

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Nguyễn Thị Minh

**NGHIÊN CỨU CẤU TRÚC VÀ TÍNH CHẤT
CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA ĐA CHỨC NĂNG HẤP THỤ
VÀ CHUYỂN ĐỔI PHÂN CỰC SÓNG ĐIỆN TỪ**

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

Nguyễn Thị Minh

NGHIÊN CỨU CẤU TRÚC VÀ TÍNH CHẤT
CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA ĐA CHỨC NĂNG HẤP THỤ
VÀ CHUYỂN ĐỔI PHÂN CỰC SÓNG ĐIỆN TỪ

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Vật liệu điện tử

Mã số: 9440123

Xác nhận của Học viện
Khoa học và Công nghệ



Nguyễn Thị Trung

Người hướng dẫn 1
(Kí, ghi rõ họ tên)

PGS.TS. Nguyễn Thị Quỳnh Hoa

Người hướng dẫn 2
(Kí, ghi rõ họ tên)

GS.TS. Vũ Đình Lâm

Hà Nội - 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án: “**Nghiên cứu cấu trúc và tính chất của vật liệu biến hoá đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ**” là công trình nghiên cứu của tôi, dưới sự hướng dẫn của PGS.TS. Nguyễn Thị Quỳnh Hoa và GS.TS. Vũ Đình Lâm. 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 kì một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của tôi. 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 15 tháng 07 năm 2025

Tác giả luận án



Nguyễn Thị Minh

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên, tôi xin được gửi lời cảm ơn chân thành và sâu sắc nhất tới PGS.TS. Nguyễn Thị Quỳnh Hoa và GS.TS. Vũ Đình Lâm đã tận tình chỉ dẫn, định hướng, hỗ trợ từ những bước nghiên cứu đầu tiên cho đến khi hoàn thành luận án. Những góp ý quý báu, kinh nghiệm thực tiễn và những lời động viên, khích lệ trong nghiên cứu của Thầy/Cô đã giúp tôi định hướng rõ ràng và vượt qua những khó khăn trong quá trình nghiên cứu.

Xin chân thành cảm ơn Ban Lãnh đạo, các Phòng chức năng của Học viện Khoa học và Công nghệ, Ban Lãnh đạo và các Thầy, Cô Viện Khoa học vật liệu đã giảng dạy về kiến thức, tạo điều kiện về môi trường học tập, nghiên cứu. Nhờ sự hỗ trợ về cơ sở vật chất, trang thiết bị nghiên cứu hiện đại cùng như môi trường học thuật chuyên nghiệp, tôi đã có cơ hội tiếp cận và vận dụng những kiến thức chuyên sâu phục vụ cho nghiên cứu.

Xin chân thành cảm ơn PGS.TS. Lê Đức Tuyên, PGS.TS. Bùi Xuân Khuyển, TS. Bùi Sơn Tùng, các anh chị em nghiên cứu tại Phòng Vật liệu biến hóa và ứng dụng, Viện Khoa học vật liệu đã chia sẻ kiến thức, kinh nghiệm và hỗ trợ trong quá trình thực hiện chế tạo, đo đạc mẫu thực nghiệm.

Xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Vinh, Trung tâm Kiểm định chất lượng giáo dục đã tạo điều kiện về thời gian, công việc giúp tôi tập trung học tập và nghiên cứu.

Cuối cùng, xin cảm ơn những người thân trong gia đình, bạn bè, đồng nghiệp đã luôn bên cạnh động viên và tạo mọi điều kiện thuận lợi nhất để tôi hoàn thành luận án này.

Hà Nội, ngày 15 tháng 07 năm 2025

Tác giả luận án

(Ký và ghi rõ họ tên)



Nguyễn Thị Minh

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	iii
DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT	v
DANH MỤC BẢNG	vii
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ	viii
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU BIẾN HOÁ HẤP THỤ VÀ CHUYỂN ĐỔI PHÂN CỰC SÓNG ĐIỆN TỪ	6
1.1. Tổng quan về vật liệu biến hóa	6
1.1.1. Các giai đoạn phát triển của vật liệu biến hóa	6
1.1.2. Phân loại và tính chất của vật liệu biến hóa	7
1.1.3. Một số ứng dụng của vật liệu biến hóa	9
1.2. Vật liệu biến hóa hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ.....	15
1.2.1. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ và tiềm năng ứng dụng.....	15
1.2.2. Vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ và ứng dụng.....	19
1.3. Vật liệu biến hóa đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ.....	27
1.3.1. Một số phương pháp thiết kế vật liệu biến hóa đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ	28
1.3.2. Ứng dụng của vật liệu biến hoá đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ	39
1.4. Kết luận chương 1	41
CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	43
2.1. Phương pháp tính toán lí thuyết	43
2.2. Phương pháp mô phỏng	47
2.3. Phương pháp chế tạo và đo đạc thực nghiệm.....	53
2.4. Kết luận chương 2	58
CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ CẤU TRÚC VÀ KHẢO SÁT ĐẶC TRƯNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HOÁ CÓ ĐẶC TÍNH HẤP THỤ VÀ ĐẶC TÍNH CHUYỂN ĐỔI PHÂN CỰC SÓNG ĐIỆN TỪ	59
3.1. Thiết kế cấu trúc và khảo sát tính chất hấp thụ của MA hoạt động vùng tần số THz.....	59

