường của MMA với lớp hấp thụ VO₂ ($\sigma = 25000$ S/m) được khảo sát và thể hiện trên hình 4.10. Quan sát phân bố từ trường và điện trường, có thể thấy, tại cả 3 tần số 6.68, 9.05 và 10.44 THz đều có cộng hưởng từ của 2 lớp kim loại phía dưới. Do từ trường tập trung với cường độ lớn và được phân bố thành các đường thẳng song song. Tại tần số 6.68 THz, ở giữa 2 lớp phía trên xuất hiện 1 xoáy từ trường, cho thấy cộng hưởng điện đã xảy ra, tuy nhiên cường độ không lớn. Tại tần số 9.05 THz, 2 lớp phía trên cũng xuất hiện cộng hưởng từ, tại tần số 10.44 THz, điện trường cũng tập trung với cường độ lớn tại vị trí này.



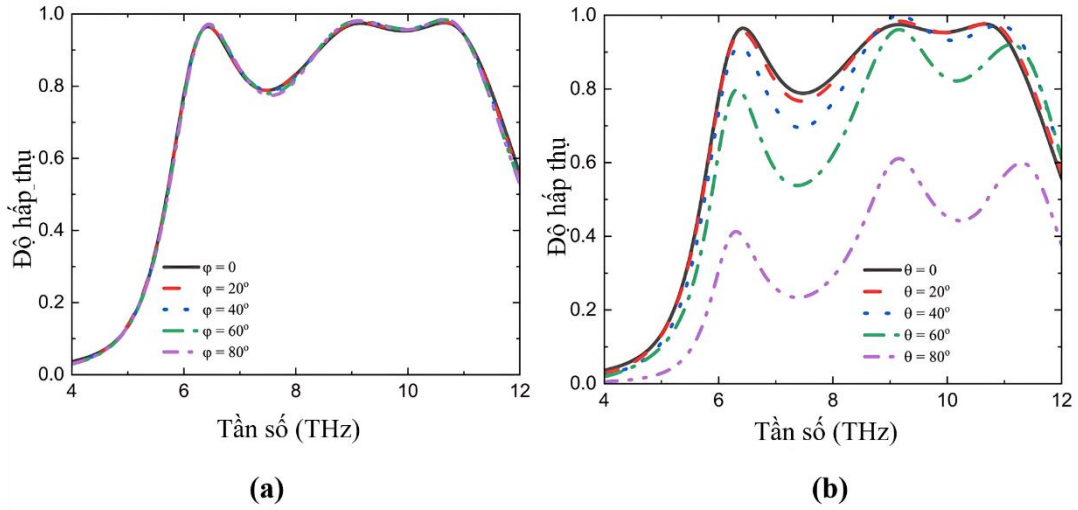
Hình 4.10. Phân bố từ trường và điện trường của MMA với lớp hấp thụ VO_2 ($\sigma = 25000$ S/m)



Hình 4.11. Phân bố tổn hao năng lượng của MMA với lớp hấp thụ VO_2 (25000 S/m) ở các tần số cộng hưởng khác nhau

Phân bố mật độ tổn hao năng lượng của cấu trúc MMA được thể hiện ở hình 4.11 tại các tần số cộng hưởng $f_1 = 6.68$ THz, $f_2 = 9.05$ THz và $f_3 = 10.44$ THz, cho thấy các vùng tổn hao tập trung mạnh tại các lớp cấu trúc cộng hưởng. Trong khi đó, phần nền và không gian xung quanh có giá trị tổn hao rất nhỏ. Khi thay đổi tần số cộng hưởng, vị trí các vùng tổn hao gần như không thay đổi, nhưng cường độ có sự thay đổi. Điều này chứng tỏ MMA đạt hiệu quả cao về hấp thụ sóng điện từ, giảm tổn hao nền. Đây là cơ

sở quan trọng cho các ứng dụng hấp thụ sóng THz, cảm biến hoặc điều khiển sóng điện từ.



Hình 4.12. Phổ hấp thụ của MMA với lớp hấp thụ VO_2 ($\sigma = 25000 \text{ S/m}$) với (a) góc phân cực và (b) góc tới khác nhau

Hình 4.12 trình bày phổ hấp thụ của MMA với lớp hấp thụ VO_2 ($\sigma = 25000 \text{ S/m}$) với các góc phân cực sóng điện từ và các góc tới khác nhau. Khi thay đổi góc phân cực song điện từ, độ hấp thụ của MMA không có nhiều sự thay đổi. Điều đó cho thấy, cấu trúc MMA không chịu ảnh hưởng của góc phân cực, như thể hiện ở hình 4.12 (a). MMA cũng cho thấy khả năng duy trì độ hấp thụ tốt ở góc tới lớn, như thể hiện trong hình 4.12 (b). Cấu trúc duy trì khả năng hấp thụ tương đối ổn định với góc tới θ nhỏ hơn 40° . Khi tăng $\theta = 60^\circ$, MMA còn duy trì 2 đỉnh hấp thụ lớn hơn 90% tại tần số 9.15 và 11.14 THz. Độ hấp thụ của cấu trúc giảm xuống dưới 60% khi $\theta = 80^\circ$.

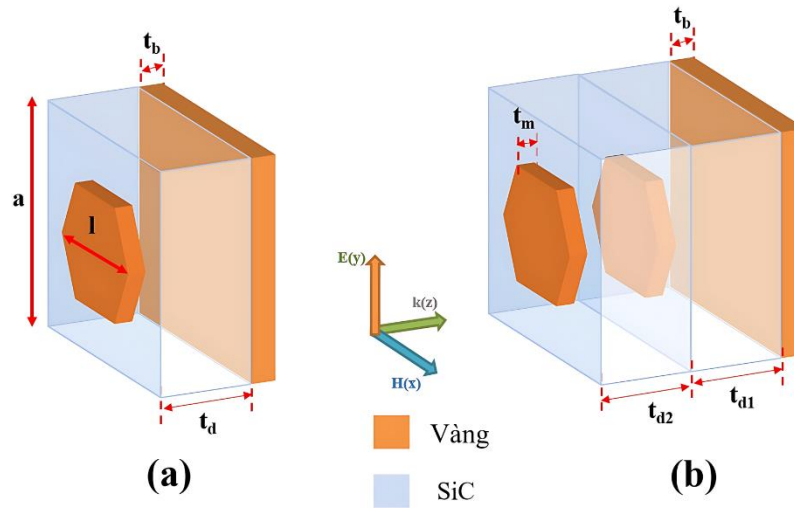
4.2. Ảnh hưởng của điện môi lên tương tác giữa các lớp và tính chất hấp thụ

Để làm rõ sự ảnh hưởng của tổn thất điện môi đến khả năng hấp thụ trong vùng tần số THz, một cấu trúc MMA Au-SiC đã được đề xuất như hình 4.13. Các thông số cấu trúc của ô cơ sở được tối ưu với kích thước ô cơ sở $a = 4 \text{ }\mu\text{m}$, $t_b = 0.2 \text{ }\mu\text{m}$, $t_{d1} = 0.42 \text{ }\mu\text{m}$, $t_{d2} = 0.5 \text{ }\mu\text{m}$, $t_m = 0.1 \text{ }\mu\text{m}$, $l = 0.45 \text{ }\mu\text{m}$. Cấu trúc MMA sử dụng kim loại Au (vàng) với độ dẫn điện là $4.56 \times 10^7 \text{ S/m}$. Điện môi SiC được định nghĩa dựa trên hàm số Lorentz [126-127]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 + \omega^2 + i\omega\gamma} \quad (4.3)$$

Trong đó:

- $\varepsilon(\omega)$ là hằng số điện môi phức tại tần số góc ω ,
- ε_∞ là hằng số điện môi ở tần số cao (ngoài cộng hưởng) với giá trị 6.7,
- ω_p là tần số plasma đặc trưng của vật liệu,
- ω_0 là tần số cộng hưởng riêng (tần số dao động) của SiC với giá trị 1.494×10^{14} rad/s,
- γ là hệ số suy hao (damping factor) liên quan đến tổn thất năng lượng với giá trị 1.427×10^{12} 1/s, i là đơn vị ảo.

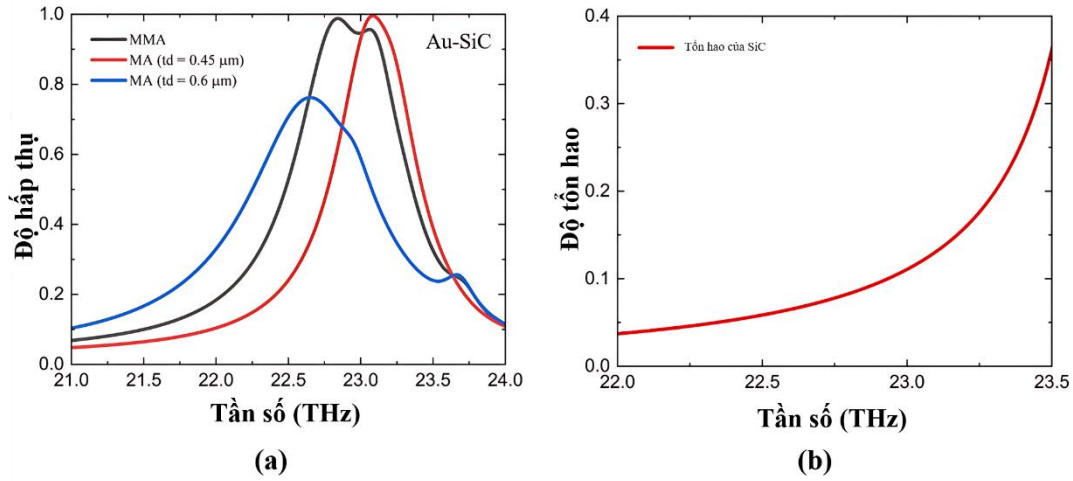


Hình 4.13. (a) Sơ đồ cấu trúc MA Au-SiC, (b) MMA

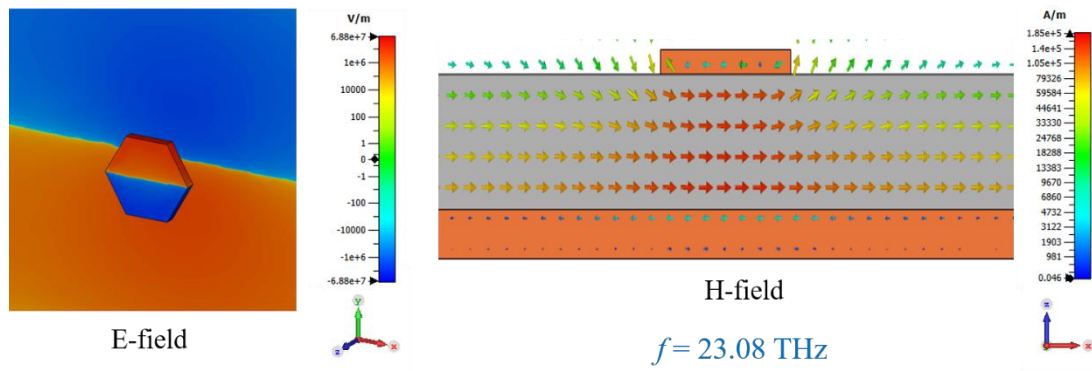
Phổ hấp thụ của cấu trúc MA và MMA được thể hiện trong hình 4.14 (a). Cấu trúc MA với $t_d = 0.45 \mu\text{m}$ cho đỉnh hấp thụ đạt giá trị 99.55% tại tần số 23.08 THz. Khi $t_d = 0.6 \mu\text{m}$, MA cho đỉnh hấp thụ tại tần số 22.65 THz, với độ hấp thụ đạt 76.2%. Cấu trúc MMA cho 2 đỉnh hấp thụ cực đại tại tần số 22.84 và 23.06 THz với độ hấp thụ tương ứng là 98.77% và 95.62%. MMA cũng cho băng thông hấp thụ lớn hơn 90% với FBW đạt giá trị 1.78%. Ngoài ra, độ tổn hao của SiC cũng được trình bày trong hình 4.14 (b). Kết quả cho thấy, tại khoảng tần số 22.72 đến 23.13 THz (tương ứng khoảng tần số có độ hấp thụ $> 90\%$), độ tổn hao của SiC có giá trị trong khoảng 0.078-0.083. Điều này cho thấy, cấu trúc MMA với điện môi SiC có độ tổn hao lớn hơn nhiều so với điện môi Al_2O_3 như đã trình bày ở trên.

Hình 4.15 biểu diễn phân bố từ trường và điện trường của MA đơn lớp với $t_d = 0.45 \mu\text{m}$ tại tần số 23.08 THz. Kết quả cho thấy, từ trường có cường độ mạnh, chạy song song tại vị trí giữa các lớp kim loại, cho thấy cộng hưởng từ đã xảy ra. Trong khi đó điện trường phân bố trong cấu trúc cho thấy dòng điện bề mặt trên 2 lớp kim loại chạy ngược

chiều nhau, đây là đặc trưng của cộng hưởng từ. Do đó, đỉnh hấp thụ của MA tại tần số này chủ yếu do đóng góp của cộng hưởng từ.

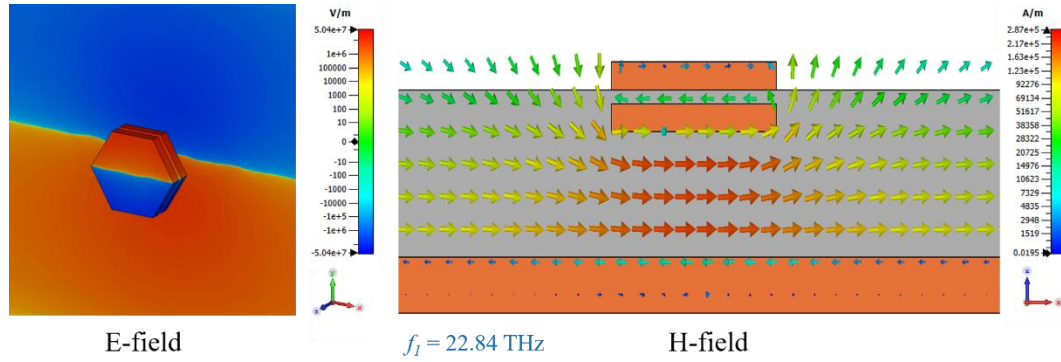


Hình 4.14. Phổ hấp thụ của MA và MMA Al-SiC



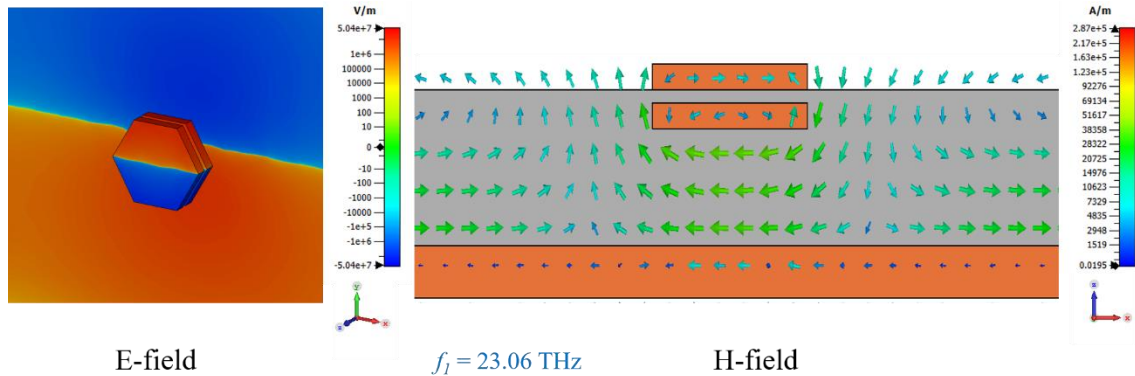
Hình 4.15. Phân bố từ trường và điện trường của MA tại các tần số 23.08 THz

Hình 4.16 mô phỏng phân bố từ trường và điện trường của MMA tại tần số 22.84 THz, phân bố từ trường cho thấy từ trường chạy song song và có cường độ mạnh trong lớp điện môi giữa 2 lớp kim loại phía dưới. Do đó, có thể thấy cộng hưởng từ xuất hiện tại tần số này giữa 2 lớp kim loại phía dưới. Tại 2 lớp phía trên, từ trường được phân bố tạo thành các đường thẳng song song, tuy nhiên từ trường có cường độ yếu. Phân bố điện trường của cấu trúc cho thấy, dòng điện bề mặt 2 lớp phía trên chạy song song cùng chiều nhau, cho thấy cộng hưởng điện giữa hai lớp. Tại 2 lớp phía dưới, dòng điện bề mặt chạy song song ngược chiều, cho thấy cộng hưởng từ giữa hai lớp. Do đó, đỉnh hấp thụ này có sự đóng góp của cộng hưởng từ ở 2 lớp phía dưới và cộng hưởng điện 2 lớp phía trên.



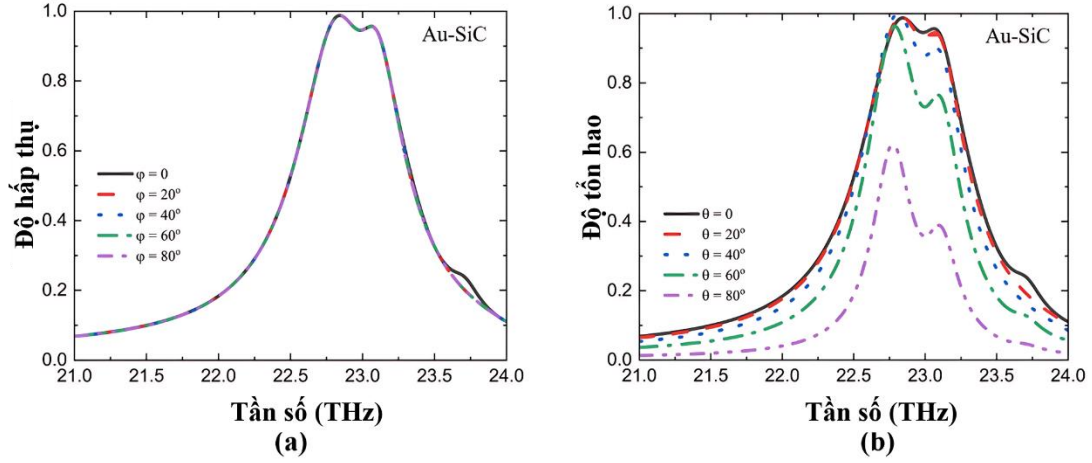
Hình 4.16. Phân bố từ trường, điện trường của MMA tại tần số 22.84 THz

Phân bố từ trường và điện trường của MMA tại tần số 23.06 THz được biểu diễn trong hình 4.17. Kết quả cho thấy, công hưởng từ xuất hiện tại vị trí giữa 2 lớp kim loại phía dưới. Hai lớp kim loại phía trên cũng có sự tương tác điện. Tại tần số 23.06 THz, dòng điện bề mặt của 2 lớp kim loại phía trên chạy song song cùng chiều, đặc trưng của cộng hưởng điện. Định hấp thụ tại tần số này cũng do cộng hưởng từ 2 lớp phía dưới và cộng hưởng điện 2 lớp phía trên gây ra.



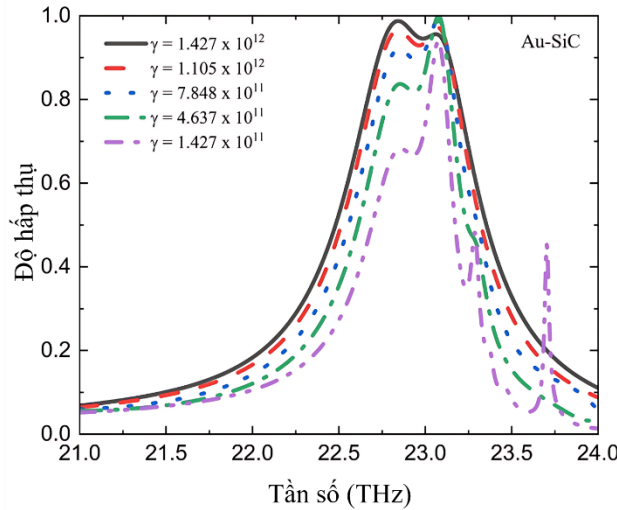
Hình 4.17. Phân bố từ trường, điện trường của MMA tại tần số 23.06 THz

Ảnh hưởng của góc phân cực và góc tới đến tính chất của MMA đề xuất được trình bày trong hình 4.18. MMA duy trì độ hấp thụ ổn định với góc phân cực sóng điện từ lớn, do được thiết kế theo hình lục giác đối xứng. Quan sát sự ảnh hưởng của góc tới ta thấy, tính chất hấp thụ của MMA được duy trì tốt trước ảnh hưởng của góc tới lớn. Khi θ đạt 60° , MMA chỉ còn 1 đỉnh hấp thụ lớn hơn 90% . Khi tăng θ lên lớn hơn 80° , độ hấp thụ giảm mạnh xuống dưới 70% .



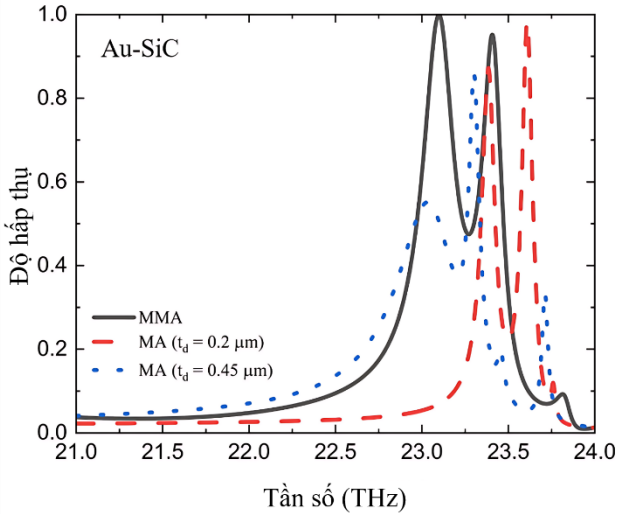
Hình 4.18. Ảnh hưởng của (a) góc phân cực và (b) góc tới đến tính chất hấp thụ của MMA

Để làm rõ ảnh hưởng của tổn hao điện môi đến cấu trúc MMA hoạt động tại vùng THz, hệ số suy hao γ của SiC đã được giảm xuống để khảo sát. Hình 4.19 biểu diễn phổ hấp thụ của MMA với các giá trị tổn hao điện môi khác nhau. Có thể thấy, khi giảm dần hệ số γ , phổ hấp thụ của MMA có xu hướng giảm dần, điều đó cho thấy sự ảnh hưởng của tổn hao điện môi đến khả năng hấp thụ của MMA.



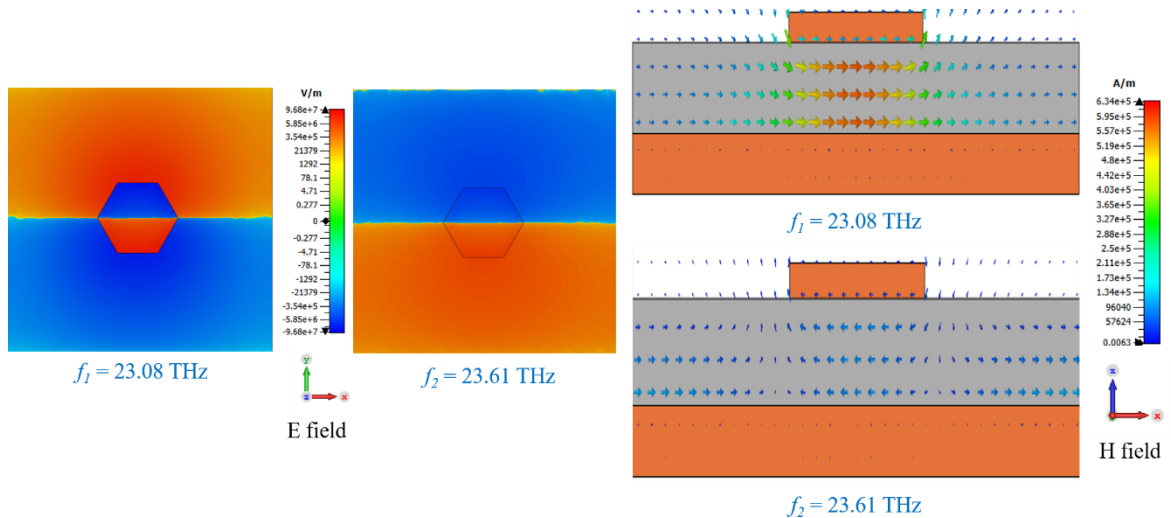
Hình 4.19. Ảnh hưởng của hệ số tổn hao điện môi γ đến tính chất hấp thụ của MMA

MMA Au-SiC với $\gamma = 1.427 \times 10^{11}$ được tối ưu hóa thông số để khảo sát khả năng hấp thụ cấu trúc. Các thông số sau khi tối ưu là kích thước ô cơ sở $a = 3 \mu\text{m}$, $t_b = 0.2 \mu\text{m}$, $t_{d1} = 0.2 \mu\text{m}$, $t_{d2} = 0.15 \mu\text{m}$, $t_m = 0.1 \mu\text{m}$, $l = 0.45 \mu\text{m}$. Phổ hấp thụ của MA và MMA Au-SiC với $\gamma = 1.427 \times 10^{11}$ được trình bày trong hình 4.20. Cấu trúc MMA có 2 đỉnh hấp thụ tại tần số 23.09 và 23.4 THz với độ hấp thụ đạt giá trị lần lượt là 99.96% và 95.21%. Các cấu trúc MA đơn lớp với độ dày lớp điện môi $t_d = 0.2$ và $0.45 \mu\text{m}$ cho đỉnh hấp thụ đầu tiên tương ứng tại các tần số 23.38 THz (87.22%) và 23.03 THz (55.17%).



Hình 4.20. Phổ hấp thụ của MMA và MA đơn lớp với $\gamma = 1.427 \times 10^{11}$

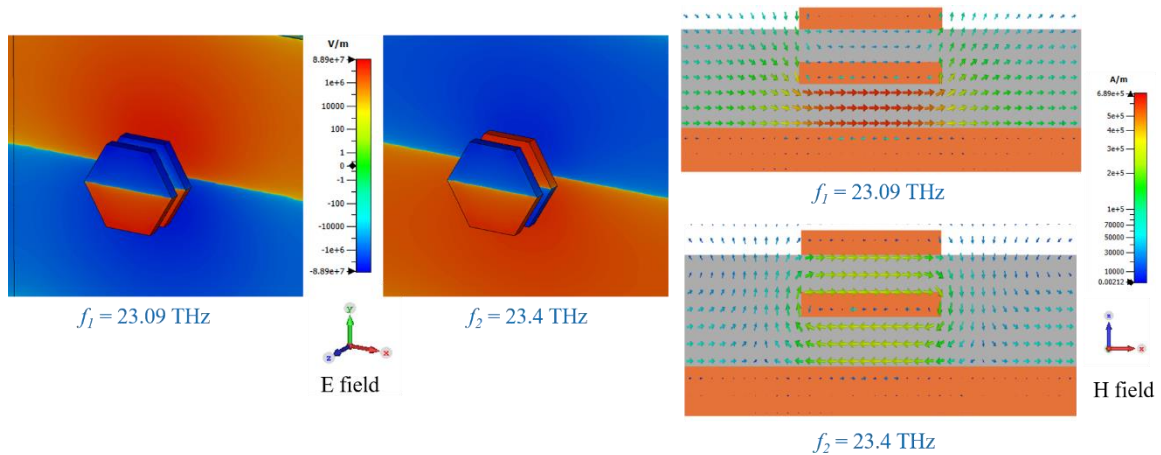
Để làm rõ cơ chế hấp thụ, phân bố từ trường và điện trường của MA với $t_d = 0.2 \mu\text{m}$ tại tần số 23.08 và 23.61 THz được mô phỏng và trình bày trong hình 4.21. Kết quả cho thấy tại tần số 23.08 THz, dòng điện bề mặt 2 lớp kim loại chạy ngược chiều, cho thấy đặc trưng cộng hưởng từ. Điều này phù hợp với phân bố từ trường tại tần số này, từ trường tập trung mạnh tại vị trí giữa 2 lớp kim loại và tạo thành các đường thẳng song song. Tại tần số cộng hưởng 23.61 THz dòng điện bề mặt trên 2 lớp kim loại chạy song song cùng chiều, cho thấy đặc trưng của cộng hưởng điện. Vậy, có thể thấy rằng, đối với cấu trúc MA đơn lớp với độ dày điện môi $t_d = 0.2 \mu\text{m}$, đỉnh hấp thụ tại tần số 23.08 THz do cộng hưởng từ gây ra, đỉnh hấp thụ tại tần số 23.61 THz do cộng hưởng điện gây ra.



Hình 4.21. Phân bố từ trường và điện trường của MA tại các tần số 23.08 và 23.61 THz

Phân bố từ trường và điện trường của MMA tại tần số 23.09 và 23.04 THz cũng được khảo sát và nghiên cứu, như được thể hiện trong hình 4.22. Dựa trên phân bố điện

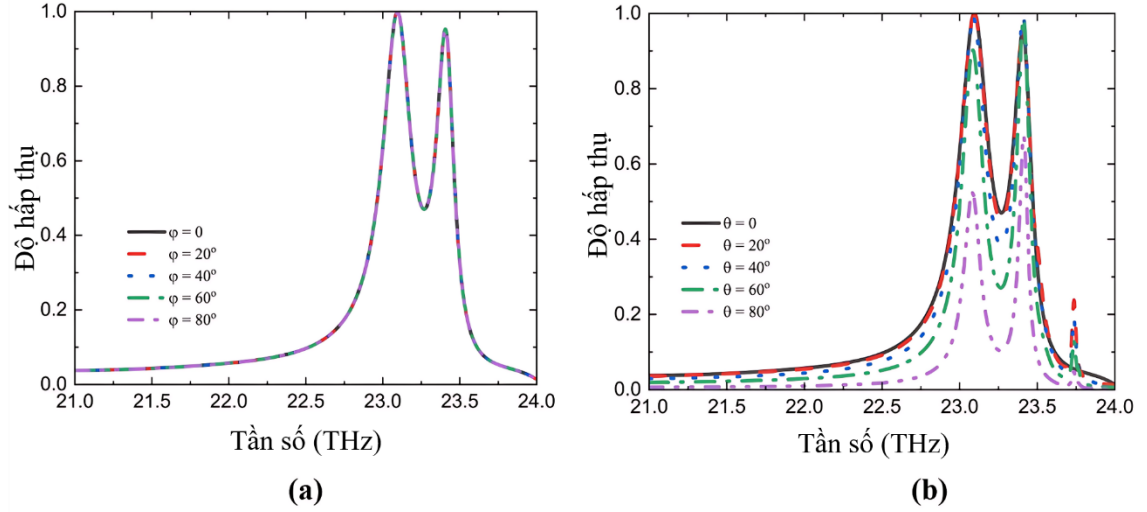
trường tại tần số 23.09 THz, có thể thấy dòng điện bề mặt 2 lớp kim loại trên cùng chạy song song cùng chiều, đặc trưng của cộng hưởng điện. Đối với 2 lớp kim loại dưới cùng, phân bố điện trường cho thấy dòng điện bề mặt chạy song song ngược chiều, đặc trưng của cộng hưởng từ. Điều này cho thấy sự phù hợp giữa phân bố điện trường và từ trường. Tại tần số 23.4 THz cho thấy, dòng điện bề mặt giữa 2 lớp phía trên chạy song song ngược chiều, điều này cũng quan sát được 2 lớp phía dưới. Kết quả này chỉ ra rằng cộng hưởng từ xảy ra giữa các lớp phía trên và các lớp phía dưới. Phân bố từ trường tại tần số 23.4 THz, từ trường tập trung với cường độ mạnh tại vị trí tương ứng với các lớp kim loại và phân bố thành các đường thẳng song song, cho thấy đặc trưng của cộng hưởng từ.



Hình 4.22. Phân bố từ trường của MMA tại các tần số 23.09 và 23.4 THz

Phân bố từ trường và điện trường của MMA tại đỉnh hấp thụ thứ 2, tương ứng với tần số 23.4 được thể hiện trong hình 4.22. Phân bố từ trường cho thấy, từ trường chạy song song, có cường độ mạnh giữa các lớp, cho thấy cộng hưởng từ giữa các lớp. Ngoài ra, có thể thấy từ trường chạy xung quanh lớp kim loại ở giữa. Phân bố điện trường tại tần số này cũng được khảo sát, tuy nhiên điện trường có cường độ yếu, thể hiện sự đóng góp không nhiều đến khả năng hấp thụ.

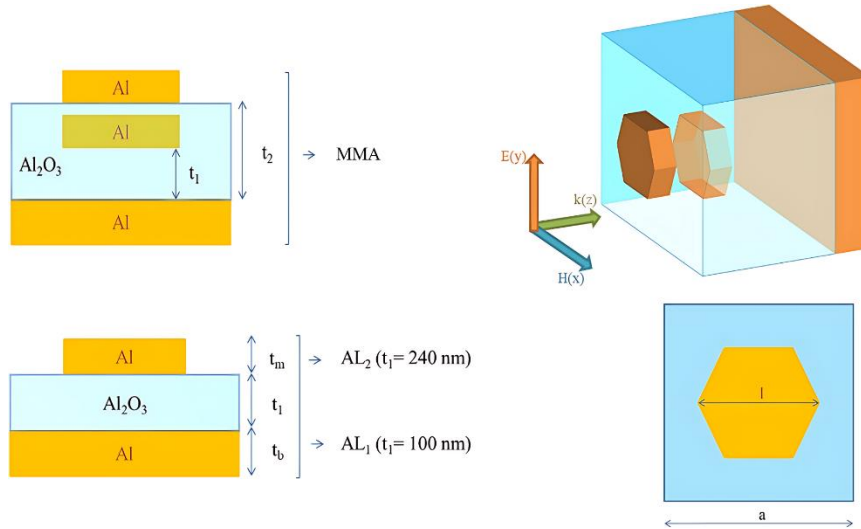
Hình 4.23 trình bày phổ hấp thụ của MMA với các góc phân cực sóng điện từ và các góc tới khác nhau. Trong đó, do được thiết kế đối xứng, do đó cấu trúc MMA không nhạy với góc phân cực, như thể hiện trong hình 4.23 (a). Độ hấp thụ của MMA gần như không thay đổi khi góc phân cực sóng điện từ thay đổi. Ảnh hưởng của góc tới đến khả năng hấp thụ của MMA cũng được khảo sát và thể hiện trong hình 4.23 (b). Cấu trúc MMA có khả năng duy trì độ hấp thụ lớn với các góc tới khác nhau. Cấu trúc duy trì khả năng hấp thụ ổn định với góc tới θ từ 60° trở xuống. Khi θ đạt giá trị 80° độ hấp thụ của cấu trúc giảm xuống dưới 70%.



Hình 4.23. Phổ hấp thụ của MMA với (a) các góc phân cực sóng điện từ và (b) góc tới khác nhau

4.3. Ứng dụng MMA trong phát xạ hồng ngoại

Một cấu trúc ô cơ sở của MMA hấp thụ băng thông rộng ứng dụng trong bộ phát xạ hồng ngoại đã được đề xuất như thể hiện trong hình 4.24. Ô cơ sở của MMA được đề xuất có kích thước a và gồm hai lớp. Ở trên cùng là cấu trúc cộng hưởng đầu tiên được làm bằng kim loại hình lục giác có độ dày t_m và kích thước l . Lớp cộng hưởng thứ hai có cùng kích thước và nằm bên trong lớp điện môi có độ dày t_2 . Khoảng cách từ lớp cộng hưởng thứ hai đến lớp dưới cùng là t_1 . Ở dưới cùng là lớp kim loại liên tục có độ dày t_b .

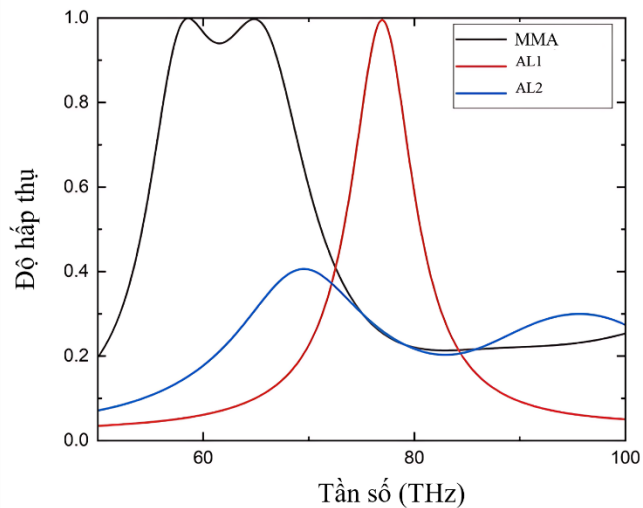


Hình 4.24. Mô phỏng cấu trúc ô cơ sở của MA hình lục giác đơn lớp (phía dưới) và MA nhiều lớp (phía trên) hoạt động trong vùng tần số THz.

Các thông số cấu trúc của ô đơn vị được tối ưu với các giá trị $a = 1500$ nm, $t_b = 200$ nm, $t_1 = 100$ nm, $t_m = 100$ nm, $t_2 = 240$ nm, $l = 300$ nm. Trong nghiên cứu này, hai cấu trúc cộng hưởng và lớp kim loại liên tục trên bề mặt dưới cùng được làm từ Al, chất

điện môi được sử dụng là Al_2O_3 . Các cấu trúc MA đơn lớp (kim loại-điện môi-kim loại), với lớp Al trên cùng là cấu trúc hình lục giác đơn, cũng được nghiên cứu đối với các độ dày điện môi khác nhau, $t_1 = 100$ nm (ký hiệu là AL1) và $t_2 = 240$ nm (ký hiệu là AL2).

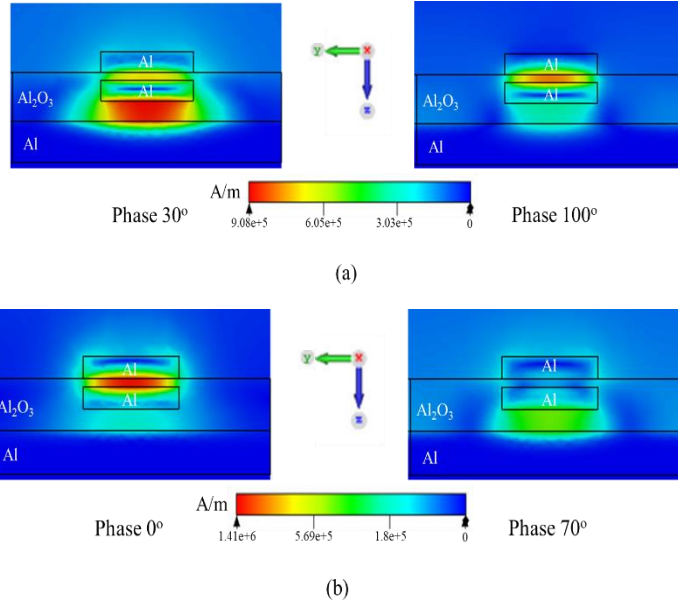
Hình 4.25 trình bày phổ hấp thụ của MMA đề xuất và MA đơn hình lục giác. Kết quả cho thấy cấu trúc AL1 ($t_1 = 100$ nm) và AL2 ($t_1 = 240$ nm) có hai đỉnh hấp thụ ở 41.3 THz và 69.5 THz với độ hấp thụ lần lượt là 94% và 40%. Cấu trúc AL1 + AL2 cho kết quả mô phỏng phổ hấp thụ tốt hơn với độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số 56.9 – 67.9 THz. Nó có hai đỉnh hấp thụ cực đại ở tần số 58.6 THz và 64.8 THz với độ hấp thụ là 99%. Từ phổ hấp thụ, chúng tôi dự đoán rằng cấu trúc kim loại Al có một số đóng góp nhất định trong việc hình thành phổ hấp thụ băng thông rộng cho cấu trúc vật liệu biến hoá đa lớp. Sự hình thành hấp thụ băng thông rộng có thể là do tương tác giữa các lớp kim loại trong cấu trúc. Do đó, sự phân bố của từ trường trên MA đa lớp đề xuất tiếp tục được nghiên cứu.



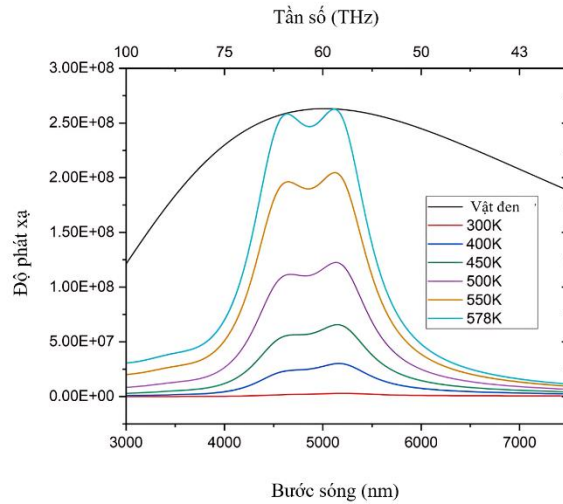
Hình 4.25. Phổ hấp thụ của MA lục giác đơn lớp có độ dày khác nhau và MMA.

Để hiểu được nguồn gốc của hai đỉnh hấp thụ của MMA, sự phân bố từ trường ở tần số hấp thụ 58.6 và 64.8 THz đã được nghiên cứu và kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 4.26. Kết quả cho thấy cộng hưởng từ đã xuất hiện giữa các lớp kim loại cộng hưởng và tấm kim loại liên tục bên dưới, đây là nguyên nhân gây ra các đỉnh hấp thụ. Tuy nhiên, cộng hưởng của từng cặp lớp xảy ra ở các pha khác nhau. Trong hình 4.26 (a), ở pha 30° , cộng hưởng từ xuất hiện giữa lớp cộng hưởng giữa và tấm kim loại dưới cùng và xuất hiện giữa hai lớp cộng hưởng lục giác phía trên ở pha 100° ở tần số 58.6 THz. Một sự lệch pha tương tự ở 64.8 THz được thể hiện trong Hình 4.26 (b). Hiện tượng này có thể được giải thích bằng cấu trúc nhiều lớp của vật liệu biến hoá được đề

xuất. Do sóng tới được truyền theo hướng z nên khi đi qua và tương tác với từng lớp kim loại, có sự chậm pha theo hướng z, dẫn đến độ lệch pha của cộng hưởng từ trong từng cặp lớp. Điều đáng chú ý là MMA được đề xuất cho thấy hai đỉnh hấp thụ với dải hấp thụ rộng trong vùng hồng ngoại (56.9 – 67.9 THz), điều này làm cho MA này có khả năng hữu ích trong việc tăng cường hiệu quả của bộ phát hồng ngoại.