3.1.1. Thiết kế cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ hoạt động vùng tần số THz	59
3.1.2. Khảo sát tính chất hấp thụ của MA hoạt động vùng tần số THz.....	62
3.1.3. Ảnh hưởng của độ dày lớp cộng hưởng đến hiệu suất hấp thụ của MA	65
3.1.4 Ảnh hưởng của góc tới đến hiệu suất hấp thụ của MA	66
3.2. Thiết kế cấu trúc và khảo sát tính chất của vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ	68
3.2.1. Thiết kế cấu trúc MPC cho ứng dụng băng tần S, C.....	69
3.2.2. Thiết kế cấu trúc MPC cho ứng dụng băng tần C, X và Ku.....	79
3.2.3. Thiết kế cấu trúc MPC hoạt động vùng tần số THz	86
3.3. Kết luận chương 3	89
CHƯƠNG 4. THIẾT KẾ VÀ TỐI ƯU CẤU TRÚC VẬT LIỆU BIẾN HOÁ ĐA CHỨC NĂNG HẤP THỤ VÀ CHUYỂN ĐỔI PHÂN CỰC SÓNG ĐIỆN TỪ	91
4.1. Thiết kế và tối ưu cấu trúc MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực hoạt động vùng tần số GHz.....	91
4.1.1. Thiết kế cấu trúc MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực tích hợp nước.....	91
4.1.2. Khảo sát tính chất của MFM ở chế độ hấp thụ.....	95
4.1.3. Khảo sát tính chất của MFM hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực..	98
4.1.4. Khảo sát ảnh hưởng của các thông số vật liệu, kích thước đến hiệu suất của MFM.....	102
4.2. Thiết kế và tối ưu cấu trúc MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số THz	106
4.2.1. Thiết kế cấu trúc MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực tích hợp vật liệu chuyển pha VO ₂	106
4.2.2. Khảo sát tính chất của MFM tích hợp VO ₂ hoạt động ở chế độ hấp thụ ...	107
4.2.3. Khảo sát tính chất của MFM tích hợp VO ₂ ở chế độ chuyển đổi phân cực	111
4.2.4. Khảo sát ảnh hưởng của tham số cấu trúc và các lớp vật liệu lên tính chất hấp thụ và chuyển đổi phân cực	116
4.3. Kết luận chương 4	120
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	122
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN	124
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO	125

DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

1. Danh mục các kí hiệu

$A(\omega)$	Thành phần năng lượng sóng bị hấp thụ
ABS	Độ hấp thụ
E	Điện trường
H	Từ trường
k	Hướng truyền sóng
PCR	Hiệu suất chuyển đổi phân cực
$R(\omega)$	Thành phần năng lượng sóng phản xạ
R_s	Điện trở của Đi-ốt PIN
R_{xy}	Hệ số phản xạ vuông góc
R_{yy}	Hệ số phản xạ đồng phân cực
S_{11}	Hệ số phản xạ
S_{21}	Hệ số truyền qua
$T(\omega)$	Thành phần năng lượng sóng truyền qua
Z	Trở kháng

2. Danh mục các chữ viết tắt

Chữ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
2D	Two-Dimensional	Hai chiều
3D	Three-Dimensional	Ba chiều
CST	Computer Simulation Technology	Công nghệ mô phỏng máy tính
ECR	Energy Conversion Ratio	Tỉ lệ chuyển đổi năng lượng
FIT	Finite Integration Technique	Kĩ thuật tích phân hữu hạn
FSS	Frequency Selective Surfaces	Bề mặt chọn lọc tần số
LH	Left-handed	Vật liệu theo quy tắc bàn tay trái
MMs	Metamaterials	Vật liệu biến hóa
MFM	Multifunction Metamaterial	Vật liệu biến hóa đa chức năng
MA	Metamaterials Absorber	Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ
MPC	Metamaterials Polarization Converter	Vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ
PCB	Printed Circuit Board	Bảng mạch in
RBW	Relative Bandwidth	Băng thông tương đối
RCS	Radar Cross Section	Tiết diện phản xạ Ra đa
RH	Right-handed	Vật liệu theo quy tắc bàn tay phải
SRRs	Split-Ring Resonators	Vòng cộng hưởng có rãnh
TE	Transmission Electric	Điện trường ngang
TM	Transverse Magnetic	Từ trường ngang
VNA	Vecter Network Analyzer	Máy phân tích mạng véctơ

DANH MỤC BẢNG

Bảng 3.1. <i>Bảng kích thức các tham số của MA sử dụng VO₂</i>	60
Bảng 3.2. <i>Sự thay đổi độ dẫn của vật liệu VO₂ vào nhiệt độ</i>	62
Bảng 3.3. <i>So sánh hiệu suất của cấu trúc MA đề xuất với các cấu trúc MA sử dụng VO₂ đã được công bố</i>	68
Bảng 3.4. <i>Giá trị các tham số tối ưu ô đơn của MPC đề xuất</i>	70
Bảng 3.5. <i>So sánh hiệu suất của cấu trúc đề xuất với các cấu trúc công bố gần đây</i>	78
Bảng 4.1. <i>Kích thước tối ưu ô đơn vị của MFM đề xuất</i>	94
Bảng 4.2. <i>So sánh hiệu suất của MFM đề xuất hoạt động vùng tần số GHz với các MFM hoạt động vùng tần số GHz được công bố gần đây</i>	105
Bảng 4.3. <i>So sánh hiệu suất của MFM đề xuất hoạt động vùng tần số THz với các MFM tiên tiến hoạt động vùng tần số THz được công bố gần đây</i>	119