Hình 4.26. Phân bố từ trường ở tần số hấp thụ 58.6(a) và 64.8 THz(b)



Hình 4.27. So sánh cường độ phát xạ của MA với các nhiệt độ khác nhau với cường độ phát xạ của vật đen tuyệt đối

Cường độ phát xạ của cấu trúc MA ở các nhiệt độ khác nhau được tính toán và kết quả được trình bày như trong Hình 4.27. Có thể quan sát thấy cường độ phát xạ của tấm MMA tăng khi nhiệt độ tăng. Ở nhiệt độ 300 K, cường độ phát xạ gần như bằng không. Khi nhiệt độ tăng đến 400 K, cường độ phát xạ bắt đầu tăng và xuất hiện dải phát

xạ rộng hơn. Tiếp tục tăng nhiệt độ, cường độ phát xạ tăng dần và vị trí của các đỉnh phát xạ không thay đổi. Khi $T = 578\text{ K}$, cường độ phát xạ ở hai bước sóng 4632 nm và 5115 nm tăng lên các giá trị tương ứng với vật đen.

Dải tần số/ Đỉnh hấp thụ (với độ hấp thụ >90%)	FBW (%)	Vật liệu và số lớp vật liệu	Độ dày mẫu	Tài liệu tham khảo
5.16-8.41 (THz)	47.89%	VO ₂ , Al ₂ O ₃ , Vàng; 2 lớp	3.8 μm	Nghiên cứu này
22.72 - 23.13 (THz)	1.78%	Vàng, SiC; 2 lớp	0.9 μm	
9.42 - 11.89 (THz)	23.18%	Vàng, Silicon, Graphene; 1 lớp	1.5 μm	[128]
0.745–0.775 2.3–5.63 (THz)	4% 84%	Graphene, điện môi COC, VO ₂ , Vàng; 2 lớp	50-60 μm	[129]
6.57 - 9.92 (THz)	40.6%	VO ₂ , MF ₂ , Vàng; 1 lớp	6.22 μm	[123]
3.26 – 6.91 (THz)	71.6%	VO ₂ , Topas, Graphene, SiO ₂ , Vàng; 2 lớp	10.5 μm	[130]

Bảng 4.1. So sánh cấu trúc MMA được đề xuất với một số MA, MMA trong vùng tần số THz trong một số nghiên cứu khác

Một số cấu trúc MA và MMA trong một số nghiên cứu khác được so sánh với cấu trúc MMA đề xuất và được thể hiện trong bảng 4.1. Với độ dày tối ưu, cấu trúc cho bằng thông hấp thụ rộng với độ hấp thụ lớn hơn 90%, FBW đạt 47.89%. Các cấu trúc có FBW cao hơn thường có độ dày tổng thể lớn hơn cấu trúc được đề xuất. Với những cấu trúc có độ dày nhỏ hơn, FBW đạt giá trị thấp hơn so với cấu trúc được đề xuất.

4.4. Kết luận chương 4

Đã làm rõ sự tương tác giữa các lớp thông qua nghiên cứu MMA có tổn hao Ohmic lớn và nhỏ, sự ảnh hưởng của tổn hao điện môi đến MMA hoạt động trong vùng tần số THz:

- Đã thiết kế, mô phỏng các tính chất điện từ của MMA có độ tổn hao Ohmic lớn dựa trên vật liệu VO₂ - Al₂O₃. Khi độ dẫn VO₂ đạt giá trị 17500 S/m, MMA duy trì được hấp thụ băng thông rộng với FBW là 47.89%, độ hấp thụ duy trì lớn hơn 90% trong khoảng 5.16-8.41 THz

- Đã thiết kế, mô phỏng các tính chất điện từ của MMA có độ tổn hao Ohmic nhỏ dựa trên vật liệu $\text{VO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ với độ dẫn VO_2 là $\sigma = 25000 \text{ S/m}$.

- Đã thiết kế, mô phỏng các tính chất điện từ của MMA có độ tổn hao điện môi lớn và nhỏ dựa trên vật liệu Au - SiC. Với độ tổn hao điện môi lớn, MMA cho 2 đỉnh hấp thụ cực đại tại tần số 22.84 và 23.06 THz với độ hấp thụ tương ứng là 98.77% và 95.62%. MMA cũng cho băng thông hấp thụ lớn hơn 90% với FBW đạt giá trị 1.78%. Với độ tổn hao điện môi nhỏ, Cấu trúc MMA có 2 đỉnh hấp thụ dải hẹp tại tần số 23.09 và 23.4 THz với độ hấp thụ đạt giá trị lần lượt là 99.96% và 95.21%

CHƯƠNG 5. NGHIÊN CỨU VẬT LIỆU BIẾN HOÁ CÓ CẤU TRÚC ĐA LỚP ĐA CHỨC NĂNG

5.1. Nghiên cứu vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp đa chức năng hoạt động tại vùng tần số GHz

Vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp đa chức năng hoạt động ở vùng tần số GHz đại diện cho một hướng đi mới và tiên tiến trong lĩnh vực vật liệu nhân tạo. Những vật liệu này gồm nhiều lớp cấu trúc cộng hưởng nhân tạo, cho phép kiểm soát và điều chỉnh linh hoạt các đặc tính điện từ của vật liệu.

Hiệu ứng EIT cho phép vật liệu trở nên “trong suốt” với sóng điện từ tại một dải tần xác định nhờ sự giao thoa triệt tiêu, giảm mạnh hấp thụ và tăng khả năng truyền qua. Ngược lại, hiệu ứng EIA tăng cường mạnh hấp thụ năng lượng sóng điện từ tại cùng vùng tần số. Bằng cách thiết kế đa lớp và tích hợp các yếu tố điều khiển (như điện áp ngoài, trường từ, nhiệt độ...), vật liệu có thể chuyển đổi giữa hai trạng thái này, góp phần tối ưu hoá hiệu quả vận hành như tạo bộ lọc sóng, hấp thụ chọn lọc, điều khiển pha và biên độ sóng điện từ trong các thiết bị vi điện tử, truyền thông, radar hay quốc phòng [131-132]. Trong chương này, kích thước ô cơ sở được chọn để phù hợp với tần số hoạt động trong vùng 2-18 GHz và 1-12 THz. Việc chuyển đổi giữa EIT và EIA giúp điều khiển linh hoạt sóng điện từ, có nhiều tiềm năng ứng dụng trong thiết bị viễn thông, cảm biến, thu năng lượng...

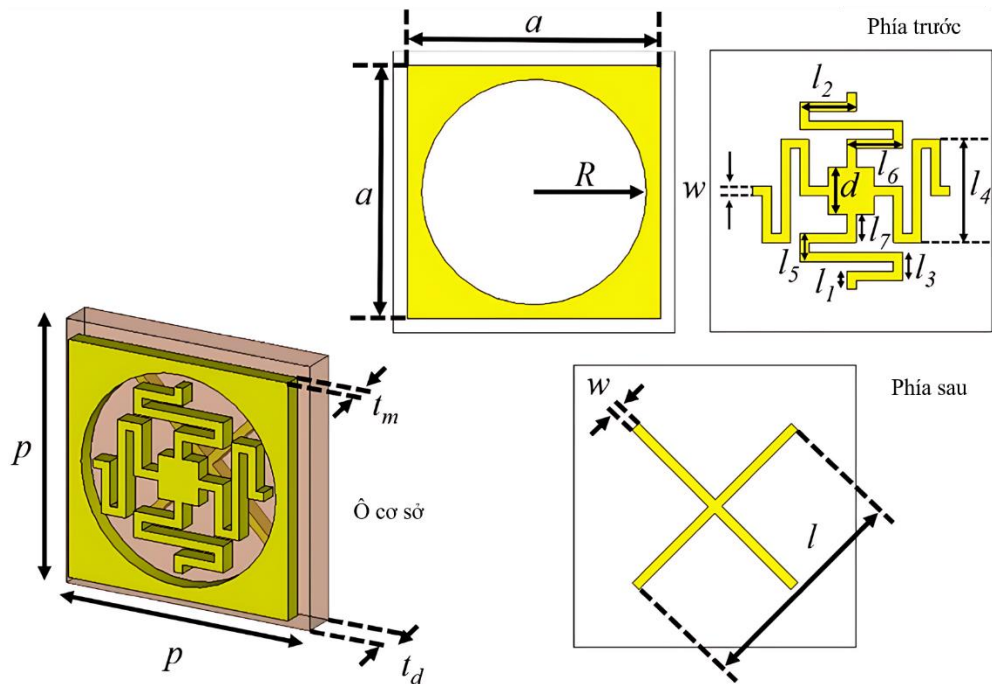
5.1.1. Thiết kế và mô phỏng cấu trúc vật liệu biến hóa có cấu trúc đa lớp đa chức năng hoạt động tại vùng tần số GHz

Trong thiết kế MMA đa chức năng, việc khai thác hiệu quả tương tác giữa các phần tử cộng hưởng đóng vai trò then chốt trong việc tạo ra các hiệu EIT và EIA. Cấu trúc đa lớp cho phép bố trí các phần tử cộng hưởng ở các vị trí khác nhau theo phương thẳng đứng, tạo ra khoảng cách vật lý giữa chúng. Khoảng cách này dẫn đến sự lệch pha trong quá trình truyền sóng, từ đó hình thành điều kiện giao thoa tăng cường giữa các cộng hưởng. Chính sự giao thoa này là cơ sở để xuất hiện các hiệu ứng EIT hoặc EIA trong MM. Ngược lại, các cấu trúc đồng phẳng đơn lớp không thể thay đổi linh hoạt khoảng cách giữa các phần tử cộng hưởng, dẫn đến sự đồng pha trong phản ứng điện từ. Điều này làm giảm đi khả năng giao thoa tăng cường, từ đó không thể kích thích hiệu ứng EIA. Để làm nền tảng nghiên cứu MM đa lớp, đa chức năng, trước tiên. Cấu trúc MM đề xuất được thể hiện trong hình 5.1 gồm 3 cấu trúc đơn lẻ là hình vuông có lỗ tròn, hình đường gấp khúc và hình chữ “X”. Hiệu ứng EIT trong MM có thể đạt được thông qua sự tương tác giữa các phần tử cộng hưởng có cùng hoặc gần nhau về tần số. Trong

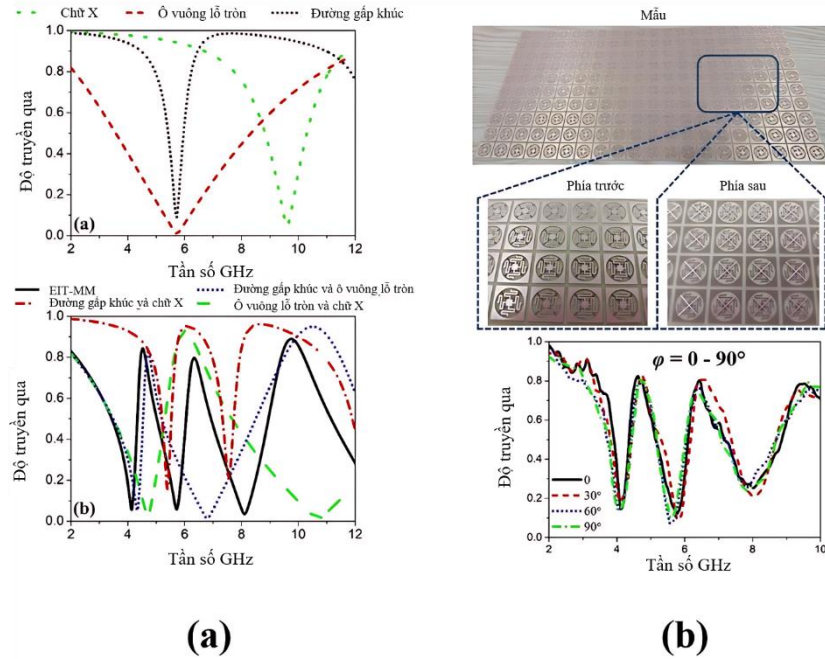
thiết kế này, cấu trúc đường gấp khúc được bố trí bên trong các lỗ tròn nhằm tạo ra hai chế độ cộng hưởng gần trùng nhau. Để đảm bảo hai cộng hưởng có tần số tương đương, cấu trúc đường gấp khúc được thiết kế để kéo dài quãng đường truyền của dòng điện và làm tăng độ tự cảm (L) của hệ. Việc điều chỉnh L đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát tần số cộng hưởng, cho phép tối ưu hóa sự giao thoa giữa các chế độ cộng hưởng và hình thành “cửa sổ truyền qua” đặc trưng của hiệu ứng EIT. Các thông số cấu trúc được thể hiện qua bảng 5.1.

Thông số	p	t_d	t_m	a	R
Giá trị (mm)	15	0.4	0.035	13.5	6
Thông số	d	l_1	l_2	l_3	l_4
Giá trị (mm)	2.5	1.5	3	1.5	7
Thông số	l_5	l_6	l_7	w	l
Giá trị (mm)	1.5	3	1	0.5	12

Bảng 5.1. Thông số cấu trúc EIT-MM hoạt động tại vùng GHz



Hình 5.1. Sơ đồ thiết kế ô cơ sở của EIT-MM hoạt động tại vùng tần số GHz



Hình 5.2. (a) Phổ truyền qua của các cấu trúc hình vuông lỗ tròn, đường uốn khúc và đường chéo riêng lẻ; Phổ truyền của EIT-MM được đề xuất và các cấu trúc kết hợp của từng cấu trúc riêng lẻ. (b) Mẫu EIT-MM chế tạo được và kết quả thực nghiệm

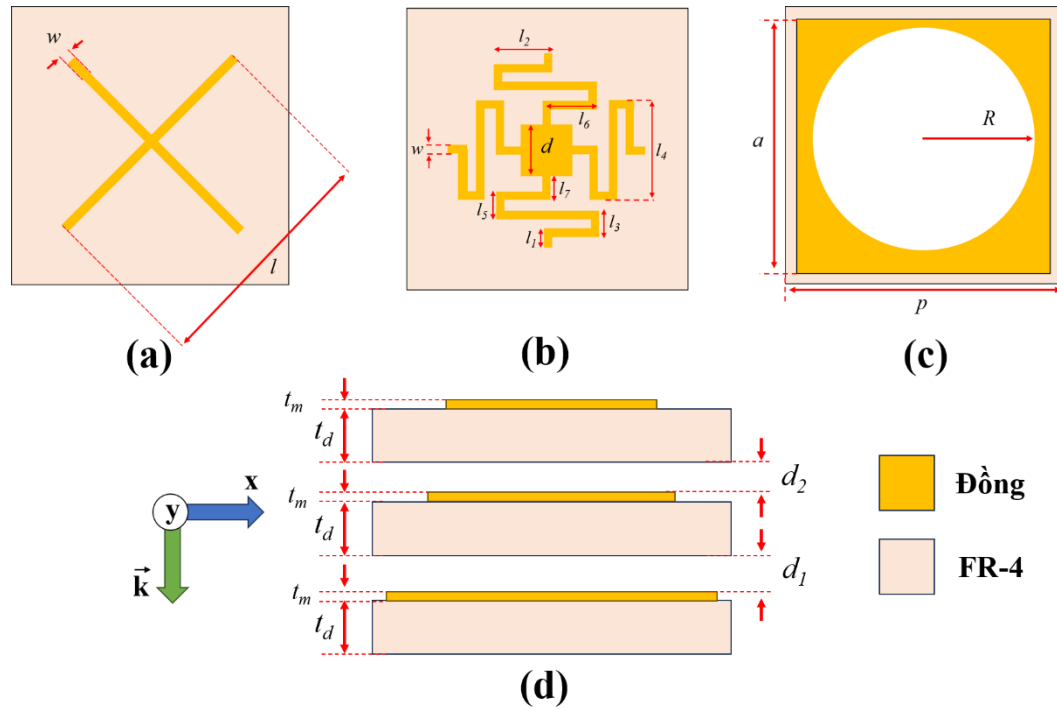
Hình 5.2 biểu diễn phổ truyền qua của các cấu trúc thành phần, các cặp cấu trúc thành phần và EIT-MM. Do tần số cộng hưởng của hình vuông lỗ tròn và đường gấp khúc gần nhau, sự tương tác giữa chúng mạnh, tạo ra một vùng truyền sóng trong suốt hẹp ở khoảng 4.7 GHz, tạo thành một đỉnh EIT đơn. Khi kết hợp hình vuông lỗ tròn với hình chữ “X”, vùng truyền sóng rộng hơn, cho thấy sự tương tác yếu hơn giữa hai cộng hưởng tử này. Trong khi đó, sự tương tác giữa đường gấp khúc và hình chữ “X” mạnh hơn nên vùng truyền sóng lại hẹp hơn. Đáng chú ý, cấu trúc kết hợp giữa hình vuông lỗ tròn và đường gấp khúc tạo ra một đỉnh EIT đơn hẹp, nằm trong vùng EIT. Các đỉnh truyền qua của các cấu trúc này cũng gần với hai đỉnh truyền qua chính của vật liệu đề xuất. Sự tương tác giữa đường gấp khúc với hình vuông lỗ tròn và giữa đường gấp khúc với hình chữ “X” là yếu tố then chốt tạo nên hiệu ứng EIT trong MM được đề xuất. Kết quả thực nghiệm EIT-MM cũng được trình bày trong hình 5.2 b cho thấy sự phù hợp mô phỏng và thực nghiệm.

Xuất phát từ cấu trúc EIT-MM, cấu trúc MMA đa chức năng, chuyển đổi giữa EIT và EIA được thiết gồm 3 lớp cấu trúc MA đơn lẻ khác nhau, như được thể hiện trong hình 5.3, với điện môi là FR-4. Trong đó, hình 5.3 (a) là cấu trúc của lớp phía trên cùng của MMA, bao gồm lớp cộng hưởng là 2 thanh đồng cắt nhau qua tâm của ô cơ sở tạo thành hình chữ “X” đối xứng. Cấu trúc ở giữa có lớp cộng hưởng gồm các thanh đồng

uốn khúc như thể hiện trong hình 5.3 (b) và và dưới cùng là cấu trúc có lớp cộng hưởng hình vuông khoét lỗ tròn như trong hình 5.3 (c). Thông số cấu trúc được thể hiện trong bảng 5.2.

Thông số	p	t_d	t_m	a	R	d_1
Giá trị (mm)	15	0.4	0.035	13.5	6	2
Thông số	d_2	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
Giá trị (mm)	0	1.5	3	1.5	7	1.5
Thông số	l_6	l_7	w	l		
Giá trị (mm)	3	1	0.5	12		

Bảng 5.2. Thông số cấu trúc MMA đa chức năng chuyển đổi EIT và EIA hoạt động tại vùng GHz

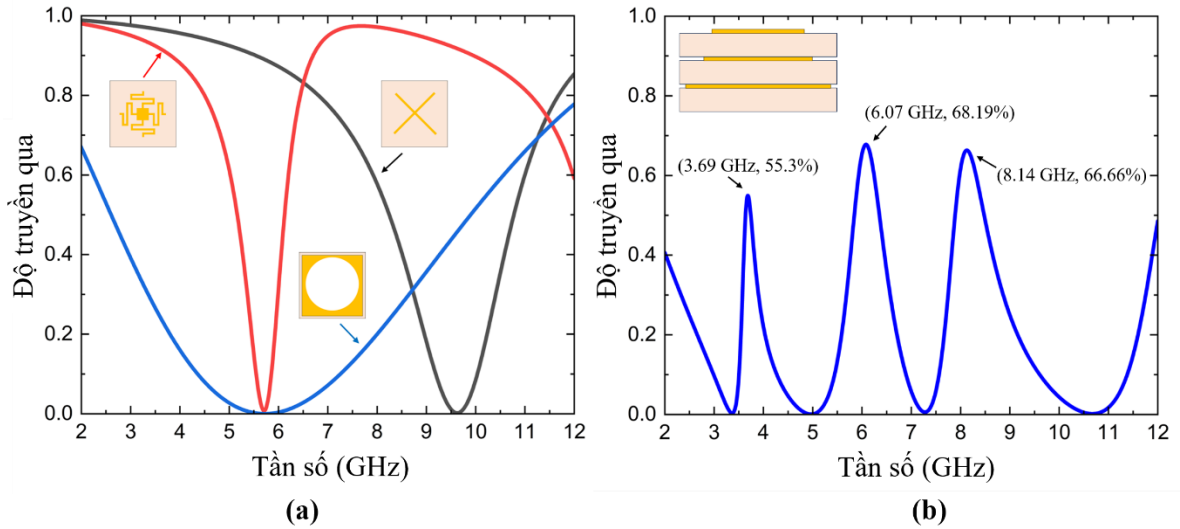


Hình 5.3. Sơ đồ thiết kế cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số GHz với (a) lớp phía trên cùng, (b) lớp ở giữa, (c) lớp dưới cùng và (d) tổng thể cấu trúc

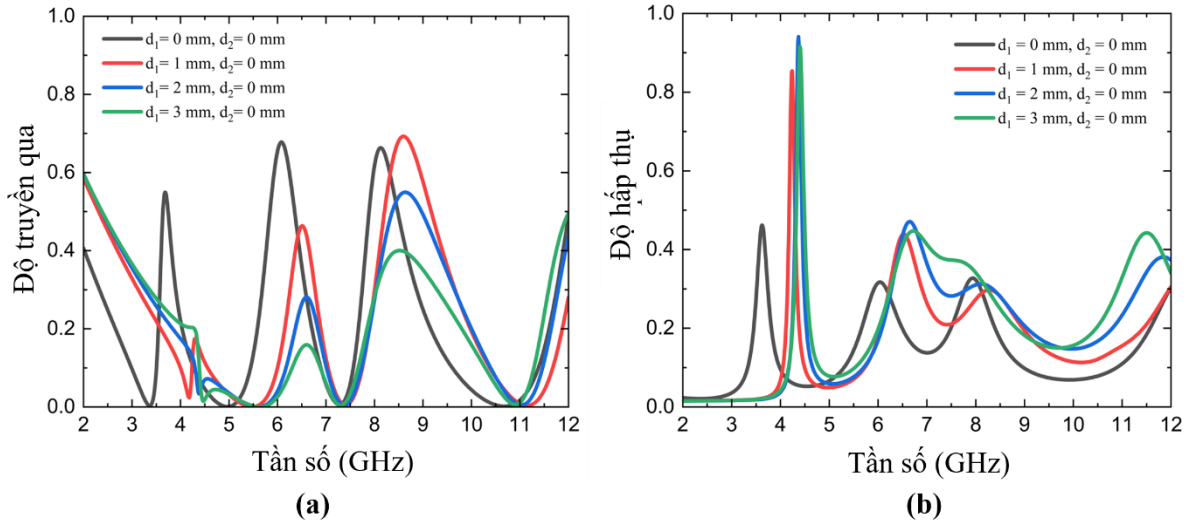
5.1.2. Kết quả mô phỏng cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số GHz

Hình 5.4 (a) biểu diễn phổ truyền qua của các cấu trúc MA đơn lớp. Có thể thấy rằng, với cấu trúc MA hình chữ “X” tương ứng với lớp trên cùng của cấu trúc MMA, tần số cộng hưởng là 9.61 GHz. Hai cấu trúc MA còn lại gồm cấu trúc các thanh đồng uốn khúc – tương ứng với lớp ở giữa của cấu trúc MMA và cấu trúc cộng hưởng hình vuông khoét lỗ tròn – tương ứng lớp dưới cùng của MMA có tần số cộng hưởng thấp hơn tại 5.7 GHz. Phổ truyền qua khi kết hợp cả 3 cấu trúc MA đơn lẻ tạo thành cấu trúc MMA

được trình bày trong hình 5.4 (b). Quan sát hình ta thấy, cấu trúc MMA cho 03 đỉnh truyền qua tại các tần số 3.69, 6.07 và 8.14 GHz tương ứng với độ truyền qua đạt 55.3%, 68.19% và 66.66%. Từ đó cho thấy, khi kết hợp 03 cấu trúc đơn lẻ trên, hiệu ứng EIT đã xảy ra trong cấu trúc MMA.



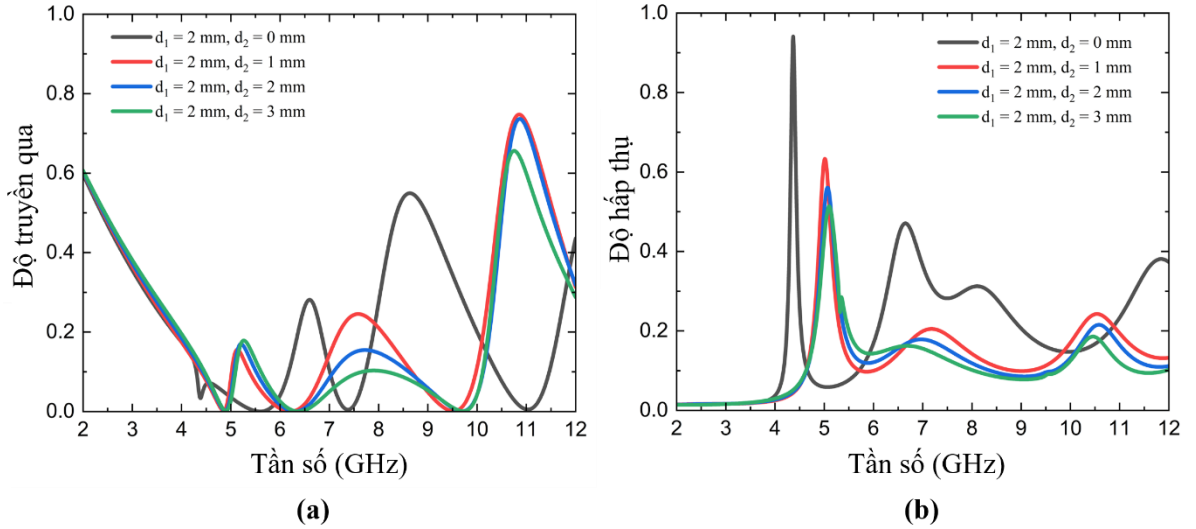
Hình 5.4. Phổ truyền qua của các cấu trúc (a) MA và (b) MMA với $d_1 = d_2 = 0$



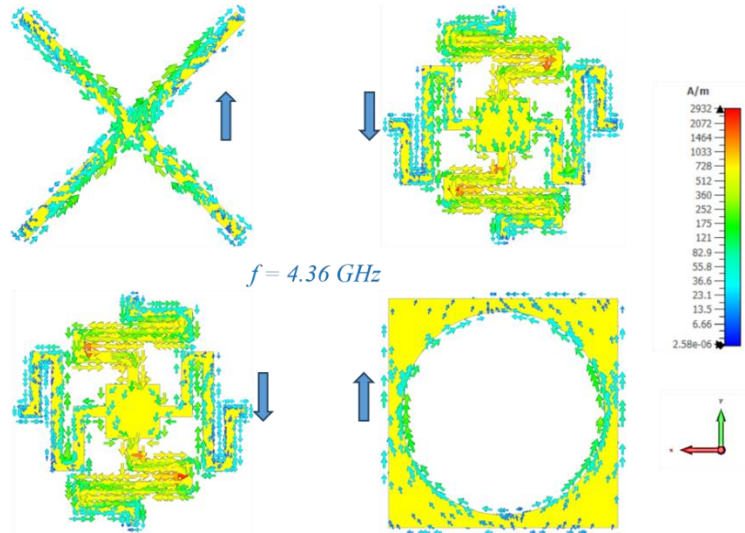
Hình 5.5. Phổ truyền qua (a) và phổ hấp thụ (b) của các cấu trúc MMA với $d_2 = 0$ mm và d_1 thay đổi

Khả năng chuyển đổi từ hiệu ứng EIT sang EIA trong MM phụ thuộc vào nhiều yếu tố liên quan đến cấu trúc vi mô, tính chất vật liệu, cũng như các tham số điều khiển bên ngoài. Trong đó, có thể thay đổi khoảng cách và sự ghép giữa các cộng hưởng (resonator coupling). Khoảng cách và cách các cộng hưởng được bố trí và ghép nối trong cấu trúc vi mô tác động mạnh đến hiệu ứng EIT/EIA. Nếu tăng giảm khoảng cách giữa các cộng hưởng sáng (bright resonator) và tối (dark resonator), có thể chuyển từ giao thoa triệt tiêu (EIT) sang cộng hưởng tăng cường (EIA) [107]. Hình 5.5 là phổ truyền

qua và hấp thụ của cấu trúc MMA khi thay đổi khoảng cách d_1 giữa 2 lớp phía trên và lớp dưới cùng. Có thể thấy rằng, khi tăng dần giá trị d_1 các đỉnh truyền qua giảm dần độ truyền qua, đồng thời các đỉnh truyền qua có sự dịch chuyển nhỏ về phía tần số cao, như trong hình 5.5 (a). Ngược lại, khi quan sát phổ hấp thụ của cấu trúc MMA trong hình 5.5 (b), khi giá trị d_1 tăng, đỉnh hấp thụ đầu tiên của của cấu trúc MMA tăng dần. Khi $d_1 = 2$ mm, phổ hấp thụ đạt giá trị cực đại 94.36% tại tần số 4.36 GHz, sau đó độ hấp thụ giảm xuống khi $d_1 = 3$ mm.



Hình 5.6. Phổ truyền qua (a) và phổ hấp thụ (b) của các cấu trúc MMA với $d_1 = 2$ mm và d_2 thay đổi

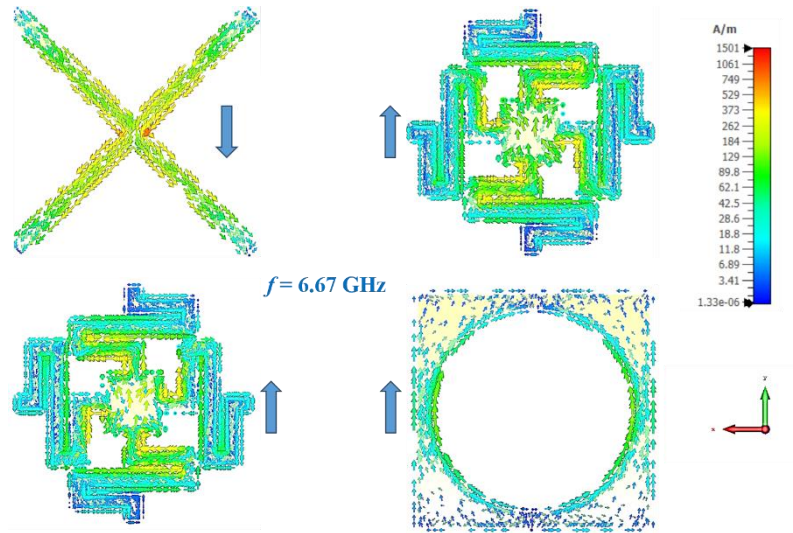


Hình 5.7. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA với $d_1 = 2$ mm và $d_2 = 0$ tại tần số 4.36 GHz ở chế độ EIA

Hình 5.6 trình bày phổ truyền qua và phổ hấp thụ của cấu trúc MMA với d_2 thay đổi và $d_1 = 2$ mm. Khi $d_2 = 0$, đỉnh truyền qua tại khoảng tần số 4.36 GHz biến mất (như thể hiện trong hình 5.5), khi tăng dần giá trị d_2 , đỉnh truyền qua đầu tiên tăng dần về

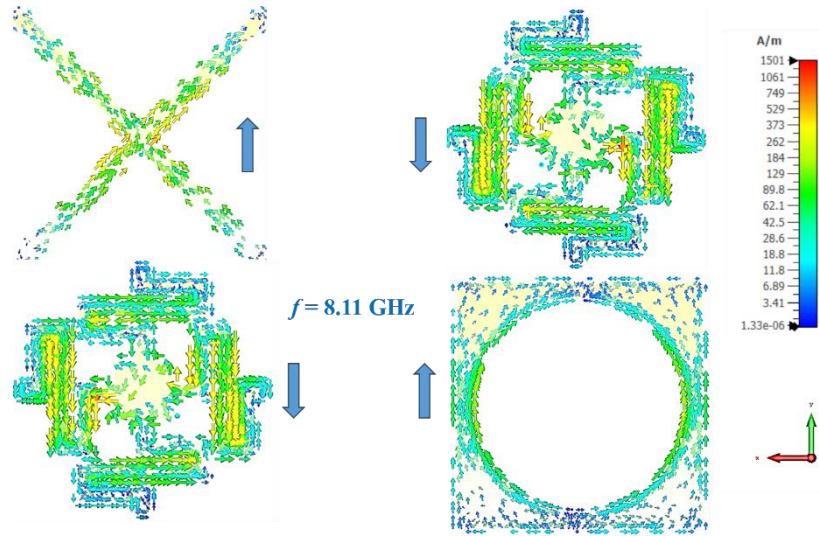
cường độ như thể hiện trong hình 5.6 (a). Đồng thời, quan sát phổ hấp thụ tại hình 5.6 (b), khi tăng dần giá trị d_2 , đỉnh hấp thụ tại tần số cộng hưởng đầu tiên giảm dần, cho thấy sự chuyển đổi từ hiệu ứng EIA sang EIT khi tăng dần d_2 .

Để tìm hiểu cơ chế hấp thụ của cấu trúc MMA có $d_1 = 2$ mm và $d_2 = 0$ tại tần số 4.36 GHz, phân bố dòng điện bề mặt đã được khảo sát như hình 5.7. Khi quan sát dòng điện bề mặt 2 lớp phía trên của cấu trúc MMA, trên bề mặt kim loại lớp cộng hưởng chữ “X” trên cùng, dòng điện bề mặt có xu hướng di chuyển lên phía trên. Ngược lại, dòng điện bề mặt phía trên của lớp cộng hưởng hình gấp khúc ở giữa có xu hướng di chuyển xuống phía dưới. Có thể thấy, dòng điện bề mặt của 2 lớp phía trên di chuyển ngược chiều nhau, điều này cho thấy cộng hưởng từ xuất hiện. Điều tương tự cũng có thể quan sát với 2 lớp cộng hưởng phía dưới của cấu trúc MMA. Dòng điện bề mặt phía dưới của cấu trúc đồng gấp khúc có xu hướng di chuyển từ phía trên xuống, trong khi đó, dòng điện bề mặt của cấu trúc ô vuông khoét lỗ tròn có xu hướng di chuyển theo chiều ngược lại.



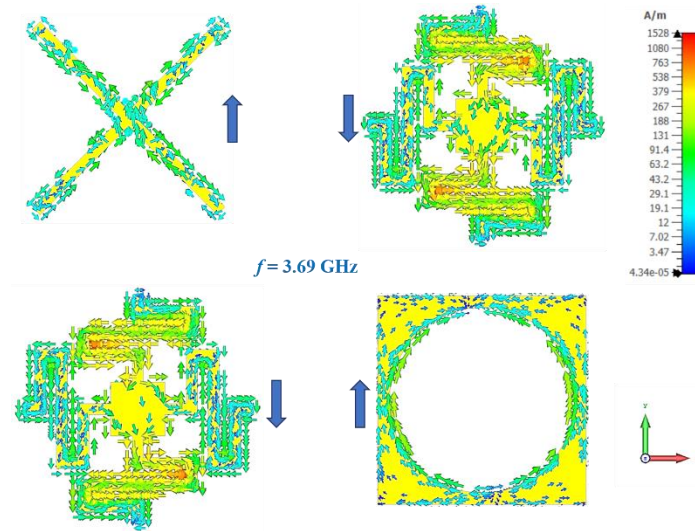
Hình 5.8. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA với $d_1 = 2$ mm và $d_2 = 0$ tại tần số 6.67 GHz ở chế độ EIA

Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA với $d_1 = 2$ mm và $d_2 = 0$ tại tần số 6.67 GHz tương ứng đỉnh hấp thụ thứ 2 được biểu diễn trong hình 5.8. Tại tần số này, 2 lớp kim loại phía trên của MMA có dòng điện đối song, cho thấy cộng hưởng từ xảy ra. Ngược lại, tại 2 lớp phía dưới, dòng điện bề mặt trên 2 lớp kim loại chạy song song cùng chiều nhau. Điều này cho thấy cộng hưởng điện xảy ra tại 2 lớp phía dưới. Tại tần số 6.67 GHz, đỉnh hấp thụ do cộng hưởng điện 2 lớp phía dưới và cộng hưởng từ 2 lớp phía trên gây ra.



Hình 5.9. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA với $d_1 = 2 \text{ mm}$ và $d_2 = 0$ tại tần số 8.11 GHz ở chế độ EIA

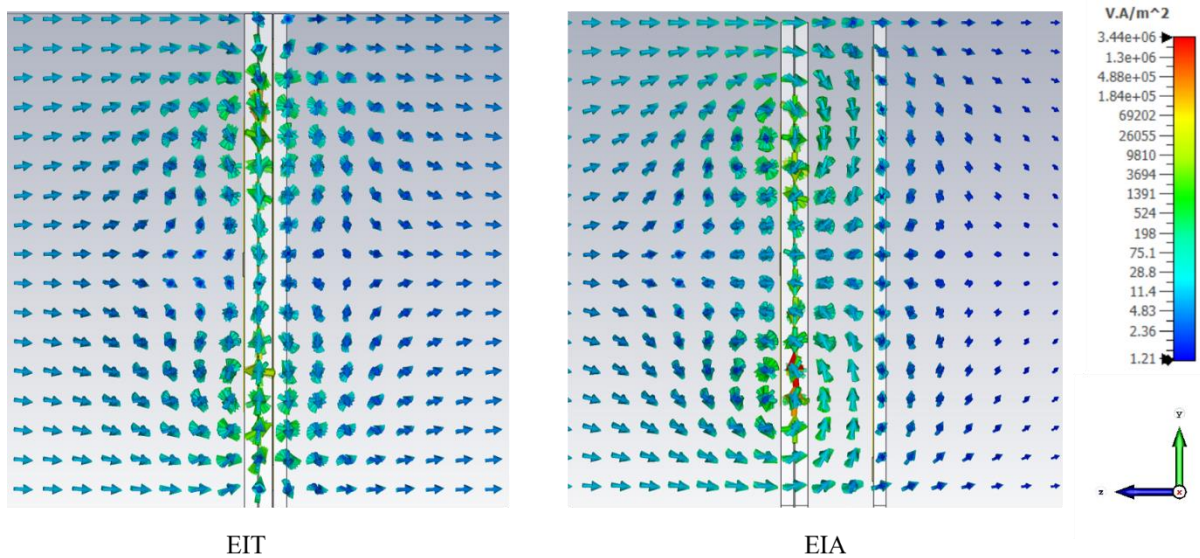
Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA với $d_1 = 2 \text{ mm}$ và $d_2 = 0$ tại tần số 8.11 GHz tương ứng đỉnh hấp thụ thứ 3 được biểu diễn trong hình 5.9. Dòng điện bề mặt trên các lớp kim loại ở 2 lớp phía trên và 2 lớp phía dưới chạy đối song nhau. Đây là đặc trưng của cộng hưởng từ. Do đó, đỉnh hấp thụ tại tần số 8.11 GHz là do cộng hưởng từ giữa các lớp trong cấu trúc MMA gây ra.



Hình 5.10. Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA với $d_1 = d_2 = 0$ tại tần số 3.69 GHz ở chế độ EIT

Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc MMA với $d_1 = d_2 = 0$ cũng được khảo sát tại tần số 3.69 GHz được biểu diễn trong hình 5.10. Tần số này tương ứng với đỉnh truyền qua đầu tiên của cấu trúc MMA. Kết quả chỉ ra rằng dòng điện bề mặt của 2 lớp phía trên chạy song song và ngược chiều nhau, cho thấy đặc trưng của cộng hưởng từ. Dòng

điện trên thanh kim loại chữ “X” được phân bố đều và chạy hướng lên phía trên, dòng điện bề mặt lớp kim loại hình gấp khúc phân bố theo chiều dọc và chạy hướng xuống phía dưới. Tương tự, đối với 2 lớp kim loại phía dưới, dòng điện bề mặt lớp gấp khúc cũng có xu hướng chạy song song ngược chiều với dòng điện bề mặt trên lớp hình vuông có lỗ tròn. Vậy, có thể thấy, tại tần số này, cộng hưởng từ đã xuất hiện giữa các lớp và đóng góp vào sự hình thành đỉnh hấp thụ. Có thể thấy rằng, đỉnh truyền qua đầu tiên, MMA – EIT có dòng điện bề mặt có cường độ nhỏ hơn. Khi thay đổi khoảng cách giữa các lớp để đạt được hiệu ứng EIA tại giá trị $d_1 = 2 \text{ mm}$ và $d_2 = 0$, cường độ dòng điện bề mặt tăng lên, dẫn đến cộng hưởng từ mạnh hơn và độ hấp thụ của cấu trúc tăng lên cực đại.

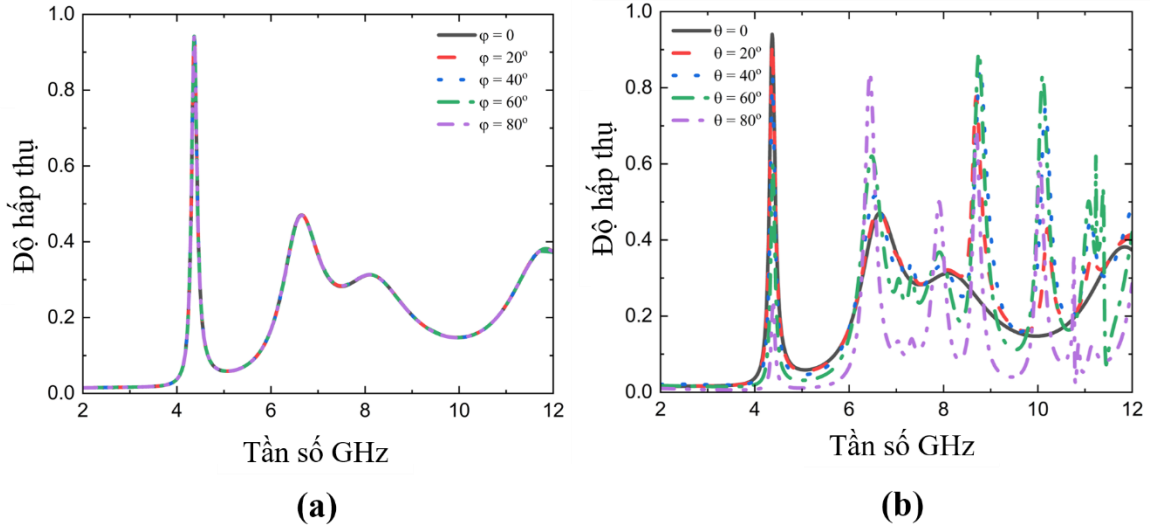


Hình 5.11. Mô phỏng sự lan truyền năng lượng qua MMA đa chức năng chuyển đổi EIT và EIA hoạt động tại vùng GHz

Hình 5.11 mô phỏng về sự lan truyền năng lượng tương ứng với hiện tượng EIT và EIA trên MMA, có thể thấy rõ ràng sự khác biệt về cơ chế điều khiển trường tại từng chế độ. Ở chế độ EIT, dòng năng lượng có cường độ mạnh và liên tục di chuyển qua MMA, biểu thị dòng năng lượng tập trung truyền qua vùng vật liệu mà không bị hấp thụ. Mật độ dòng năng lượng tại vùng trung tâm tương đối cao cho thấy năng lượng điện từ đi xuyên qua MMA với rất ít tổn hao. Các vector có hướng liên mạch phản ánh trạng thái cộng hưởng giao thoa mang tính truyền qua, đặc trưng cho hiệu ứng EIT.