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

Hình 1.1. MMs đầu tiên do Pendry đề xuất: (a) Cấu trúc dây dẫn mảnh (b) Cấu trúc SRRs (c) Dây tuần hoàn SRRs	7
Hình 1.2. Phân loại vật liệu theo độ điện thẩm (ϵ) và từ thẩm (μ)	8
Hình 1.3. (a) Mô hình nguyên tử vật liệu trong tự nhiên và (b) Nguyên tử MMs	9
Hình 1.4. Mô hình mô phỏng MMs ứng dụng trong thiết kế ăng-ten hoạt động tại tần số 1.88 GHz (a) ô đơn vị, (b) biểu đồ biên độ, pha của hệ số phản xạ và hệ số truyền qua ..	10
Hình 1.5. Mô hình ứng dụng MMs trong cải thiện độ lợi của ăng-ten: (a) MMs xung quanh phần tử bức xạ, (b) MMs làm tải của ăng-ten, (c) MMs ở lớp trên và dưới phần tử bức xạ	11
Hình 1.6. Cảm biến sinh học (a) hình ảnh từ trên xuống của một đường truyền vi dải, (b) mặt cắt ngang của đường truyền vi dải với một cặp cộng hưởng vòng có rãnh và sơ đồ phân bố trường điện từ	13
Hình 1.7. Minh họa một vật được “tàng hình” khi được che phủ bởi lớp vật liệu biến hoá (a) vật được nhìn thấy, (b) vật được che phủ bởi lớp vật liệu và (c) Vật tàng hình nhờ lớp vật liệu biến hoá	14
Hình 1.8. (a) Hình ảnh 2D của MMs có chiết suất thay đổi bao quanh vật cần tàng hình, (b) Cấu trúc ô cơ sở	14
Hình 1.9. MA đề xuất bởi Landy (a) ô cơ sở (b) mặt trên của ô cơ sở và (c) độ hấp thụ	15
Hình 1.10. Hình ảnh cấu trúc và phổ hấp thụ của (a) MA đa dải tần, (b) MA băng rộng	16
Hình 1.11. Mô hình cấu trúc MA 3 lớp kim loại – điện môi – kim loại: (a) dạng đĩa tròn, (b) dạng vòng tròn và (c) dạng hình vuông.	17
Hình 1.12. Phân loại ứng dụng của MA	19
Hình 1.13. Hình ảnh MPC (a) chuyển đổi phân cực sóng truyền qua và (b) chuyển đổi phân cực sóng phản xạ	20
Hình 1.14. Phân tích điện trường tới phân cực y và phản xạ phân cực x thành các thành phần u,v.....	22
Hình 1.15. Cấu trúc ô cơ sở của MPC đề xuất	23
Hình 1.16. (a) Độ lớn và pha của các hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực vuông góc; (b) Hiệu suất chuyển đổi phân cực của MPC đề xuất	24
Hình 1.17. Mô hình 3D của FSS	25

Hình 1.18. Mô hình 3D của MPC phản xạ được đề xuất	25
Hình 1.19. Hình ảnh 3D của cấu trúc MPC kết hợp FSS làm mái che tàng hình ...	25
Hình 1.20. Hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực vuông góc của cấu trúc đề xuất	26
Hình 1.21. (a) lớp trên của ô đơn vị; (b) lớp giữa của ô đơn vị; (c) hình chiếu bên của ô đơn vị và (d) mạch tương đương của điốt PIN ở chế độ bật và tắt	29
Hình 1.22. Độ hấp thụ và PCR của cấu trúc đề xuất tương ứng với hai trạng thái tắt, bật của điốt PIN	30
Hình 1.23. Độ hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi trong mô phỏng và thực nghiệm ..	30
Hình 1.24. Ô cơ sở của MFM đề xuất (a) Hình ảnh 3D, (b) hình ảnh nhìn từ trên xuống, (c) mặt dưới tấm cấp nguồn	31
Hình 1.25. Hiệu suất chuyển đổi phân cực và các hệ số phản xạ khi điốt ở trạng thái tắt và (b) độ hấp thụ và các hệ số phản xạ khi điốt ở trạng thái bật.....	31
Hình 1.26. MMs đề xuất với (a) (b) cấu trúc phẳng và (c) (d) cấu trúc zig-zag	32
Hình 1.27. Hiệu suất (a) hấp thụ và (b) chuyển đổi phân cực của cấu trúc zig-zag.....	33
Hình 1.28. (a) Cấu trúc ô đơn vị và (b) hiệu suất chuyển đổi phân cực và độ hấp thụ của MFM đề xuất	34
Hình 1.29. Cấu trúc MMs đa chức năng (a) cấu trúc ô đơn vị, (b) lớp graphene trong một ô đơn vị.....	35
Hình 1.30. Kết quả mô phỏng cấu trúc đề xuất ở chế độ hấp thụ và chế độ chuyển đổi phân cực.....	35
Hình 1.31. Cấu trúc ô đơn vị của MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực do Z. Y. Song và cộng sự đề xuất	37
Hình 1.32. (a) Độ hấp thụ và (b) hệ số chuyển đổi vuông góc tương ứng với VO ₂ ở pha kim loại và pha điện môi.....	37
Hình 1.33. (a) Hình ảnh 3D ô đơn vị của cấu trúc MMs đa chức năng và (b) hình ảnh mặt trên của ô đơn vị	38
Hình 1.34. (a) (b) Biên độ hệ số phản xạ và độ lệch pha cho sóng tới phân cực TE và (c) Phở phản xạ, phở truyền qua và phở hấp thụ của cấu trúc đề xuất	39
Hình 1.35. (a) Cấu trúc sơ đồ của MFM đề xuất. (b) Mô hình 3D, (c) mặt trên của ô đơn vị và (d) lớp đồng ở giữa	41
Hình 1.36. (a) Phở mô phỏng hệ số phản xạ, hiệu suất hấp thụ và (b) phở mô phỏng hệ số phản xạ, hiệu suất chuyển đổi phân cực và hiệu suất hấp thụ của MFM đề xuất	41