Ngược lại, ở chế độ EIA, các dòng năng lượng bị phân tán, xoáy, hội tụ bên trong MMA. Mật độ năng lượng lớn xuất hiện ngay tại các rìa và dọc biên của thành phần cấu trúc cho thấy hiệu ứng hấp thụ mạnh. Dòng năng lượng sau khi đi qua MMA cho thấy

sự giảm mạnh về cường độ, khác với chế độ EIT. Điều này cho thấy MMA đã có sự chuyển đổi linh hoạt giữa EIT và EIA khi thay đổi khoảng cách giữa các lớp.

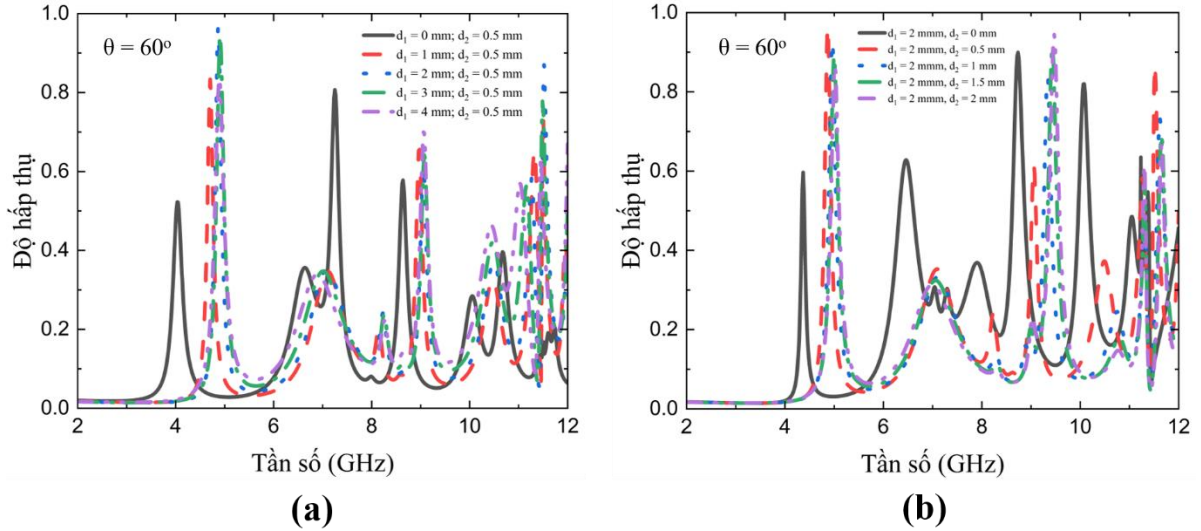


Hình 5.12. Ảnh hưởng của góc phân cực và góc tới đến phổ hấp thụ của MMA với $d_1 = 2 \text{ mm}$, $d_2 = 0$.

Sự ảnh hưởng của góc phân cực và góc tới của sóng điện từ đối với phổ hấp thụ của cấu trúc MMA được thể hiện trong hình 5.12. Phổ hấp thụ của MMA ở các góc phân cực khác nhau được thể hiện trong hình 5.12 (a). Có thể thấy rằng, độ hấp thụ của cấu trúc không thay đổi với các góc phân cực khác nhau. Điều này có được giải thích do các lớp riêng lẻ của cấu trúc được thiết kế đối xứng nhau. Ngược lại, phổ hấp thụ của cấu trúc thay đổi khi thay đổi góc tới, như được trình bày trong hình 5.12 (b). Tại tần số 4.6 GHz, đỉnh hấp thụ duy trì lớn hơn 90% với góc tới θ đạt giá trị nhỏ hơn 20° . Khi θ đạt giá trị 40° , độ hấp thụ giảm xuống dưới 90%. Giá trị độ hấp thụ giảm mạnh xuống dưới 60% và dưới 30% khi góc tới θ đạt giá trị 60° và 80° tương ứng. Có thể thấy, cấu trúc MMA không có khả năng duy trì độ hấp thụ tốt với góc tới lớn. Do khi thay đổi góc tới, tương tác giữa các dao động tử thay đổi, dẫn tới sự cộng hưởng thay đổi và làm giảm hiệu ứng giao thoa tăng cường của cấu trúc, dẫn đến cường độ hấp thụ giảm xuống.

Để làm rõ hơn sự ảnh hưởng của khoảng cách giữa các lớp đến khả năng chuyển đổi giữa EIT và EIA, phổ hấp thụ của MMA với góc tới $\theta = 60^\circ$ được khảo sát và thể hiện trong hình 5.13. Hình 5.13 (a) biểu diễn phổ hấp thụ của MMA khi khoảng cách d_1 thay đổi, $d_2 = 0.5 \text{ mm}$, kết quả cho thấy, khi tăng dần giá trị d_1 từ 0 đến 2mm, đỉnh hấp thụ đầu tiên có giá trị tăng dần. Đỉnh hấp thụ đạt giá trị cực đại với giá trị $d_1 = 2 \text{ mm}$, $d_2 = 0.5 \text{ mm}$ tại tần số 4.86 GHz, độ hấp thụ đạt 96.5%. Khi tăng thêm giá trị d_1 từ 2 đến 4 mm, đỉnh hấp thụ đầu tiên giảm dần độ hấp thụ. Phổ hấp thụ của MMA tại góc tới $\theta =$

60° với $d_1 = 2\text{mm}$, d_2 thay đổi được mô phỏng và thể hiện trong hình 5.13 (b). Kết quả cho thấy, đỉnh hấp thụ đầu tiên của MMA tại $\theta = 60^\circ$ đạt giá trị lớn nhất là 96.5% khi $d_1 = 2\text{ mm}$, $d_2 = 0.5\text{ mm}$. Khi tăng dần giá trị d_2 , đỉnh hấp thụ đầu tiên có xu hướng giảm dần về độ lớn. Kết quả cho thấy, đối với góc tới lớn, MMA vẫn có thể chuyển đổi giữa EIT và EIA đạt hiệu quả cao khi thay đổi khoảng cách giữa các lớp.

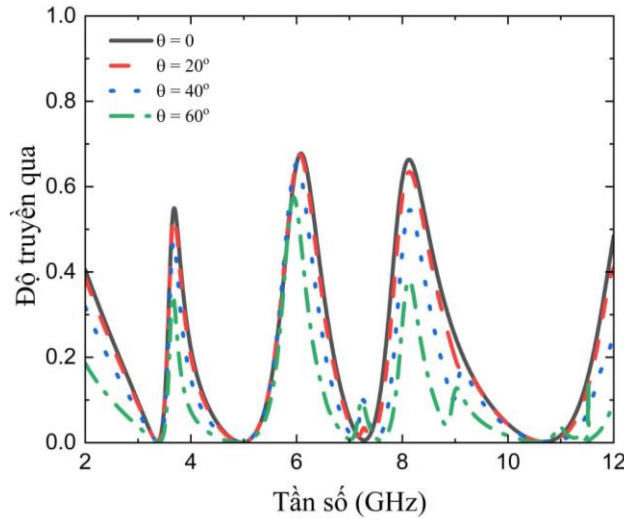


Hình 5.13. Phổ hấp thụ của MMA với góc tới $\theta = 60^\circ$, (a) d_1 thay đổi, $d_2 = 0.5\text{ mm}$; (b) $d_1 = 2\text{ mm}$, d_2 thay đổi

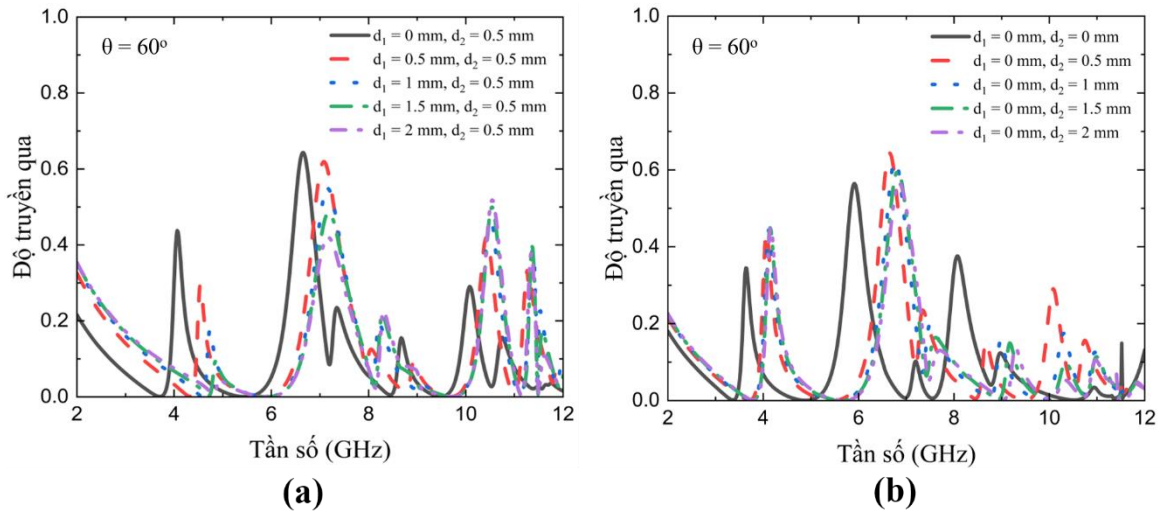
Bên cạnh đó, sự ảnh hưởng của góc tới sóng điện từ đến độ truyền qua của MMA khi $d_1 = d_2 = 0$ cũng được khảo sát và thể hiện trong hình 5.14. Kết quả cho thấy, khi tăng dần giá trị góc tới θ , độ truyền qua của cấu trúc giảm dần. Tại giá trị $\theta = 0$, các đỉnh truyền qua tại các tần số 3.69, 6.07 và 8.14 GHz tương ứng với độ truyền qua đạt 55.3%, 68.19% và 66.66%. Khi góc tới $\theta = 60^\circ$, các đỉnh truyền qua có sự dịch chuyển nhẹ về phía tần số thấp, đồng thời độ hấp thụ giảm xuống tương ứng là 34.74%, 57.51% và 38.24%. Vậy, có thể thấy rằng, thay đổi góc tới có thể ảnh hưởng đến tương tác giữa các lớp, dẫn đến độ truyền qua của MMA giảm xuống.

Phổ truyền qua của MMA tại góc tới 60° cũng được khảo sát và biểu diễn trong hình 5.15. Khi thay đổi khoảng cách d_1 và giữ khoảng cách $d_2 = 0.5\text{ mm}$, phổ truyền qua của MMA tại góc tới $\theta = 60^\circ$ thay đổi như hình 5.15 (a). Kết quả cho thấy, khi $d_1 = 0\text{ mm}$, $d_2 = 0.5\text{ mm}$, MMA 2 đỉnh truyền qua đầu tiên tương ứng với tần số 4.06 GHz và 6.65 GHz có độ truyền qua lần lượt là 43.77% ,64.33%. Khi tăng dần giá trị d_1 , hai đỉnh truyền qua của cấu trúc giảm dần về độ lớn. Sự ảnh hưởng của khoảng cách d_2 đến độ truyền qua khi $d_1 = 0\text{ mm}$ của MMA được khảo sát và thể hiện trong hình 5.15 (b). Khi tăng dần giá trị d_2 đỉnh truyền qua đầu tiên tăng dần giá trị, đỉnh truyền qua thứ 2 tăng

và đạt giá trị lớn nhất khi $d_2 = 0.5$ mm. Khi d_2 lớn hơn 0.5 mm, đỉnh truyền qua thứ 2 giảm dần độ lớn. Kết quả cho thấy, khả năng truyền qua của MMA ở góc tới lớn có thể được điều chỉnh linh hoạt bằng cách thay đổi khoảng cách giữa các lớp.



Hình 5.14. Ảnh hưởng của góc tới đến phổ truyền qua của MMA với $d_1 = d_2 = 0$



Hình 5.15. Phổ truyền qua của MMA với góc tới $\theta = 60^\circ$, (a) d_1 thay đổi, $d_2 = 0.5$ mm; (b) $d_1 = 0$ mm, d_2 thay đổi

5.2. Nghiên cứu vật liệu biến hoá có cấu trúc đa lớp đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz

5.2.1. Thiết kế và mô phỏng cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz

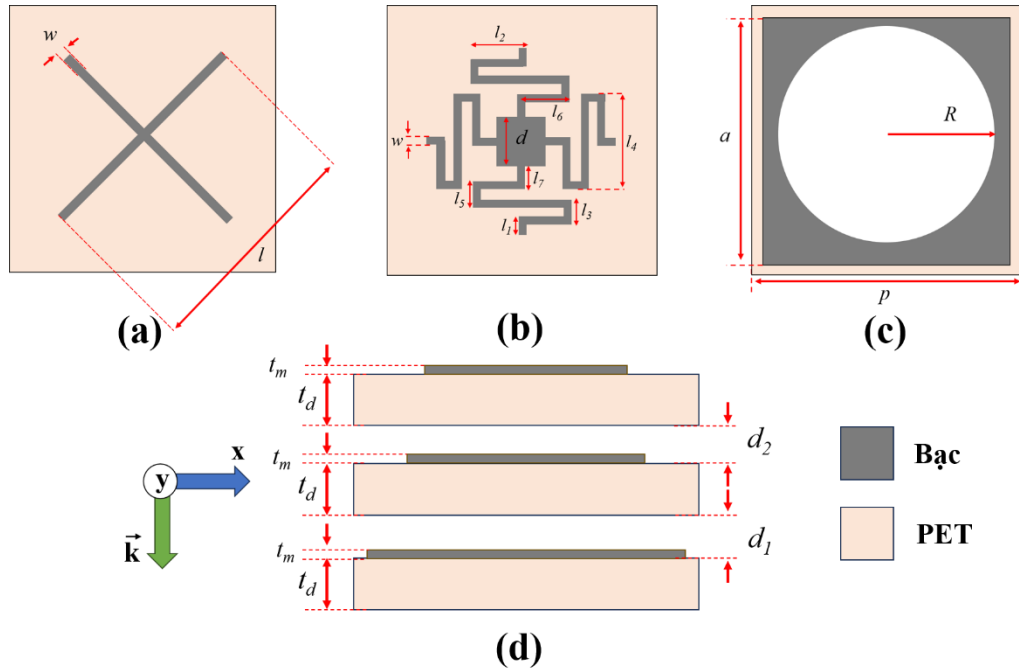
Cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng THz được thiết kế giống cấu trúc MMA hoạt động tại vùng GHz đã đề cập ở trên. Cấu trúc MMA gồm 3 lớp cấu trúc MA đơn lẻ, như được thể hiện trong hình 5.15, với điện môi là PET với hằng số điện môi $\varepsilon =$

2.7, và độ tổn hao $\tan\delta = 0.03$. Kim loại bạc được sử dụng và được định nghĩa dựa trên hàm Drude [133]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \quad (5.1)$$

Trong đó:

- ε_{∞} là hằng số điện môi ở tần số cao, có giá trị 5
- ω_p là tần số plasma, có giá trị 1.3×10^{16} rad/s
- γ là tần số va chạm, phản ánh mức độ tổn thất, với giá trị $4.35/2\pi \times 10^{12}$ s⁻¹.



Hình 5.16. Sơ đồ thiết kế cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz với (a) lớp phía trên cùng, (b) lớp ở giữa, (c) lớp dưới cùng và (d) tổng thể cấu trúc

Trong đó, hình 5.16 (a) là cấu trúc của lớp MA phía trên cùng của MMA, bao gồm lớp cộng hưởng là 2 thanh bạc cắt nhau qua tâm của ô cơ sở tạo thành hình chữ “X” đối xứng. Cấu trúc MA ở giữa có lớp cộng hưởng gồm các thanh bạc uốn khúc như thể hiện trong hình 5.16 (b) và và dưới cùng là cấu trúc MA có lớp cộng hưởng hình vuông khoét lỗ tròn như trong hình 5.16 (c). Với mục tiêu tạo ra hiệu ứng chuyển đổi EIT và EIA trong khoảng tần số 1-10 THz, các thông số cấu trúc khảo sát và được thể hiện trong bảng 5.3.

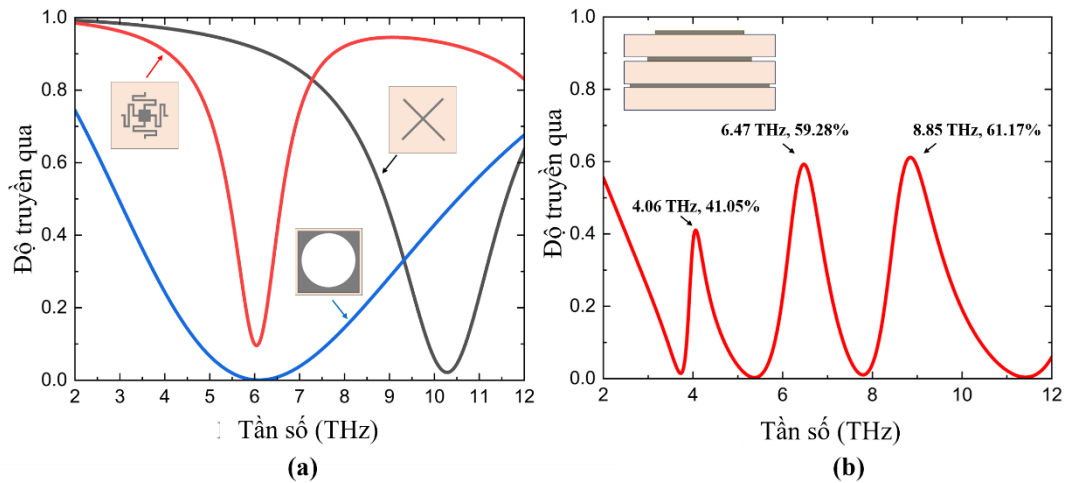
Thông số	P	t_d	t_m	a	R	d_1
Giá trị (μm)	15	0.4	0.035	13.5	6	2.5
Thông số	d_2	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5

Giá trị (μm)	0.5	1.5	3	1.5	7	1.5
Thông số	l_6	l_7	w	l		
Giá trị (μm)	3	1	0.5	12		

Bảng 5.3. Thông số cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz

5.2.2. Kết quả mô phỏng cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz

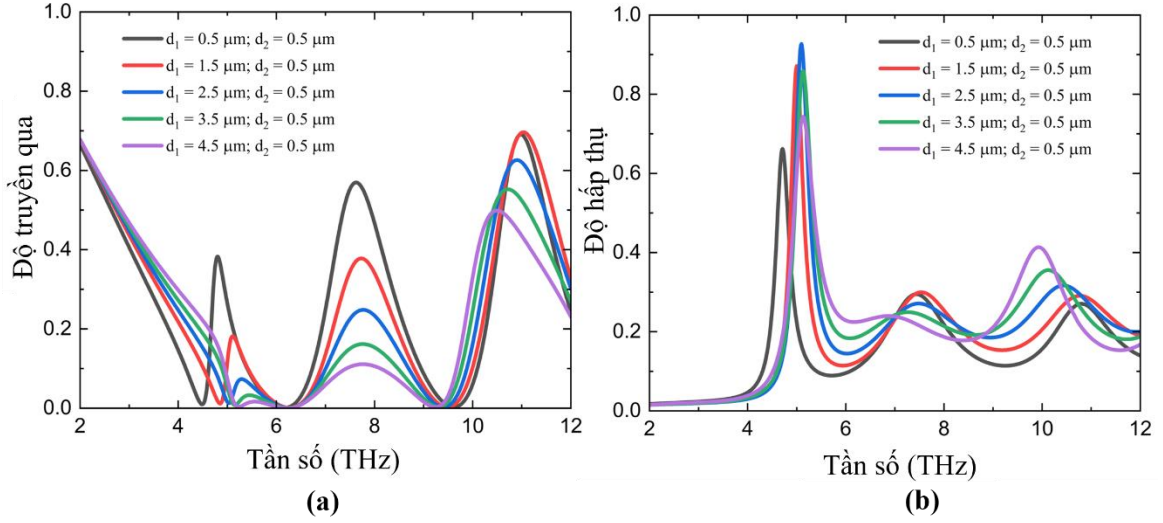
Hình 5.17 (a) biểu diễn phổ truyền qua của các cấu trúc MA đơn lớp. Có thể thấy rằng, với cấu trúc MA hình chữ “X” tương ứng với lớp trên cùng của cấu trúc MMA, tần số cộng hưởng là 9.95 THz. Hai cấu trúc MA còn lại gồm cấu trúc các thanh bạc uốn khúc – tương ứng với lớp ở giữa của cấu trúc MMA và cấu trúc công hưởng hình vuông khoét lỗ tròn – tương ứng lớp dưới cùng của MMA có tần số cộng hưởng thấp hơn tại 6.04 THz. Phổ truyền qua khi kết hợp cả 3 cấu trúc MA đơn lẻ tạo thành cấu trúc MMA được trình bày trong hình 5.17 (b). Quan sát hình ta thấy, cấu trúc MMA cho 03 đỉnh truyền qua tại các tần số 4.06, 6.47 và 8.85 THz tương ứng với độ truyền qua đạt 47.05%, 59.28% và 61.17%. Từ đó cho thấy, khi kết hợp 03 cấu trúc đơn lẻ trên, hiệu ứng EIT đã xảy ra trong cấu trúc MMA.



Hình 5.17. Phổ truyền qua của các cấu trúc (a) MA và (b) MMA có $d_1 = d_2 = 0$ hoạt động tại vùng THz

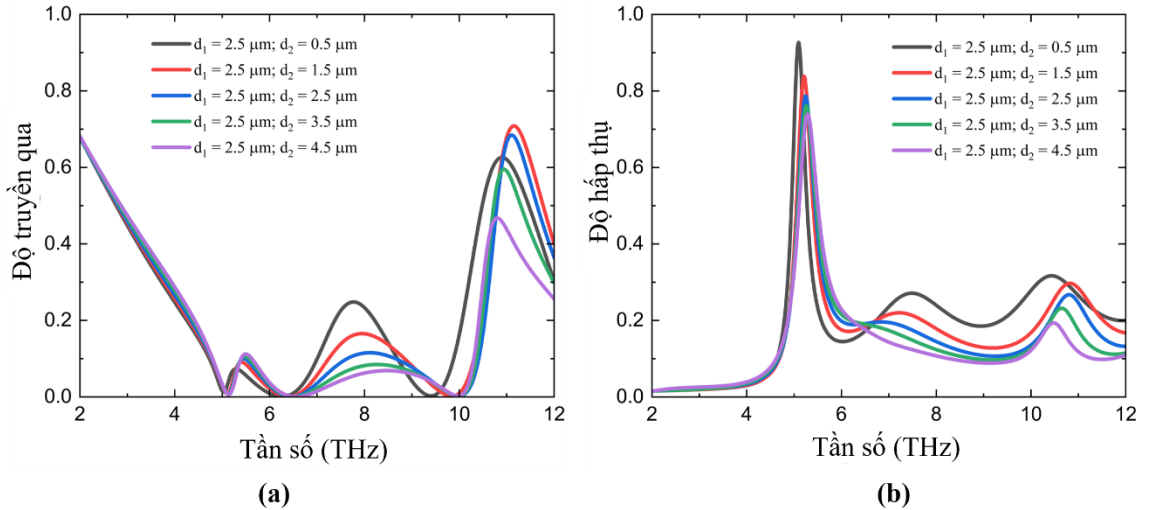
Hình 5.18 là phổ truyền qua và hấp thụ của cấu trúc MMA khi thay đổi khoảng cách d_1 giữa 2 lớp phía trên và lớp dưới cùng, $d_2 = 0.5\mu\text{m}$. Có thể thấy rằng, khi tăng dần giá trị d_1 các đỉnh truyền qua giảm dần độ truyền qua, đồng thời các đỉnh truyền qua có sự dịch chuyển nhỏ về phía tần số cao, như trong hình 5.18 (a). Ngược lại, khi quan sát phổ hấp thụ của cấu trúc MMA trong hình 5.18 (b), khi giá trị d_1 tăng, đỉnh hấp thụ đầu

tiên của của cấu trúc MMA tăng dần. Khi $d_1 = 2.5 \mu\text{m}$, phổ hấp thụ đạt giá trị cực đại 92.7% tại tần số 5.09 THz, sau đó độ hấp thụ giảm xuống khi $d_2 = 4.5 \mu\text{m}$.

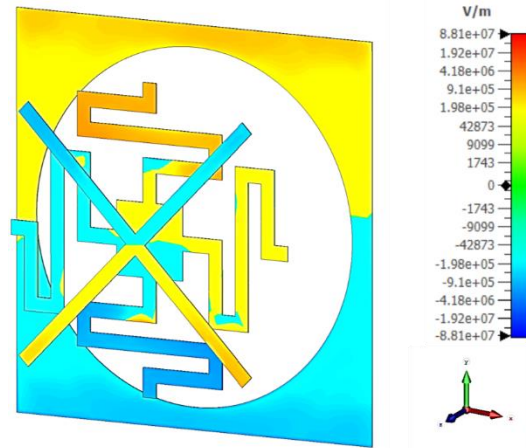


Hình 5.18. Phổ truyền qua (a) và phổ hấp thụ (b) của các cấu trúc MMA với $d_2 = 0.5 \mu\text{m}$ và d_1 thay đổi

Hình 5.19 trình bày phổ truyền qua và phổ hấp thụ của cấu trúc MMA với d_2 thay đổi và $d_1 = 2.5 \mu\text{m}$. Khi $d_2 = 0.5 \mu\text{m}$, đỉnh truyền qua tại khoảng tần số 5.09 THz biến mất, khi tăng dần giá trị d_2 , đỉnh truyền qua đầu tiên tăng dần về cường độ như thể hiện trong hình 5.19 (a). Đồng thời, quan sát phổ hấp thụ tại hình 5.19 (b), khi tăng dần giá trị d_2 , đỉnh hấp thụ tại tần số cộng hưởng đầu tiên giảm dần, cho thấy sự chuyển đổi từ hiệu ứng EIA sang EIT khi tăng dần d_2 .

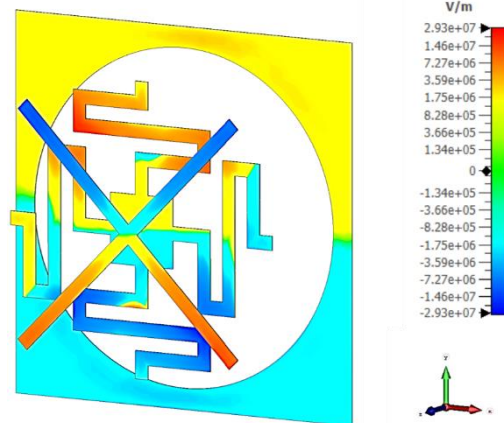


Hình 5.19. Phổ truyền qua (a) và phổ hấp thụ (b) của các cấu trúc MMA với $d_1 = 2.5 \mu\text{m}$ và d_2 thay đổi



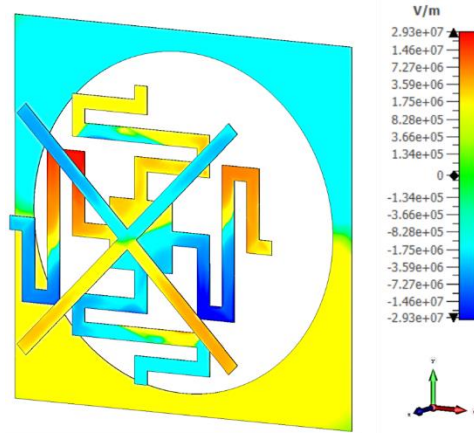
Hình 5.20. Phân bố điện trường của cấu trúc MMA với $d_1 = 2.5 \mu\text{m}$ và $d_2 = 0.5 \mu\text{m}$ tại tần số 5.09 THz ở chế độ EIA

Phân bố điện trường của cấu trúc MMA tại tần số 5.09 THz được mô phỏng và biểu diễn trong hình 5.20. Kết quả cho thấy, tại tần số 5.09 THz, dòng điện bề mặt giữa 2 lớp kim loại trên cùng có xu hướng ngược chiều nhau, cho thấy cộng hưởng từ xảy ra. Tại 2 lớp kim loại dưới cùng, dòng điện bề mặt 2 lớp kim loại song song cùng chiều nhau, cho thấy cộng hưởng điện đã xảy ra. Điều này cho thấy, tại tần số 5.09 THz, đỉnh hấp thụ do đồng thời cộng hưởng từ và cộng hưởng điện giữa các lớp gây nên.



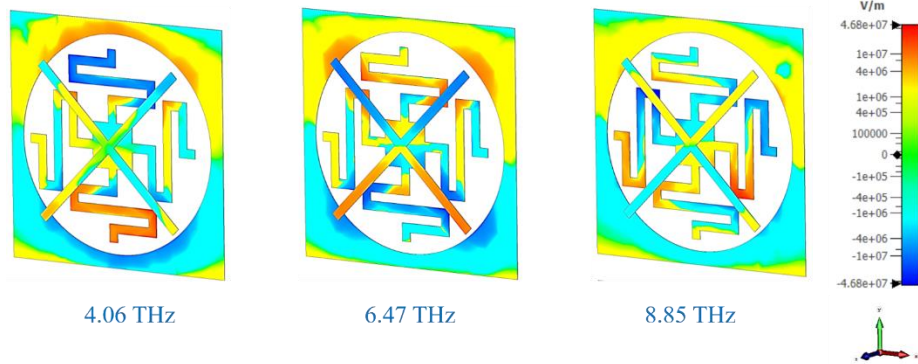
Hình 5.21. Phân bố điện trường của cấu trúc MMA với $d_1 = 2.5 \mu\text{m}$ và $d_2 = 0.5 \mu\text{m}$ tại tần số 7.48 THz ở chế độ EIA

Hình 5.21 biểu diễn phân bố điện trường của MMA tại tần số 7.48 THz, tương ứng đỉnh hấp thụ thứ 2. Quan sát phân bố điện trường của 2 lớp kim loại phía trên có thể thấy rằng, dòng điện bề mặt 2 lớp chạy ngược chiều nhau. Điều này cho thấy cộng hưởng từ xảy ra tại 2 lớp kim loại phía trên. Tại 2 lớp kim loại phía dưới, phân bố từ trường cho thấy dòng điện trên bề mặt 2 lớp kim loại có xu hướng cùng chiều nhau. Qua đó cho thấy cộng hưởng điện xảy ra tại 2 lớp phía dưới.



Hình 5.22. Phân bố điện trường của cấu trúc MMA với $d_1 = 2.5\mu\text{m}$ và $d_2 = 0.5\mu\text{m}$ tại tần số 10.43 THz ở chế độ EIA

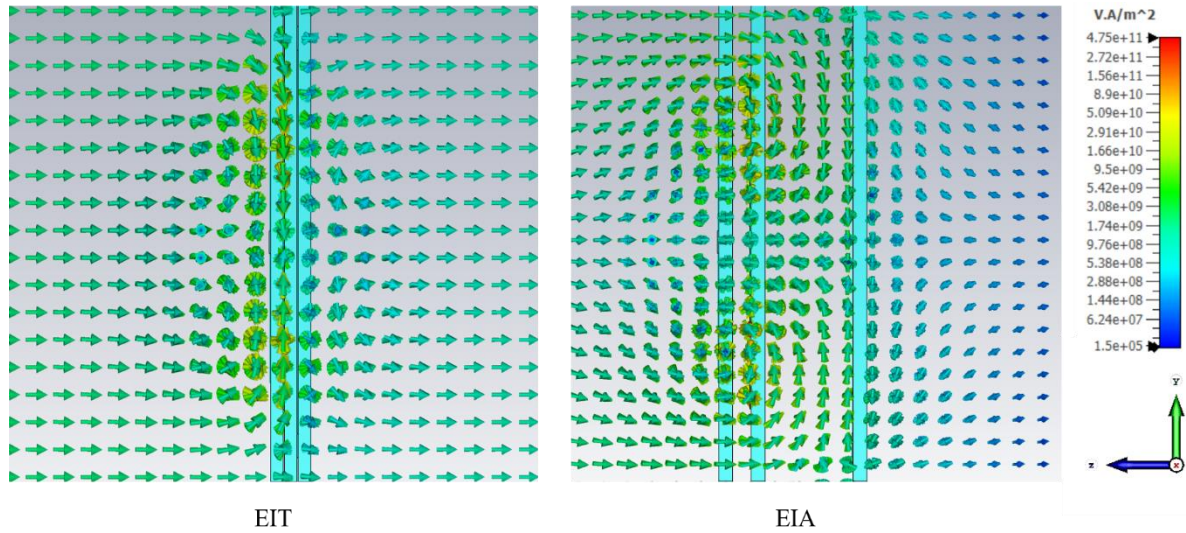
Phân bố điện trường của MMA tại đỉnh hấp thụ thứ 3, tương ứng tần số 10.43 THz được thể hiện trong hình 5.22. Từ phân bố điện trường giữa các lớp ta thấy, dòng điện bề mặt trên 2 lớp kim loại phía trên song song ngược chiều nhau, cho thấy đặc trưng của cộng hưởng từ. Điều này cũng có thể quan sát thấy tại 2 lớp phía dưới, dòng điện song song ngược chiều giữa 2 lớp. Vậy, đỉnh hấp thụ tại tần số này là do cộng hưởng từ giữa các lớp gây nên.



Hình 5.23. Phân bố điện trường của cấu trúc MMA với $d_1 = d_2 = 0.5$ tại tần số 4.06, 6.47 và 8.85 THz ở chế độ EIT

Phân bố điện trường của cấu trúc MMA với $d_1 = d_2 = 0$ tại các tần số 4.06, 6.47 và 8.85 THz được biểu diễn trong hình 5.23. Tại tần số 4.06, dòng điện bề mặt của 2 lớp kim loại phía trên phân bố cùng chiều nhau, cho thấy cộng hưởng điện. Ở 2 lớp kim loại phía dưới, phân bố từ trường cho thấy các dòng điện bề mặt chạy ngược chiều nhau, cho thấy cộng hưởng từ của 2 lớp phía dưới. Tại tần số 6.47 THz, phân bố điện trường cho thấy cộng hưởng từ xảy ra ở 2 lớp phía trên, do dòng điện 2 lớp ngược hướng nhau. Ở 2 lớp phía dưới, dòng điện bề mặt phân bố cùng chiều nhau, cho thấy cộng hưởng điện.

Tại tần số 8.85 THz, phân bố điện trường cho thấy 2 lớp phía trên có dòng điện bề mặt chạy cùng chiều nhau, cho thấy cộng hưởng điện giữa 2 lớp. Tương tự, tại 2 lớp phía dưới, dòng điện bề mặt giữa 2 lớp kim loại cũng chạy cùng chiều nhau. Do đó, tại tần số này, các lớp có cộng hưởng từ với nhau.

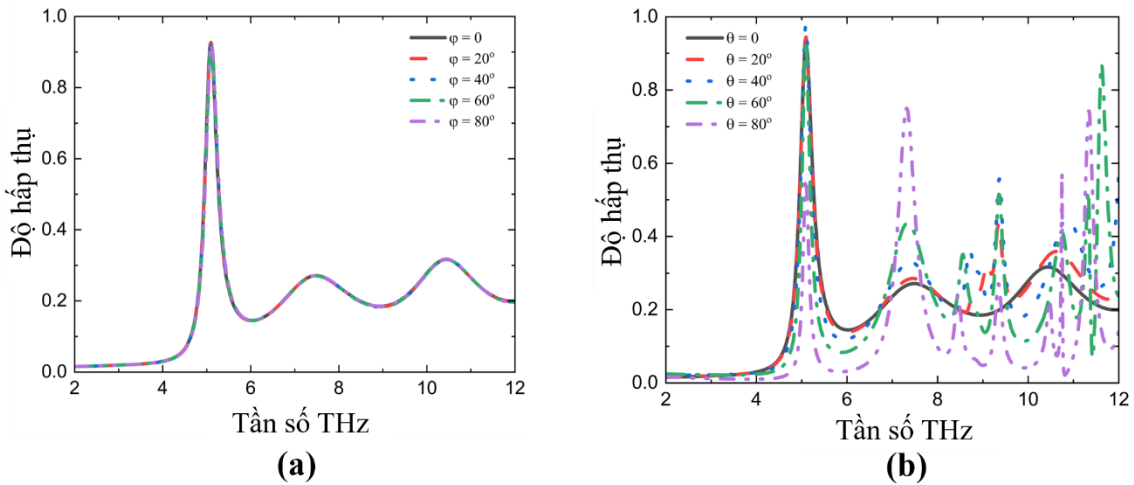


Hình 5.24. Mô phỏng sự lan truyền năng lượng qua MMA đa chức năng chuyển đổi EIT và EIA hoạt động tại vùng THz

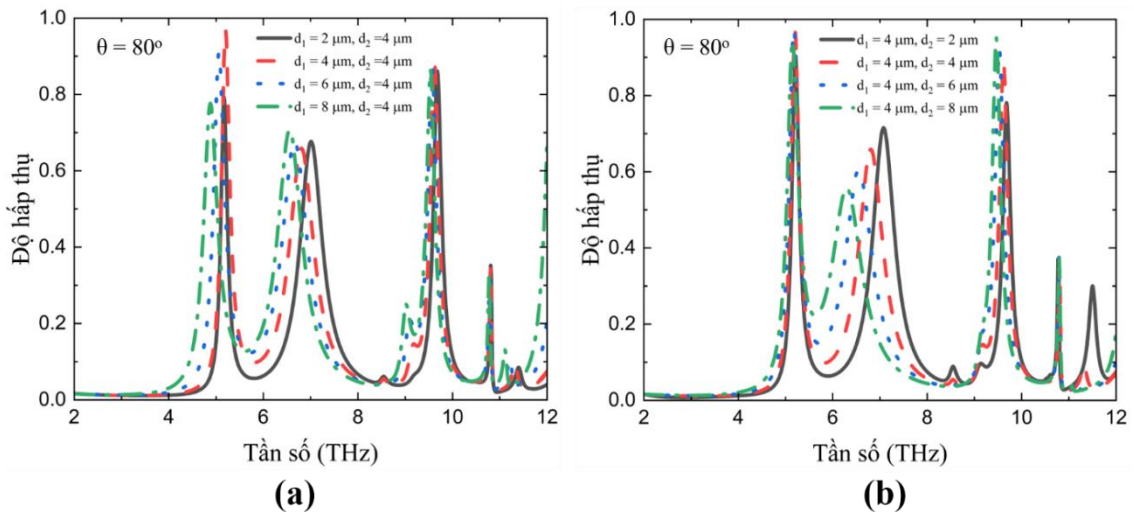
Sự lan truyền năng lượng của MMA tại vùng THz trong hai trường hợp EIT và EIA được trình bày trong hình 5.24. Với chế độ EIT, các năng lượng được phân bố đồng đều và truyền thẳng qua vật liệu. Trên MMA là nơi tập trung lớn nhất dòng năng lượng, cho thấy sự tương tác giữa MMA với sóng điện từ truyền tới. Sóng điện từ sau khi đi qua MMA vẫn duy trì được cường độ nhất định, điều này minh chứng cho sự giao thoa mang tính bù triệt tiêu giữa các mode cộng hưởng cho phép sóng truyền qua MMA. Ở chiều ngược lại, trong chế độ EIA, dòng năng lượng tạo thành các dòng xoáy và hội tụ quanh mặt biên phía trong cấu trúc. Dòng năng lượng trên MMA có cường độ lớn, thể hiện hiệu ứng hấp thụ tăng cường khi năng lượng điện từ bị giữ lại. Các dòng xoáy chỉ rõ vai trò hỗ tương giữa các cấu phần cộng hưởng kích thích hiệu ứng hấp thụ mạnh. Sự khác biệt giữa hai chế độ EIT và EIA tại vùng THz chính là minh chứng rõ ràng cho khả năng điều khiển linh hoạt dòng năng lượng điện từ bằng cấu trúc.

Hình 5.25 biểu diễn phổ hấp thụ của cấu trúc MMA có $d_1 = 2.5 \mu\text{m}$ và $d_2 = 0.5 \mu\text{m}$ với góc phân cực và góc tới khác nhau. Sự ảnh hưởng của góc phân cực đến phổ hấp thụ được trình bày trong hình 5.25 (a). Độ hấp thụ của cấu trúc không chịu ảnh hưởng của góc phân cực sóng điện từ. Ngoài ra, cấu trúc cũng cho thấy khả năng duy trì độ hấp thụ với góc tới lớn như thể hiện trong hình 5.25 (b). Độ hấp thụ được duy trì lớn hơn

90% với góc tới θ từ 60° trở xuống. Khi góc tới θ đạt giá trị 80° , độ hấp thụ của MMA giảm mạnh xuống dưới 60%. Phổ hấp thụ của MMA khi góc tới $\theta = 80^\circ$ được tối ưu theo khoảng cách các lớp khác nhau được thể hiện trong hình 5.26. Trong đó, hình 5.26 (a) mô tả phổ hấp thụ của MMA khi thay đổi giá trị d_1 và giữ nguyên giá trị $d_2 = 4 \mu\text{m}$. Kết quả cho thấy, khi tăng giá trị d_1 lên $4 \mu\text{m}$, đỉnh hấp thụ đầu tiên tăng lên và đạt giá trị cực đại tại tần số 5.2 THz với độ hấp thụ là 96.87%. Tiếp tục tăng giá trị d_1 , đỉnh hấp thụ đầu tiên có xu hướng giảm thấy, cho thấy sự phụ thuộc của đỉnh hấp thụ vào khoảng cách d_1 . Hình 5.26 (b) biểu diễn sự phụ thuộc của phổ hấp thụ MMA vào khoảng cách d_2 . Khi tăng dần khoảng cách d_2 lên $4 \mu\text{m}$, đỉnh hấp thụ đầu tiên cũng tăng lên. Tiếp tục tăng giá trị d_2 thì độ hấp thụ của đỉnh này giảm dần.