Hình 2.1. (a) Mô hình của MMs ba lớp kim loại – điện môi – kim loại truyền thông (b) Sơ đồ mạch điện tương đương	44
Hình 2.2. Kết quả tính toán trở kháng hiệu dụng của MA được đề xuất	46
Hình 2.3. Các bước thực hiện thiết kế và nghiên cứu các đặc trưng của MMs, MFM dùng phương pháp mô phỏng trên phần mềm CST	49
Hình 2.4. Giao diện mô phỏng trên phần mềm CST	49
Hình 2.5. Thiết lập điều kiện biên cho ô cơ sở.....	51
Hình 2.6. Kết quả mô phỏng hệ số phản xạ S_{11} , S_{21} hiển thị trên phần mềm CST	52
Hình 2.7. Kết quả mô phỏng bằng phần mềm CST: (a) Phân bố điện trường, từ trường và (b) Phân bố dòng điện bề mặt tại các tần số cộng hưởng	53
Hình 2.8. Quá trình thực hiện chế tạo mẫu và đo đạc thực nghiệm	54
Hình 2.9. Các thiết bị dùng chế tạo MMs tại phòng thí nghiệm của Viện Khoa học vật liệu	54
Hình 2.10. Ảnh chụp MMs sau khi chế tạo có đặc tính chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số GHz.....	56
Hình 2.11. Hình ảnh mẫu MFM được chế tạo bằng phương pháp quang khắc và in 3D.....	57
Hình 2.12. Thiết lập phép đo cho mẫu MPC hoạt động ở băng tần S và C	58
Hình 3.1. (a) Cấu trúc MA sử dụng VO_2 dạng đĩa tròn và (b) sơ đồ mạch tương đương của cấu trúc.....	60
Hình 3.2. Phổ hấp thụ mô phỏng của MA sử dụng VO_2 dạng đĩa tròn ở pha kim loại và pha điện môi	61
Hình 3.3. Ô cơ sở của MA sử dụng VO_2 cấu trúc đĩa tròn bị khoét bởi hình vuông cạnh s: (a) ảnh 3D và (b) ảnh mặt trên ô cơ sở	62
Hình 3.4. (a) Phổ phản xạ, truyền qua mô phỏng và (b) Phổ hấp thụ mô phỏng với các giá trị độ dẫn khác nhau của VO_2	63
Hình 3.5. Phân phối điện trường mô phỏng tại các tần số cộng hưởng 1.56 THz và 2.95 THz với độ dẫn khác nhau của VO_2	64
Hình 3.6. Phân bố điện trường mô phỏng trong ô đơn vị đối với sóng tới phân cực y ở tần số cộng hưởng khi VO_2 có độ dẫn $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ trong (a) mặt phẳng xz và (b) mặt phẳng yz được xác định tại vị trí điện trường tập trung.....	64
Hình 3.7. Kết quả tính toán trở kháng vào của MA với VO_2 ở pha kim loại.....	65
Hình 3.8. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của độ dày lớp VO_2 đến hiệu suất hấp thụ	

.....	66
Hình 3.9. Phổ hấp thụ mô phỏng của MA đề xuất với sự thay đổi góc tới cho phân cực TE và TM với: (a), (b) pha kim loại và (c), (d) pha điện môi.....	66
Hình 3.10. Phổ hấp thụ mô phỏng của MA đề xuất với sự thay đổi của góc phân cực với (a) pha kim loại và (b) pha điện môi của VO ₂	67
Hình 3.11. (a) Hình ảnh 3D; (b) Hình ảnh lớp trên ô đơn vị của MPC đề xuất	69
Hình 3.12. (a) Biên độ mô phỏng của các hệ số phản xạ và (b) phổ PCR mô phỏng dưới tác động của sóng tới ở chế độ TE.....	70
Hình 3.13. (a) Sơ đồ phân tách điện trường theo trục u, v và biên độ của các hệ số phản xạ theo trục u và v; (b) Độ lệch pha giữa hệ số phản xạ theo hai thành phần uu và vv.	71
Hình 3.14. Kết quả mô phỏng độ elip và góc phương vị phân cực của sóng tới phân cực y.....	73
Hình 3.15. Phân bố dòng điện mô phỏng tại bề mặt của lớp trên và lớp dưới tại bốn tần số cộng hưởng.	73
Hình 3.16. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của độ dày lớp không khí đến hiệu suất chuyển đổi phân cực của MPC đề xuất ở chế độ TE	75
Hình 3.17. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của góc sóng tới đến hiệu suất của MPC.....	76
Hình 3.18. (a) Hình ảnh MPC được chế tạo; (b) Thiết lập phép đo các đặc trưng của mẫu.....	77
Hình 3.19. Kết quả mô phỏng, kết quả đo đạc bằng thực nghiệm hệ số phản xạ và hiệu suất chuyển đổi phân cực của MPC được đề xuất ở chế độ (a), (c) điện trường (TE) và (b), (d) từ trường (TM)	77
Hình 3.20. Sơ đồ của MPC được đề xuất: (a) hình 3D, (b) mặt trước và (c) mặt cắt ngang của ô đơn vị	79
Hình 3.21. (a) Biên độ mô phỏng của các hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực vuông góc dưới sóng tới phân cực y. (b) phổ PCR và ECR của MPC đề xuất.....	80
Hình 3.22. Góc elip (η) và góc phương vị phân cực (θ) đối với sóng tới phân cực y.....	81
Hình 3.23. Sơ đồ phân tách điện trường theo hướng trục u và v.	81
Hình 3.24. Kết quả mô phỏng: (a) biên độ của các hệ số phản xạ và (b) độ lệch pha của các hệ số phản xạ theo hướng trục u và v	82
Hình 3.25. Kết quả mô phỏng cho (a), (c), (e), và (g) điện trường và (b), (d), (f), và (h) từ trường của bộ chuyển đổi được đề xuất ở các tần số cộng hưởng lần lượt là	

4.35, 7.42, 12.39 và 13.87 GHz	82
Hình 3.26. Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt lớp trên (a), (c), (e), và (g) lớp trên cùng và (b), (d), (f), và (h) lớp dưới cùng của MPC được đề xuất ở các tần số cộng hưởng lần lượt là 4.35, 7.42, 12.39 và 13.87 GHz.....	83
Hình 3.27. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của độ dày khe hở không khí đến PCR của MPC được đề xuất.....	83
Hình 3.28. Phổ PCR mô phỏng của MPC đề xuất đối với các góc tới khác nhau cho phân cực (a) TE và (b) TM.....	84
Hình 3.29. Thiết lập phép đo cho mẫu MPC sau khi được chế tạo.....	85
Hình 3.30. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm của các hệ số phản xạ và PCR của chúng đối với góc tới của (a) và (c) 10° và 30° (b) và (d).....	85
Hình 3.31. Hình ảnh cấu trúc ô cơ sở của MPC hoạt động vùng tần số THz (a) 3D, (b) mặt trên và (c) mặt bên.....	86
Hình 3.32. Kết quả mô phỏng (a) Biên độ của hệ số phản xạ đồng cực và phản xạ vuông góc (b) Hiệu suất chuyển đổi và độ lệch pha của các hệ số phản xạ	87
Hình 3.33. Kết quả mô phỏng phân bố điện trường và dòng điện tại các tần số cộng hưởng.....	88
Hình 3.34. Hiệu suất mô phỏng của MPC ở chế độ (a) TE và (b) TM.....	89
Hình 4.1. Sự thay đổi của hằng số điện môi (ϵ') và hệ số tổn hao (ϵ'') theo tần số ở nhiệt độ phòng 20°C	92
Hình 4.2. Minh họa MMs đa chức năng (a) chuyển đổi phân cực và (b) hấp thụ gần tuyệt đối bằng cách tích hợp nước tinh khiết	93
Hình 4.3. Hình ảnh ô đơn vị của MFM đề xuất: (a) Hình ảnh 3D, (b) hình ảnh nhìn từ trên xuống, (c) hình ảnh mặt cắt ngang của ô đơn vị	93
Hình 4.4. Ảnh chụp mẫu chế tạo: (a) nhìn từ trên xuống của lớp kim loại ở chế độ chuyển đổi phân cực, (b) nhìn từ trên xuống của bình chứa nước ở chế độ hấp thụ và (c) lớp đất và hình ảnh 3D của mẫu chế tạo.....	94
Hình 4.5. Hiệu suất hấp thụ (đường nét liền) và chuyển đổi phân cực (đường nét đứt) tương ứng với khi MFM có tích hợp nước và không tích hợp nước	95
Hình 4.6. Kết quả tính toán phần thực và phần ảo trở kháng vào của MFM.....	96
Hình 4.7. Mặt cắt ngang của mật độ tổn hao công suất ở tần số cộng hưởng (a) 18.8 GHz và (b) 23 GHz.....	97
Hình 4.8. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của (a) góc tới và (b) góc phân cực đến hiệu suất hấp thụ ở chế độ TE và TM	97

Hình 4.9. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của mức nước đến hiệu suất hấp thụ của MFM đề xuất.....	98
Hình 4.10. Biên độ của hệ số phản xạ đồng phân cực, hệ số phản xạ phân cực vuông góc và pha của chúng	99
Hình 4.11. Hiệu suất chuyển đổi phân cực và hiệu suất chuyển đổi năng lượng mô phỏng của MFM đề xuất	99
Hình 4.12. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của PCR vào góc tới ở chế độ (a) điện trường TE và (b) từ trường TM	100
Hình 4.13. Kết quả mô phỏng (a) biên độ và (b) độ lệch pha của hệ số phản xạ đồng phân cực, phân cực vuông góc theo trục uv.....	101
Hình 4.14. Phân bố dòng điện mô phỏng ở lớp kim loại trên cùng (a - d) và lớp kim loại dưới cùng (e - h) trong một ô đơn vị của MFM đề xuất tại các tần số cộng hưởng khác nhau.....	101
Hình 4.15. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của hiệu suất (a) chuyển đổi phân cực và (b) hấp thụ vào hằng số điện môi và độ tổn thất của vật liệu nhựa	103
Hình 4.16. Kết quả mô phỏng hiệu suất (a) chuyển đổi phân cực và (b) hấp thụ với tỉ lệ khác nhau của kích thước ô đơn vị	103
Hình 4.17. Kết quả mô phỏng và đo đạc (b) hiệu suất chuyển đổi phân cực và (c) hiệu suất hấp thụ	104
Hình 4.18. Cấu trúc ô cơ sở của MMs: (a) Hình ảnh 3D, góc nhìn từ trên xuống của (b) tấm cộng hưởng cho chế độ hấp thụ và (c) tấm cộng hưởng cho chế độ chuyển đổi phân cực..	107
Hình 4.19. Phổ hấp thụ mô phỏng của MFM đề xuất khi VO ₂ ở pha kim loại.....	108
Hình 4.20. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của độ hấp thụ vào góc tới cho MFM hoạt động ở chế độ hấp thụ (a, c) phân cực TE và (b, d) phân cực TM.....	108
Hình 4.21. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của độ hấp thụ vào góc phân cực (ϕ) cho MFM hoạt động ở chế độ hấp thụ ở (a) Phân cực TE và (b) Phân cực TM	109
Hình 4.22. Kết quả tính toán trở kháng vào của MFM được đề xuất ở chế độ hấp thụ.....	110
Hình 4.23. (a) Sơ đồ mạch điện tương đương ô đơn vị của MFM đề xuất và (b) sơ đồ mạch tương đương của MFM đề xuất ở chế độ hấp thụ	110
Hình 4.24. Phân bố điện trường mô phỏng trong ô đơn vị đối với sóng tới phân cực y ở tần số cộng hưởng trong (a) (b) mặt phẳng XY (nhìn từ trên xuống) và (c) (d) mặt phẳng XZ được xác định tại vị trí bằng các đường đứt nét màu đen.....	111