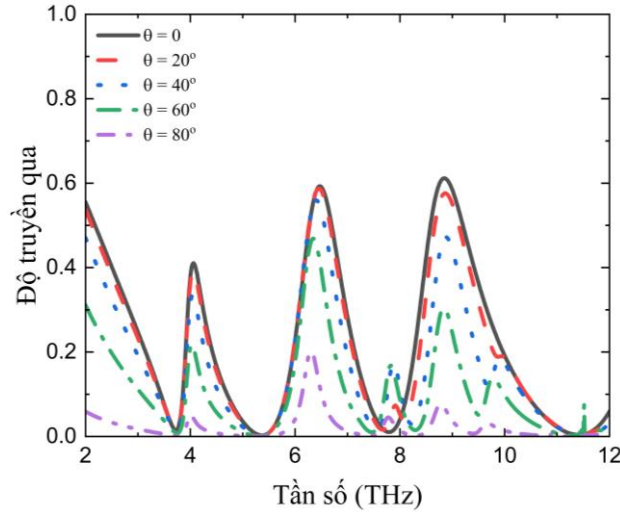


Hình 5.25. Ảnh hưởng của góc phân cực và góc tới đến phổ hấp thụ của cấu trúc MMA với $d_1 = 2.5 \mu\text{m}$ và $d_2 = 0.5 \mu\text{m}$.

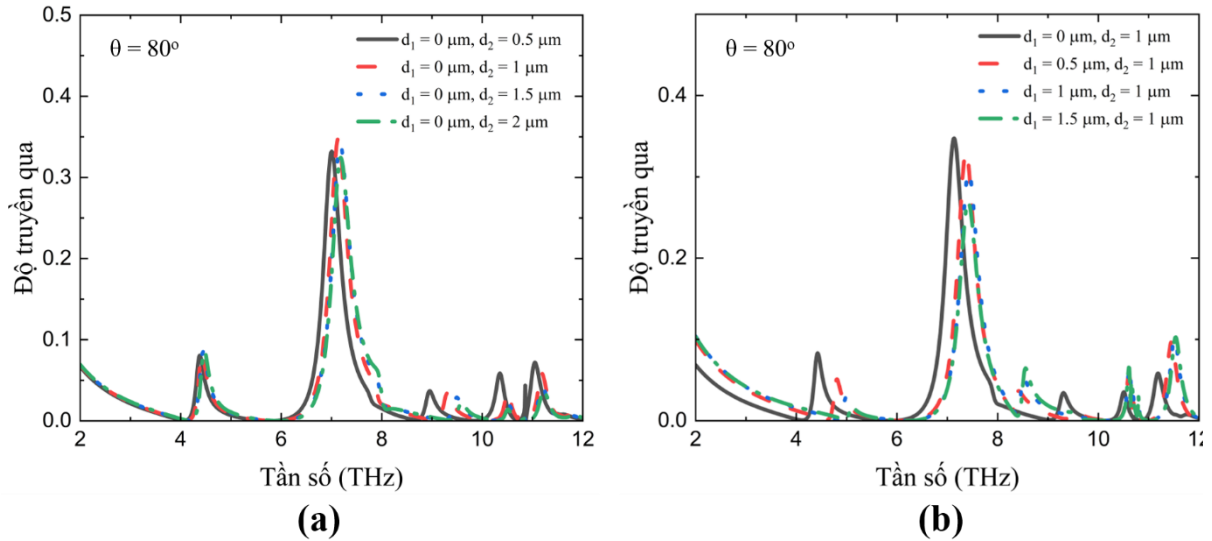


Hình 5.26. Phổ hấp thụ của cấu trúc MMA tại góc tới $\theta = 80^\circ$ với (a) d_1 thay đổi và $d_2 = 4 \mu\text{m}$; (b) $d_1 = 4 \mu\text{m}$ và d_2 thay đổi.

Ngoài ra, sự ảnh hưởng của góc tới sóng điện từ đến độ truyền qua của cấu trúc MMA với $d_1 = d_2 = 0$ cũng được khảo sát và thể hiện trong hình 5.27. Có thể thấy rằng, khi góc tới θ tăng dần, độ truyền qua của MMA cũng có sự thay đổi. Trong đó, tại $\theta = 0$, MMA có các đỉnh truyền qua tại 4.06, 6.47 và 8.85 THz tương ứng với độ truyền qua đạt 47.05%, 59.28% và 61.17%. Khi tăng dần giá trị của góc tới θ , các đỉnh truyền qua có xu hướng giảm dần và có sự dịch chuyển nhẹ về phía tần số thấp. Khi $\theta = 80^\circ$, các đỉnh truyền qua đạt giá trị tương ứng là 5%, 20.29% và 7.76%.



Hình 5.27. Ảnh hưởng của góc tới đến phổ truyền qua của cấu trúc MMA với $d_1 = d_2 = 0$



Hình 5.28. Phổ truyền qua của cấu trúc MMA tại góc tới $\theta = 80^\circ$ với (a) $d_1 = 0$ và d_2 thay đổi; (b) $d_2 = 1 \mu\text{m}$ thay đổi và $d_1 = 0$.

Hình 5.28 biểu diễn sự phụ thuộc của phổ truyền qua vào khoảng cách giữa các lớp của MMA. Phổ truyền qua của MMA tại góc tới 80° với $d_1 = 0$ và thay đổi giá trị d_2 được mô tả trong hình 5.28 (a). Có thể quan sát thấy, khi d_2 đạt giá trị $1 \mu\text{m}$, độ truyền

qua của MMA đạt giá trị lớn nhất tại tần số 7.11 THz với giá trị 62.89%. Khi thay đổi giá trị d_2 độ truyền qua của cấu trúc giảm dần. Khi cố định giá trị $d_2 = 1 \mu\text{m}$ và thay đổi giá trị d_1 như mô tả trong hình 5.28 (b), độ truyền qua của MMA giảm dần. Kết quả cho thấy, ở góc tới lớn, MMA đa chức năng chuyển đổi giữa EIT và EIA vẫn có thể hoạt động khi thay đổi khoảng cách giữa các lớp phù hợp.

5.3. Kết luận chương 5

Dựa trên hiệu ứng chuyển đổi giữa EIT và EIA, nghiên cứu sinh đã thiết kế và mô phỏng cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số GHz. Cấu trúc MMA đa chức năng được thiết kế gồm 3 lớp cấu trúc MA đơn lẻ đồng-FR-4 khác nhau. Cấu trúc MMA sau khi được tối ưu, phổ hấp thụ đạt giá trị cực đại 94.36% tại tần số 4.36 GHz. Sự phân bố dòng điện bề mặt cũng được mô phỏng và khảo sát để làm rõ sự tương tác giữa các lớp.

Bên cạnh đó, nghiên cứu sinh cũng đã thiết kế và mô phỏng cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz. Cấu trúc MMA đa chức năng được thiết kế giống với cấu trúc hoạt động tại vùng tần số GHz, gồm 3 lớp cấu trúc MA đơn lẻ bạc-FR-4 khác nhau. Cấu trúc MMA sau khi được tối ưu, phổ hấp thụ đạt giá trị cực đại 98.21% tại tần số 5.29 THz. Sự phân bố dòng điện bề mặt cũng được mô phỏng và khảo sát để làm rõ sự tương tác giữa các lớp.

KẾT LUẬN CHUNG

Luận án *“Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ dựa trên tương tác cộng hưởng trong cấu trúc vật liệu biến hoá đa lớp”* đã được thực hiện tại Học viện Khoa học và Công nghệ và Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Luận án đã tập trung nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ của MMA. Những kết quả nghiên cứu của luận án được công bố trên 04 tạp chí quốc tế thuộc danh mục SCIE, 01 tạp chí quốc gia và 01 kỷ yếu hội thảo khoa học chuyên ngành.

Luận án có đóng góp cho nghiên cứu về Khoa học vật liệu nói chung và Vật liệu biến hóa nói riêng, cụ thể như sau:

- Đã thiết kế và chế tạo thành công MMA hấp thụ đa dải tần hoạt động tại vùng GHz dựa trên vật liệu Cu – FR-4. Cấu trúc MMA cho 2 đỉnh hấp thụ tại tần số 4.89 và 4.97 GHz với độ hấp thụ đạt 98.99% và 98.44%. Đã thiết kế và chế tạo thành công MMA hấp thụ dải rộng hoạt động tại vùng GHz dựa trên mực dẫn điện có thành phần graphene-FR-4. MMA graphene hai lớp đạt được độ hấp thụ lớn hơn 90% trải dài từ tần số 6.07 GHz đến 14.5 GHz với FBW đạt 81.96%.

- Đã thiết kế, mô phỏng các tính chất điện từ của MMA hấp thụ đa dải tần và hấp thụ dải rộng dựa trên vật liệu $\text{VO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$. Khi độ dẫn VO_2 lớn đạt giá trị 25000 S/m, MMA cho 3 đỉnh hấp thụ tại các tần số 6.68, 9.24 và 10.7 THz với độ hấp thụ lần lượt là 99.61%, 97.54% và 98.35%. Khi độ dẫn VO_2 nhỏ đạt giá trị 17500 S/m, MMA duy trì được hấp thụ băng thông rộng với FBW là 47.89%, độ hấp thụ duy trì lớn hơn 90% trong khoảng 5.16 – 8.41 THz.

- Đã thiết kế cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số GHz, gồm 3 lớp cấu trúc MA đơn lẻ đồng – FR-4 khác nhau. Cấu trúc MMA có thể chuyển đổi giữa hiệu ứng truyền qua cảm ứng điện từ đa dải tần, với độ truyền qua 55.3%, 68.19% và 66.66% tại tần số 3.69, 6.07 và 8.14 GHz. và hiệu ứng hấp thụ cảm ứng điện từ với độ hấp thụ đạt giá trị cực đại 94.36% tại tần số 4.36 GHz. Bên cạnh đó, cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động ở vùng THz cũng đã được thiết kế, gồm 3 lớp cấu trúc MA đơn lẻ bạc – PET khác nhau. Cấu trúc MMA có thể chuyển đổi giữa hiệu ứng truyền qua cảm ứng điện từ đa dải tần, với độ truyền qua 38.26%, 56.96% và 69.05% tại tần số 4.79, 7.62, 10.98 THz, và hiệu ứng hấp thụ cảm ứng điện từ với độ hấp thụ đạt giá trị cực đại 92.7% tại tần số 5.09 THz.

- Làm rõ tương tác giữa các lớp lên tính chất hấp thụ của MMA. Tương tác giữa các lớp cấu trúc cộng hưởng giống nhau dẫn đến hiện tượng đa cộng hưởng, cho phép

mở rộng băng thông hấp thụ hoặc hấp thụ đa dải tần. Có thể điều chỉnh tương tác giữa các lớp dựa vào tổn hao Ohmic và tổn hao điện môi. Khi tổn hao Ohmic và điện môi cao, các đỉnh hấp thụ tiến sát lại gần nhau, giúp mở rộng dải hấp thụ, trong khi tổn hao thấp làm các đỉnh hấp thụ tách rời nhau. Ngoài ra, tương tác giữa các lớp cấu trúc cộng hưởng khác nhau có thể được điều khiển bằng cách thay đổi khoảng cách các lớp, cho phép chuyển đổi tương tác từ triệt tiêu sang tăng cường. Điều này tạo ra vật liệu biến hóa đa chức năng có khả năng chuyển đổi giữa hiệu ứng EIT và EIA.

KIẾN NGHỊ NHỮNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Đối với các hướng nghiên cứu tiếp theo, việc mở rộng khả năng hấp thụ, duy trì khả năng hấp thụ sóng điện từ với góc tới lớn đang ngày càng được quan tâm hơn. Điều này giúp MMA được ứng dụng tốt hơn trong lĩnh vực truyền thông quang học, xử lý tín hiệu và cả trong lĩnh vực y học, nơi tần số cao có thể đem lại thông tin chi tiết về cấu trúc phân tử và tế bào. Trong đó, có thể tập trung vào 03 hướng nghiên cứu chính bao gồm:

1. Sử dụng kỹ thuật học máy, AI tối ưu cấu trúc MMA: Giúp tăng hiệu quả thiết kế, tiết kiệm thời gian. AI giúp tự động hóa và tăng tốc quá trình thiết kế MA, tránh phải thử nghiệm thủ công nhiều lần, đồng thời tìm ra những cấu trúc tối ưu mà phương pháp truyền thống khó đạt được do không gian thiết kế quá rộng và phức tạp.

2. Ứng dụng kỹ thuật mới, tích hợp các vật liệu tiên tiến trong chế tạo MMA: Tích hợp các vật liệu tiên tiến như graphene, vật liệu polymer linh hoạt, vật liệu ceramic, kim loại quý (vàng, đồng) và lớp cách điện công suất cao giúp cải thiện khả năng hấp thụ đa băng tần, mở rộng dải tần sử dụng, độ bền cơ học và tính linh hoạt trong sử dụng MMA trên các bề mặt cong, không phẳng.

3. Nghiên cứu, ứng dụng các cấu trúc MMA cho thu năng lượng và cảm biến khí

Tóm lại, nghiên cứu về tính chất điện từ của MMA không chỉ đang mở ra những triển vọng ứng dụng đầy hứa hẹn, mà còn cung cấp nền tảng cho những nghiên cứu tiếp theo về việc tích hợp chúng vào các thiết bị điện tử thông minh và khám phá các ứng dụng mới ở các dải tần số cao hơn.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Bui Xuan Khuyen, **Ngo Nhu Viet***, Pham Thanh Son, Bui Huu Nguyen, Nguyen Hai Anh, Do Thuy Chi, Nguyen Phon Hai, Bui Son Tung, Vu Dinh Lam, Haiyu Zheng, Liangyao Chen and Youngpak Lee, “*Multi-layered metamaterial absorber: electromagnetic and thermal characterization*”, Photonics, **11**, No. 3, p. 219 (2024).
2. Bui Son Tung, **Ngo Nhu Viet**, Bui Xuan Khuyen, Thanh Son Pham, Phong Xuan Do, Nguyen Thi Hoa, Vu Dinh Lam and Do Khanh Tung, “*Multi-band and polarization-insensitive electromagnetically-induced transparency based on coupled-resonators in a metamaterial operating at GHz frequencies*”, Phys. Scr., **99** 115502 (2024).
3. Thuy Chi Do, Bui Xuan Khuyen, Bui Son Tung, **Ngo Nhu Viet**, Duong Thi Ha, Vu Thi Hong Hanh, Xuan Phong Do, Do Khanh Tung*, Hai Anh Nguyen and Vu Dinh Lam, “*Wide-angle electromagnetic wave absorption via multilayer metamaterial structures*”, Phys. Scr., **100** 025538 (2025)
4. Bui Son Tung, **Ngo Nhu Viet***, Bui Xuan Khuyen, Hai Anh Nguyen, Nguyen Khanh Viet, Phuc Vinh Nguyen, Vu Thi Van Anh and Vu Dinh Lam, “*A bilayer metamaterial structure utilizing graphene ink for wide-band absorption in the GHz region*”, Phys. Scr., **100** 085507 (2025)
5. **Ngo Nhu Viet**, Vu Dinh Lam, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Pham Thanh Son, Nguyen Hai Anh, Nguyen Phon Hai, Do Khanh Tung, Do Thuy Chi, “*Expanding the absorption bandwidth with two-layer graphene metamaterials in gigahertz frequency range*”, Comm. Phys., **vol. 34**, no. 4, p. 365 (2024).
6. **Ngo Nhu Viet**, Bui Xuan Khuyen, Vu Dinh Lam and Bui Son Tung, “*Multilayer metamaterial absorber for infrared emitter application*”, Proceedings of IWNA, 08-11 (2023)

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Kaushik, M. V., 2023, Negative index materials: metamaterials, *Review Feature*, 9.
2. Liu C., Long H., ... Liu X., 2020, Reversed Doppler effect based on hybridized acoustic Mie resonances, *Sci Rep*, 10(1), tr. 1519.
3. Chen H., Chen M., 2011, Flipping photons backward: reversed Cherenkov radiation, *Materials Today*, 14(1–2), tr. 34–41.
4. Veselago V.G., 1968, THE ELECTRODYNAMICS OF SUBSTANCES WITH SIMULTANEOUSLY NEGATIVE VALUES OF ϵ AND μ , *Sov Phys Usp*, 10(4), tr. 509–514.
5. Pendry J.B., Holden A.J., ... Stewart W.J., 1999, Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE Trans Microwave Theory Techn*, 47(11), tr. 2075–2084.
6. Smith D.R., Padilla W.J., ... Schultz S., 2000, Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity, *Phys Rev Lett*, 84(18), tr. 4184–4187.
7. Yuan G., Rogers K.S., ... Zheludev N.I., 2019, Far-Field Superoscillatory Metamaterial Superlens, *Phys Rev Applied*, 11(6), tr. 064016.
8. Islam S., Faruque M., Islam M., 2015, A Near Zero Refractive Index Metamaterial for Electromagnetic Invisibility Cloaking Operation, *Materials*, 8(8), tr. 4790–4804.
9. Wang X., Luo X., ... Huang Z., 2018, Acoustic perfect absorption and broadband insulation achieved by double-zero metamaterials, *Applied Physics Letters*, 112(2), tr. 021901.
10. Sood D., Tripathi C.C., 2017, A Compact Ultrathin Ultra-wideband Metamaterial Microwave Absorber, *J Microw Optoelectron Electromagn Appl*, 16(2), tr. 514–528.
11. Ning J., Dong S., ... Feng Y., 2020, Ultra-broadband microwave absorption by ultra-thin metamaterial with stepped structure induced multi-resonances, *Results in Physics*, 18, tr. 103320.
12. Elakkiya A., Radha S., ... Manikandan E., 2021, An Ultrathin Microwave Metamaterial Absorber for C, X, and Ku Band Applications, *J Electron Mater*, 50(12), tr. 7275–7282.
13. Landy N.I., Sajuyigbe S., ... Padilla W.J., 2008, Perfect Metamaterial Absorber, *Phys Rev Lett*, 100(20), tr. 207402.
14. Wang Y., Cui Z., ... Yue L., 2019, Composite Metamaterials for THz Perfect Absorption, *Physica Status Solidi (a)*, 216(6), tr. 1800940.
15. Luo Z., Ji S., ... Dai H., 2021, A multiband metamaterial absorber for GHz and THz simultaneously, *Results in Physics*, 30, tr. 104893.
16. Zhou J., Economou E.N., ... Soukoulis C.M., 2006, Unifying approach to left-handed material design, *Opt Lett*, 31(24), tr. 3620.
17. Dương Thị Hà, 2024, 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, Học viện Khoa học và Công nghệ.