Hình 4.25. Phổ hiệu suất chuyển đổi phân cực mô phỏng khi VO ₂ ở pha điện môi...	112
Hình 4.26. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của PCR vào góc quay (α) trong điều kiện sóng tới vuông góc với bề mặt vật liệu (α là góc giữa đường cơ sở dài của miếng cộng hưởng vàng và đường chéo của ô đơn vị)	113
Hình 4.27. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của PCR vào góc tới của MFM được đề xuất hoạt động ở chế độ PC: (a, c) chế độ TE và (b, d) chế độ TM.....	114
Hình 4.28. (a) Sơ đồ phân tách điện trường tới và điện trường phản xạ theo trục u, v, (b) độ lớn của hệ số phản xạ và độ lệch pha của hệ số phản xạ theo hai thành phần uu và vv... ..	115
Hình 4.29. (a–e) phân bố điện trường mô phỏng và phân bố dòng điện mô phỏng: (f–j) ở bề mặt lớp trên cùng và (k–o) ở bề mặt lớp dưới cùng của MFM hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực tại các tần số cộng hưởng.....	116
Hình 4.30. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của hiệu suất hấp thụ và PC vào độ dày của các lớp điện môi: (a) h ₂ và (b) h ₁	117
Hình 4.31. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của các thông số tầng trên đến hiệu suất hoạt động của tầng dưới (a) khoảng cách từ tâm đến rìa bên trong hình hoa, (b) khoảng cách từ tâm đến đỉnh hình hoa và (c) độ dày lớp điện môi tầng trên.....	118
Hình 4.32. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của lớp nền kim loại vàng đến hiệu suất của MFM trong (a) chế độ hấp thụ và (b) chế độ chuyển đổi phân cực	119

MỞ ĐẦU

Trong số các loại vật liệu nhân tạo đã được nghiên cứu và phát triển, vật liệu biến hóa (Metamaterials - MMs) thu hút sự quan tâm lớn từ cộng đồng khoa học, đặc biệt là trong lĩnh vực vật liệu điện từ. MMs đã cho thấy nhiều đặc tính độc đáo chưa từng có, chẳng hạn như chiết suất âm [1], hiệu ứng Cherenkov ngược [2], hiệu ứng Doppler ngược [3] và khả năng hấp thụ gần tuyệt đối sóng điện từ [1, 4]. Gần đây, các nghiên cứu về MMs tập trung vào việc điều khiển cấu trúc và tính chất của chúng nhằm định hướng cho các ứng dụng thực tiễn. Một số ứng dụng đầy triển vọng hiện nay của MMs bao gồm thiết kế bộ hấp thụ và bộ chuyển đổi phân cực sóng điện từ.

Các nghiên cứu về MMs hấp thụ sóng điện từ (Metamaterials Absorber - MA) chủ yếu tập trung vào việc mở rộng dải tần làm việc, nâng cao hiệu suất hấp thụ, và điều chỉnh vùng tần số hoạt động từ dải tần số vi ba đến dải tần số ánh sáng. Đồng thời, các nghiên cứu cũng chú trọng giảm sự ảnh hưởng của phân cực sóng và góc sóng tới đối với hiệu suất hấp thụ. Ngoài ra, với khả năng điều khiển biên độ và pha sóng của MMs, vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ (Metamaterials Polarization Converter - MPC) cũng đang nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu. Những ứng dụng tiềm năng của MPC bao gồm giảm phản xạ radar (Radar Cross Section - RCS), ăng-ten thông minh, và nhiều ứng dụng khác. Các nghiên cứu về MPC tập trung vào việc cải thiện hiệu suất chuyển đổi và mở rộng băng thông hoạt động ở các dải tần số khác nhau. Mặc dù các nghiên cứu về MMs đã đạt được hiệu năng hoạt động cao và thiết kế kích thước nhỏ gọn trong ứng dụng thiết kế bộ hấp thụ hoặc bộ chuyển đổi phân cực sóng điện từ, nhưng các cấu trúc này hiện tại chỉ hoạt động với từng chức năng riêng lẻ là hấp thụ hoặc chuyển đổi phân cực [5-9]. Trong khi đó, một số hệ thống yêu cầu tính di động, kích thước nhỏ gọn và khả năng hoạt động đa chức năng. Đặc biệt, các đặc tính như chuyển đổi phân cực và hấp thụ sóng điện từ đóng vai trò quan trọng trong các thành phần đo lường điện từ trường, thiết kế ăng-ten, cũng như các ứng dụng đòi hỏi hệ số RCS thấp [6]. Cho đến nay, một số nghiên cứu ban đầu về vật liệu biến hóa đa chức năng (Multifunction Metamaterial - MFM) kết hợp khả năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ đã được đề xuất. Các nghiên cứu này chủ yếu sử dụng các phương pháp như: (1) điều khiển cơ học để thay đổi cấu trúc nhằm đạt được hiệu suất hoạt động mong muốn trong đó thường sử dụng cấu trúc zig-zag hoặc origami có thể thay đổi hình dạng để điều chỉnh tính chất hoạt động [10, 11]; (2) tích hợp các linh kiện điện tử như Diốt [12-14]; (3) tích hợp vật liệu có khả năng thay đổi độ dẫn điện như graphene hoặc VO_2 có thể được sử dụng để điều chỉnh tính chất hấp thụ và chuyển đổi phân cực mà không làm thay đổi cấu trúc thiết kế ban đầu [5, 15, 16] [17]; (4) tích hợp vật liệu nước, đây là

phương pháp mới và có tiềm năng nhờ nước có tổn thất điện môi cao trong dải tần số rộng giúp hiệu quả trong hấp thụ băng rộng [18-20]. Mặc dù các phương pháp đề xuất cho thấy hiệu suất hoạt động hiệu quả trong dải tần làm việc, tuy nhiên, các thiết kế đã công bố có cấu trúc còn phức tạp khó khăn cho quá trình chế tạo hoặc dải tần hoạt động còn hẹp không thích hợp cho nhiều ứng dụng yêu cầu băng rộng trong thực tế hoặc hiệu suất chưa đạt mức đồng thời cao trong cả hai chế độ hoạt động. Ngoài ra, các cơ chế vật lý chi phối tính chất hấp thụ và chuyển đổi phân cực của vật liệu đa chức năng chưa được nghiên cứu một cách toàn diện.

Tại Việt Nam, nghiên cứu về MMs đang ngày càng phát triển với sự tham gia của nhiều nhóm nghiên cứu từ các trường đại học và viện nghiên cứu. Một số nhóm nghiên cứu tiêu biểu như nhóm nghiên cứu của GS.TS. Vũ Đình Lãm, Học viện Khoa học và Công nghệ, nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Nguyễn Thị Quỳnh Hoa, Trường Đại học Vinh, nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Nguyễn Thị Hiền, Đại học Thái Nguyên, nhóm nghiên cứu PGS.TS. Lê Minh Thùy, Đại học Bách khoa Hà Nội,... Các kết quả nghiên cứu chủ yếu tập trung vào vật liệu có đặc tính hấp thụ sóng điện từ, trong khi các nghiên cứu về vật liệu chuyển đổi phân cực sóng điện từ và vật liệu đa chức còn hạn chế. Nghiên cứu bước đầu về MFM đã được thực hiện tại Học viện Khoa học và Công nghệ bởi TS. Lê Văn Long với cấu trúc tích hợp điốt [21]. Khả năng chuyển đổi giữa hai chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực bằng cách đặt điện áp phân cực cho điốt hoạt động ở hai trạng thái đóng, mở. Kết quả nghiên cứu đạt được cho thấy tiềm năng trong việc tích hợp các chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu này vẫn còn nhiều hạn chế về băng thông và hiệu suất hoạt động. Vì vậy, việc mở rộng nghiên cứu và nâng cao chất lượng thiết kế vật liệu đa chức năng là một hướng nghiên cứu mới và tiềm năng trong thời gian tới.

Dựa trên những phân tích trên, nghiên cứu sinh đã lựa chọn đề tài ***“Nghiên cứu cấu trúc và tính chất của vật liệu biến hoá đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ”***. Luận án tập trung vào việc nghiên cứu cơ chế hoạt động của MMs có đặc tính hấp thụ và đặc tính chuyển đổi phân cực sóng điện từ, từ đó hướng tới thiết kế cấu trúc, chế tạo MFM có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động trong vùng tần số GHz, THz. Các thiết kế đề xuất đạt hiệu suất hấp thụ và chuyển đổi phân cực cao trong dải tần số rộng, đồng thời ít bị ảnh hưởng bởi góc tới và góc phân cực của sóng điện từ. Hướng nghiên cứu của luận án này khác biệt hoàn toàn so với các luận án trong nước trước đây nghiên cứu về MMs. Trong khi các nghiên cứu trước chủ yếu tập trung vào việc điều khiển tính chất hấp thụ của MA [21-25], cải tiến cấu trúc, nâng cao hiệu

suất và mở rộng băng thông hấp thụ của MA [26], luận án này chú trọng phát triển các cấu trúc đa chức năng, kết hợp hiệu quả cả tính chất hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ trong cùng một thiết kế.

Mục tiêu nghiên cứu

Thiết kế cấu trúc và khảo sát tính chất của vật liệu biến hóa đa chức năng có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hiệu suất cao, băng tần rộng ở cả hai chế độ hoạt động vùng tần số GHz và THz.

Chế tạo được vật liệu biến hóa đa chức năng có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số GHz.

Làm rõ cơ chế vật lý của vật liệu biến hóa đa chức năng hoạt động ở chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ.

Nội dung nghiên cứu

Nghiên cứu cơ chế hoạt động của MMs có đặc tính hấp thụ và MMs có đặc tính chuyển đổi phân cực sóng điện từ.

Nghiên cứu mô hình cấu trúc và khảo sát ảnh hưởng của các thông số đến hiệu suất hoạt động của MFM có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số GHz và THz.

Nghiên cứu chế tạo MFM có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số GHz.

Đối tượng nghiên cứu:

Vật liệu biến hóa có đặc tính hấp thụ và MMs có đặc tính chuyển đổi phân cực; MFM tích hợp nước có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ;

MFM tích hợp VO₂ có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực.

Phương pháp nghiên cứu:

Luận án được thực hiện dựa trên sự kết hợp giữa phương pháp tính toán, phương pháp mô phỏng, phương pháp chế tạo và đo đạc thực nghiệm.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Luận án trình bày tổng quan về MMs có đặc tính hấp thụ và đặc tính chuyển đổi phân cực, MMs có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ. Nghiên cứu tính chất, đặc trưng điện từ của cấu trúc MMs hấp thụ và MMs chuyển đổi phân cực. Trên cơ sở đó, luận án đã thiết kế, tối ưu các tham số cấu trúc của MMs đa chức năng có khả năng chuyển đổi hoạt

động giữa chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số GHz và THz. Bằng cách giải thích cơ chế hoạt động của các cấu trúc đề xuất, luận án giúp làm rõ các nguyên lý cơ bản và ứng dụng tiềm năng của các cấu trúc này.

Các thiết kế đề xuất trong luận án đóng góp vào việc xây dựng các mô hình cấu trúc MMs có đặc tính hấp thụ, MMs có đặc tính chuyển đổi phân cực và MMs đa chức năng có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ. Các cấu trúc này không chỉ nhỏ gọn mà còn dễ chế tạo, giúp nâng cao hiệu quả và ứng dụng của MMs trong thực tế.