18. Liu Y., Ma W.-Z., ... Gu Y., 2023, A metamaterial absorber with a multi-layer metal–dielectric grating structure from visible to near-infrared, *Optics Communications*, 542, tr. 129588.
19. Xi Z., Lu X., ... Guo S., 2023, Research on Design Method of Multilayer Metamaterials Based on Stochastic Topology, *Materials*, 16(15), tr. 5229.
20. Peng G., Ke P.-X., ... Chen H.-C., 2023, The Design of a Multilayer and Planar Metamaterial with the Multi-Functions of a High-Absorptivity and Ultra-Broadband Absorber and a Narrowband Sensor, *Photonics*, 10(7), tr. 804.
21. Mandal P.C., Mukherjee I., Chatterji B.N., 2021, High capacity steganography based on IWT using eight-way CVD andn-LSB ensuring secure communication, *Optik*, 247, tr. 167804.
22. Wang Y., Yang M., ... Zhao L., 2025, Ultra-Broadband Metamaterial Absorber Based on Multilayer Resistive Film Frequency Selective Surface, *Adv Materials Technologies*, tr. e00785.
23. Lim D.D., Lee S., ... Gu G.X., 2024, Mechanical metamaterials as broadband electromagnetic wave absorbers: investigating relationships between geometrical parameters and electromagnetic response, *Mater Horiz*, 11(10), tr. 2506–2516.
24. Yan X., Su Q., ... Liu D., 2025, Broadband multilayer electromagnetic wave absorber designed with high storage and low loss silicone rubber-based RGO@SiO₂ dielectric materials, *Chemical Engineering Journal*, 510, tr. 161881.
25. Zhang S., Yang H., ... Li B., 2025, Multiple tunable six-peak graphene absorber for high-performance refractive index sensing, *Physica B: Condensed Matter*, 708, tr. 417225.
26. Nipun Md.M.K., Islam Md.J., Moniruzzaman Md., 2025, A triple-band metamaterial absorber for gas sensing and refractive index detection through enhanced FOM and Q-factor performance in the THz regime, *Results in Optics*, 21, tr. 100822.
27. Lê Văn Long, 2024, Nghiên cứu điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa bằng tác động cơ học và điện áp, Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ
28. Mẫn Hoài Nam, 2025, Nghiên cứu tích hợp vật liệu plasmonic hai chiều graphene và mos₂ trên cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ ở vùng tần số GHz và THz, Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
29. Lê Thị Hồng Hiệp, 2025, Nghiên cứu chế tạo vật liệu biến hóa có từ trường định xứ ứng dụng trong truyền dẫn năng lượng không dây ở dải tần số MHz, Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ
30. Nguyễn Thị Kim Thu, 2023, Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ băng rộng sử dụng vật liệu biến hóa tích hợp phân tử tổn hao, Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ

31. Liu Y., Zhang X., 2011, Metamaterials: a new frontier of science and technology, *Chem Soc Rev*, 40(5), tr. 2494.
32. Kaina N., Lemoult F., ... Lerosey G., 2015, Negative refractive index and acoustic superlens from multiple scattering in single negative metamaterials, *Nature*, 525(7567), tr. 77–81.
33. Fan Y., Qiao T., ... Li H., 2017, An electromagnetic modulator based on electrically controllable metamaterial analogue to electromagnetically induced transparency, *Sci Rep*, 7(1), tr. 40441.
34. Holliman J.E., Schaef H.T., ... Miller Q.R.S., 2022, Review of foundational concepts and emerging directions in metamaterial research: Design, phenomena, and applications, <<https://arxiv.org/abs/2211.03147>>, accessed: 23/10/2025.
35. Shi Y., Li Y., ... Li J., 2025, A broadband acoustic metamaterial lens for sub-wavelength imaging based on bandwidth enhancement, *Applied Acoustics*, 227, tr. 110243.
36. Dhama R., Yan B., ... Wang Z., 2021, Super-Resolution Imaging by Dielectric Superlenses: TiO₂ Metamaterial Superlens versus BaTiO₃ Superlens, *Photonics*, 8(6), tr. 222.
37. Khan M.S., Shakoor R.A., ... Ahmed E.M., 2024, A focused review on techniques for achieving cloaking effects with metamaterials, *Optik*, 297, tr. 171575.
38. Liu Y., Sun F., ... Wang Z., 2023, A metamaterial-free omnidirectional invisibility cloak based on thrice transformations inside optic-null medium, *Optics & Laser Technology*, 157, tr. 108779.
39. Liu X., Xia F., ... Yun M., 2023, Working Mechanism and Progress of Electromagnetic Metamaterial Perfect Absorber, *Photonics*, 10(2), tr. 205.
40. Chen Y., Liang J., ... Yang W., 2024, Bi-directional high-performance metamaterial perfect absorber for solar harvesting and refractive index sensing, *Materials Today Nano*, 26, tr. 100487.
41. Cao L., Jia S., ... Roskos H.G., 2025, Terahertz Metamaterial Sensors: Design Theory, Optimization Approach, and Advancements in Biosensing Applications, *Adv Materials Technologies*, 10(9), tr. 2401358.
42. Wang D., Luo S., Xu K.-D., 2024, A Flexible Terahertz Metamaterial Sensor for Pesticide Sensing and Detection, *ACS Appl Mater Interfaces*, 16(21), tr. 27969–27978.
43. De Souza Oliveira H., Saeedzadeh Khaanghah N., ... Münzenrieder N., 2025, Mechanical metamaterial sensors: from design to applications, *J Phys D: Appl Phys*, 58(13), tr. 133002.
44. Lu X., Zhang L., Zhang T., 2015, Nanoslit-microcavity-based narrow band absorber for sensing applications, *Opt Express*, 23(16), tr. 20715.
45. Argyropoulos C., Le K.Q., ... Alù A., 2013, Broadband absorbers and selective emitters based on plasmonic Brewster metasurfaces, *Phys Rev B*, 87(20), tr. 205112.
46. Zhou L., Tan Y., ... Zhu J., 2016, Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation, *Sci Adv*, 2(4), tr. e1501227.
47. Meng L., Zhao D., ... Qiu M., 2019, Gain-Assisted Plasmon Resonance Narrowing and Its Application in Sensing, *Phys Rev Applied*, 11(4), tr. 044030.

48. Padilla W.J., Aronsson M.T., ... Averitt R.D., 2007, Electrically resonant terahertz metamaterials: Theoretical and experimental investigations, *Phys Rev B*, 75(4).
49. Assimonis S.D., Chandravanshi S., ... Cotton S.L., 2021, Implementation of Resonant Electric Based Metamaterials for Electromagnetic Wave Manipulation at Microwave Frequencies, *Sensors*, 21(24), tr. 8452.
50. Huang Q., Xie W., ... Toktarbay Z., 2025, Study on thin-layer broadband metamaterial absorber based on composite multi-opening ring pattern of magnetic dielectric layers, *Adv Compos Hybrid Mater*, 8(2), tr. 180.
51. Schuller J.A., Zia R., ... Brongersma M.L., 2007, Dielectric Metamaterials Based on Electric and Magnetic Resonances of Silicon Carbide Particles, *Phys Rev Lett*, 99(10).
52. Zhao Q., Zhou J., ... Lippens D., 2009, Mie resonance-based dielectric metamaterials, *Materials Today*, 12(12), tr. 60–69.
53. Campione S., Basilio L.I., ... Sinclair M.B., Purely electric and magnetic dipole resonances in metamaterial dielectric resonators through perturbation theory inspired geometries.
54. Min L., Wang W., ... Chen M., 2019, Electromagnetic resonance strength in metamaterials, *Journal of Applied Physics*, 126(2).
55. Phong L.T.H., Khuyen B.X., ... Manh D.H., 2021, Synthesis and Broadband Absorption of Fe-Based Nanoparticles in the Ku-Band, *Journal of Elec Materi*, 50(4), tr. 2157–2163.
56. Chen X., Grzegorzczuk T.M., ... Kong J.A., 2004, Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials, *Phys Rev E*, 70(1), tr. 016608.
57. Yin X., Sang T., ... Wang Y., 2019, Symmetry-broken square silicon patches for ultra-narrowband light absorption, *Sci Rep*, 9(1), tr. 17477.
58. Agarwal M., Meshram M.K., 2021, An approach for circuit modeling of a multiband resonators based planar metamaterial absorber, *Micro & Optical Tech Letters*, 63(1), tr. 181–187.
59. Huang W., Zhu Z., 2023, Broadband metamaterial absorbers based on magnetic composites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 576, tr. 170792.
60. Chen J., Tang F., ... Yang L., 2021, High efficiency broadband near-infrared absorbers based on tunable SiO₂-VO₂-MoS₂ multilayer metamaterials, *Results in Physics*, 26, tr. 104404.
61. Liu Q., Zhang C., 2023, Broadband and low-frequency sound absorption by a slit-perforated multi-layered porous metamaterial, *Engineering Structures*, 281, tr. 115743.
62. Lan H.W., Li Z.M., ... Bi M., 2023, Low-frequency broadband multilayer microwave metamaterial absorber based on resistive frequency selective surfaces, *Appl Opt*, 62(4), tr. 1096.
63. Xiong Y., Chen F., ... Luo H., 2022, Rational design and fabrication of optically transparent broadband microwave absorber with multilayer structure based on indium tin oxide, *Journal of Alloys and Compounds*, 920, tr. 166008.

64. Deng G., Sun H., ... Chi B., 2021, Enhanced broadband absorption with a twisted multilayer metal–dielectric stacking metamaterial, *Nanoscale Adv*, 3(16), tr. 4804–4809.
65. Wang Y., Liu Z., ... Wang J., 2025, Perfect absorption properties of a near-infrared super-surface perfect absorber based on a multilayer subwavelength array structure, *Physics Letters A*, 540, tr. 130395.
66. Yang X., Wang E., ... Shi Q., 2025, Multilayer stackable grouped acoustic metamaterial with optional sound absorption performance, *Journal of Applied Physics*, 137(12), tr. 123104.
67. Dong H., Gao C., ... Zhang H., 2022, Investigating on the electromagnetically induced absorption metamaterial in the terahertz region realized by the multilayer structure, *Physica B: Condensed Matter*, 639, tr. 413936.
68. Wang G., Wang T., ... Lim C.W., 2024, A novel 3D topological metamaterial for controllability of polarization-dependent multilayer elastic waves, *Composites Part B: Engineering*, 275, tr. 111341.
69. Rakhshani M.R., Rashki M., 2022, Metamaterial perfect absorber using elliptical nanoparticles in a multilayer metasurface structure with polarization independence, *Opt Express*, 30(7), tr. 10387.
70. Wang P., Zhang Y., ... Yan Z., 2023, Multifunctional polarization converter based on multilayer reconfigurable metasurface, *Defence Technology*, 28, tr. 136–145.
71. Zhang Y., Luan W., ... Yao J., 2022, Dual-Directional Broadband Linear-to-Linear Polarization Conversion Using Multi-layer Metamaterials, *Plasmonics*, 17(4), tr. 1411–1418.
72. Li Y.-T., Sun Y.-T.A., 2022, An investigation of electromagnetic interference shielding effectiveness with multilayer thin films material, *Thin Solid Films*, 753, tr. 139259.
73. Baghdad Bey A., Berka M., ... Mahdjoub Z., 2024, Easy-to-design wide stop-band multi-layer metamaterial filter based on symmetrical modified circular resonators for terahertz communication applications and electromagnetic interference shielding, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 607, tr. 172418.
74. Vovchenko L.L., Lozitsky O.V., ... Zagorodnii V.V., 2023, Optimization of multilayered electromagnetic shielding using mesh adaptive direct search, *Appl Nanosci*.
75. Momose T., Toma M., Kajikawa K., 2024, Ultrabroadband invisibility cloaking design of a concentric multilayered cylindrical metamaterial, *J Opt Soc Am B*, 41(8), tr. 1815.
76. Shi Y., Li M., ... Hong Z., 2021, High-efficiency transmissive invisibility cloaking based on all-dielectric multilayer frame structure metasurfaces, *Appl Opt*, 60(13), tr. 3909.
77. Farrokhfar M., Jarchi S., Keshtkar A., 2022, Multilayer metamaterial graphene sensor with high sensitivity and independent on the incident angle, *Optik*, 265, tr. 169536.
78. Sbeah Z.A., Adhikari R., ... Dwivedi R.P., 2023, High-sensitive plasmonic multilayer SiO₂/VO₂ metamaterial sensor, *Appl Phys A*, 129(8), tr. 596.

79. Rabbani Md.G., Hoque A., ... Soliman M.S., 2025, A mirror symmetric dodecagon resonator based double band ENG-metamaterial with multilayer tunability and sensing application, *Jnl of Sandwich Structures & Materials*, 27(1), tr. 205–234.
80. Huang C.-C., Chang R.-J., Cheng C.-W., 2021, Ultra-Low-Loss Mid-Infrared Plasmonic Waveguides Based on Multilayer Graphene Metamaterials, *Nanomaterials*, 11(11), tr. 2981.
81. Asadi A., 2025, Design of multilayer graphene metamaterials plasmonic waveguides with ultra-low-loss mid-infrared, *Optik*, 327, tr. 172327.
82. Wu Y.-D., Xu Y.-J., ... Cheng M.-H., 2022, Analytical and Numerical Analyses of Multilayer Photonic Metamaterial Slab Optical Waveguide Structures with Kerr-Type Nonlinear Cladding and Substrate, *Crystals*, 12(5), tr. 628.
83. Wen D., Yang H., ... Zhang J., 2013, Broadband metamaterial absorber based on a multi-layer structure, *Phys Scr*, 88(1), tr. 015402.
84. Fu P., Liu F., ... Yao J.Q., 2018, A broadband metamaterial absorber based on multi-layer graphene in the terahertz region, *Optics Communications*, 417, tr. 62–66.
85. Liu C., Dutton Z., ... Hau L.V., 2001, Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses, *Nature*, 409(6819), tr. 490–493.
86. Kaur A., Dar Z.I., ... Kaur P., 2020, EIT-based giant self-kerr-nonlinear behavior of multilevel X-scheme, *Materials Today: Proceedings*, 26, tr. 3482–3486.
87. Kim T.-T., Kim H.-D., ... Zhang S., 2018, Electrically Tunable Slow Light Using Graphene Metamaterials, *ACS Photonics*, 5(5), tr. 1800–1807.
88. Pasyar N., Yadipour R., Baghban H., 2017, Design of all-optical memory cell using EIT and lasing without inversion phenomena in optical micro ring resonators, *Optics Communications*, 395, tr. 241–248.
89. Hwang J.S., Tung B.S., Lee Y.P., 2018, Electromagnetically-induced Transparency in Metamaterials for the Potential Applications, *J Korean Phys Soc*, 72(12), tr. 1491–1501.
90. Zhang X., Xu N., ... Zhang W., 2015, Electromagnetically induced absorption in a three-resonator metasurface system, *Sci Rep*, 5(1), tr. 10737.
91. Reiten M.T., Roy Chowdhury D., ... Azad A.K., 2011, Resonance tuning behavior in closely spaced inhomogeneous bilayer metamaterials, *Applied Physics Letters*, 98(13), tr. 131105.
92. Tran C.M., Van Pham H., ... Do T.H., 2019, Creating Multiband and Broadband Metamaterial Absorber by Multiporous Square Layer Structure, *Plasmonics*, 14(6), tr. 1587–1592.
93. Dinh M.Q., Le M.T., ... Tung N.T., 2021, Unifying approach to multilayer metamaterials absorber for bandwidth enhancement, *Optics Communications*, 485, tr. 126725.
94. Alam A., Islam S.S., ... Islam M.T., 2020, Polarization-Independent Ultra-Wideband Metamaterial Absorber for Solar Harvesting at Infrared Regime, *Materials*, 13(11), tr. 2560.

95. Kumar R., Kumar P., 2022, Fabry–Pérot cavity resonance based metamaterial absorber for refractive index sensor at infrared frequencies, *Optics Communications*, 514, tr. 128142.
96. Almirall O., Fernández-García R., Gil I., 2022, Wearable metamaterial for electromagnetic radiation shielding, *The Journal of The Textile Institute*, 113(8), tr. 1586–1594.
97. Bağmancı M., Wang L., ... Unal E., 2024, Broadband multi-layered stepped cone shaped metamaterial absorber for energy harvesting and stealth applications, *Engineering Reports*, 6(11), tr. e12903.
98. Liu F.-Z., Huang J.-W., ... Zhang H.-F., 2024, Tunable origami metastructure based on liquid crystal for curvature sensing in terahertz band, *Physics of Fluids*, 36(8), tr. 087153.
99. Huray P.G., 2010, Maxwell's equations, *Wiley*, Hoboken, N.J.
100. Sellier A., Teperik T.V., De Lustrac A., 2013, Resonant circuit model for efficient metamaterial absorber, *Opt Express*, 21(S6), tr. A997.
101. Kuznetsov S.A., Arzhannikov A.V., Nikolaev N.A., 2017, High-performance spectrally selective pyroelectric detection of millimeter and submillimeter waves using ultra-thin metasurface absorbers, *EPJ Web Conf*, 149, tr. 02018.
102. Sun L., Cheng H., ... Wang J., 2012, Broadband metamaterial absorber based on coupling resistive frequency selective surface, *Opt Express*, 20(4), tr. 4675.
103. Trang P.T., Nguyen B.H., ... Tung N.T., 2016, Symmetry-Breaking Metamaterials Enabling Broadband Negative Permeability, *Journal of Elec Materi*, 45(5), tr. 2547–2552.
104. Zhu L., Dong L., 2022, Electromagnetically induced transparency metamaterials: theories, designs and applications, *J Phys D: Appl Phys*, 55(26), tr. 263003.
105. Bajcsy M., Zibrov A.S., Lukin M.D., 2003, Stationary pulses of light in an atomic medium, *Nature*, 426(6967), tr. 638–641.
106. Harshawardhan W., Agarwal G.S., 1996, Controlling optical bistability using electromagnetic-field-induced transparency and quantum interferences, *Phys Rev A*, 53(3), tr. 1812–1817.
107. Tassin P., Zhang L., ... Soukoulis C.M., 2012, Electromagnetically Induced Transparency and Absorption in Metamaterials: The Radiating Two-Oscillator Model and Its Experimental Confirmation, *Phys Rev Lett*, 109(18), tr. 187401.
108. Tassin P., Koschny T., Soukoulis C.M., 2012, Effective material parameter retrieval for thin sheets: Theory and application to graphene, thin silver films, and single-layer metamaterials, *Physica B: Condensed Matter*, 407(20), tr. 4062–4065.
109. Wang Z., Ma Y., ... Fu Y., 2022, A Thermal-Switchable Metamaterial Absorber Based on the Phase-Change Material of Vanadium Dioxide, *Nanomaterials*, 12(17), tr. 3000.
110. Andryieuski A., Zhukovsky S.V., Lavrinenko A.V., 2014, Rough metal and dielectric layers make an even better hyperbolic metamaterial absorber, *Opt Express*, 22(12), tr. 14975.

111. Ghaderi M., Shahmarvandi E.K., Wolffenbuttel R.F., 2018, CMOS-compatible mid-IR metamaterial absorbers for out-of-band suppression in optical MEMS, *Opt Mater Express*, 8(7), tr. 1696.
112. Huang X., Pan K., Hu Z., 2016, Experimental Demonstration of Printed Graphene Nano-flakes Enabled Flexible and Conformable Wideband Radar Absorbers, *Sci Rep*, 6(1), tr. 38197.
113. Liu L., Liu W., Song Z., 2020, Ultra-broadband terahertz absorber based on a multilayer graphene metamaterial, *Journal of Applied Physics*, 128(9), tr. 093104.
114. Liu N., Fu L., ... Giessen H., 2008, Plasmonic Building Blocks for Magnetic Molecules in Three-Dimensional Optical Metamaterials, *Advanced Materials*, 20(20), tr. 3859–3865.
115. Li T., Liu H., ... Zhang X., 2006, Coupling effect of magnetic polariton in perforated metal/dielectric layered metamaterials and its influence on negative refraction transmission, *Opt Express*, 14(23), tr. 11155.
116. Du L., Shi T., ... Huang X., 2022, Ultra broadband microwave metamaterial absorber with multiple strong absorption peaks induced by sandwiched water resonators, *Appl Phys A*, 128(10), tr. 864.
117. Tirkey M.M., Gupta N., 2021, Broadband Polarization-Insensitive Inkjet-Printed Conformal Metamaterial Absorber, *IEEE Trans Electromagn Compat*, 63(6), tr. 1829–1836.
118. Lei Y., Jia X., ... Zou T., 2024, An ultra-broadband multi-layer dielectric gradient honeycomb microwave absorber enhanced by the double layer metasurface, *Optical Materials*, 156, tr. 116009.
119. Zheng Z., Luo Y., ... Wu P., 2022, Thermal tuning of terahertz metamaterial absorber properties based on VO₂, *Phys Chem Chem Phys*, 24(15), tr. 8846–8853.
120. Ri K.-J., Kim J.-S., ... Ri C.-H., 2023, Tunable triple-broadband terahertz metamaterial absorber using a single VO₂ circular ring, *Optics Communications*, 542, tr. 129573.
121. Jiang Z., Leng J., ... Shi Q., 2023, Flexible Terahertz Metamaterials Absorber based on VO₂, *Photonics*, 10(6), tr. 621.
122. Ri K.-J., Ri C.-H., 2023, Tunable dual-broadband terahertz metamaterial absorber based on a simple design of slotted VO₂ resonator, *Optics Communications*, 536, tr. 129377.
123. Hasan, R., & Anjum, N., (2025), Design and Analysis of a Vanadium Dioxide-Based Ultra-Broadband Terahertz Metamaterial Absorber, *arXiv preprint arXiv:2508.05590*.
124. Wei H., Gu J., ... Li Y., 2024, Tunable VO₂ cavity enables multispectral manipulation from visible to microwave frequencies, *Light Sci Appl*, 13(1), tr. 54.
125. Hossain A.B.M.A., Khaleque A., 2024, Multi-functional and actively tunable terahertz metamaterial absorber based on graphene and vanadium dioxide composite structure, *Opt Continuum*, 3(6), tr. 921.
126. Schubert M., Knight S., ... Darakchieva V., 2022, Terahertz electron paramagnetic resonance generalized spectroscopic ellipsometry: The magnetic

- response of the nitrogen defect in 4H-SiC, *Applied Physics Letters*, 120(10), tr. 102101.
127. Hu Y., Wu X., ... Huang X., 2024, Comparison of the Casimir force between SiC plates with different permittivity models: Lorentz model and Palik data, *Materials Today Communications*, 38, tr. 108489.
 128. Aouthu S., Gosula R.S.R., ... Prasad N., 2025, A polarization-insensitive broadband metamaterial absorber including a sandwiched graphene material sheet for multitudinous terahertz applications, *Diamond and Related Materials*, 155, tr. 112262.
 129. Barzegar-Parizi S., Ebrahimi A., Ghorbani K., 2024, Two bits dual-band switchable terahertz absorber enabled by composite graphene and vanadium dioxide metamaterials, *Sci Rep*, 14(1), tr. 5818.
 130. Ma, S., Zhang, Y., Fu, W., Huang, S., Zhu, Y. F., & Luo, X., 2024, Terahertz metamaterial absorber with switchable function between broadband and dual narrowband, *Results in Physics*, 56, tr.107283..
 131. Gao C., Zhang H., 2022, Switchable Metasurface with Electromagnetically Induced Transparency and Absorption Simultaneously Realizing Circular Polarization-Insensitive Circular-to-Linear Polarization Conversion, *Annalen der Physik*, 534(7), tr. 2200108.
 132. Zhu D.-D., Lv Y., ... Zhang H.-F., 2023, Switching of electromagnetically induced transparency and absorption of graphene metastructure with the three resonators, *Waves in Random and Complex Media*, tr. 1–25.
 133. Li Y., Liberal I., Engheta N., 2019, Structural dispersion–based reduction of loss in epsilon-near-zero and surface plasmon polariton waves, *Sci Adv*, 5(10), tr. eaav3764.