Luận án cũng góp phần mở rộng hệ thống kiến thức về MMs, đặc biệt là các vật liệu đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ, làm tài liệu tham khảo quý giá cho sinh viên, học viên cao học và nghiên cứu sinh trong việc học tập và nghiên cứu về MMs.

Những đóng góp mới của luận án

Đã thiết kế cấu trúc MA sử dụng cấu trúc đĩa tròn khoét lỗ hình vuông làm từ VO₂ hoạt động ở vùng THz với độ hấp thụ có thể thay đổi từ dưới 5% đến trên 90% trong dải tần số từ 1,29 THz đến 3,26 THz.

Đã thiết kế một số cấu trúc MPC sử dụng cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh, có hiệu suất chuyển đổi trên 90%, 93% và 93% tương ứng hoạt động trong các dải tần 2 - 8,45 GHz, 4 - 14 GHz và 1,6 - 5,8 THz. Chế tạo thành công các MPC hoạt động vùng tần số GHz.

Đã thiết kế và chế tạo thành công MMs tích hợp nước đa chức năng, với độ hấp thụ dải rộng trên 90% trong dải tần 16,4 - 24 GHz khi có nước và chuyển đổi phân cực sóng điện từ với hiệu suất chuyển đổi phân cực trên 90% trong dải tần 4,38 GHz - 11,9 GHz khi không có nước.

Đã thiết kế và mô phỏng cấu trúc MMs tích hợp vật liệu chuyển pha VO₂ đa chức năng, với độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần 1,36 - 3,38 THz khi vật liệu VO₂ ở pha kim loại và chuyển đổi phân cực sóng điện từ với hiệu suất chuyển đổi phân cực trên 90% trong dải tần 1,04 - 3,75 THz khi VO₂ chuyển sang pha điện môi.

Đã đánh giá và kiểm soát hiệu quả ảnh hưởng của các tham số cấu trúc, góc tới và góc phân cực đến hiệu suất hoạt động của MA, MPC và MFM đề xuất.

7. Cấu trúc của luận án

Cấu trúc luận án có 123 trang, bao gồm phần mở đầu, 04 chương nội dung và phần kết luận:

Mở đầu

Chương 1. Tổng quan về vật liệu biến hoá hấp thụ và chuyển đổi phân cực

sóng điện từ

Chương 2. Phương pháp nghiên cứu

Chương 3. Thiết kế và tối ưu cấu trúc vật liệu biến hóa có đặc tính hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ

Chương 4. Thiết kế và tối ưu cấu trúc vật liệu biến hóa đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ

Kết luận.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU BIẾN HOÁ HẤP THỤ VÀ CHUYỂN ĐỔI PHÂN CỰC SÓNG ĐIỆN TỪ

Nội dung của Chương 1 trình bày tổng quan về vật liệu biến hóa, vật liệu biến hóa hấp thụ sóng sóng điện từ, vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ và vật liệu biến hóa đa chức năng có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ. Trong đó, tập trung trình bày về cơ chế hấp thụ của MA và cơ chế chuyển đổi phân cực sóng điện từ của MPC; tiềm năng ứng dụng của MA, MPC và MFM có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ; một số mô hình cấu trúc được nghiên cứu gần đây về MFM có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ đang được quan tâm nghiên cứu. Đồng thời, các ưu điểm và nhược điểm của chúng cũng được phân tích làm cơ sở để lựa chọn mô hình nghiên cứu.

1.1. Tổng quan về vật liệu biến hóa

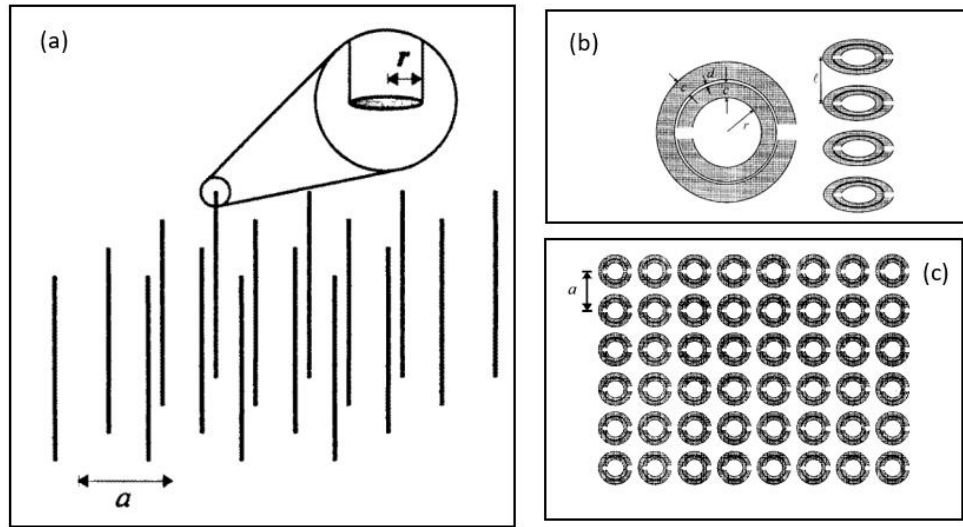
1.1.1. Các giai đoạn phát triển của vật liệu biến hóa

Vật liệu nhân tạo với các đặc tính điện từ không thể tìm thấy trong vật liệu tự nhiên đã và đang ngày càng có nhiều sự quan tâm nghiên cứu của các nhà khoa học trong và ngoài nước. Những khám phá đầu tiên về vật liệu nhân tạo đã diễn ra vào năm năm 1898, khi Jagadish Chandra Bose công bố nghiên cứu về sự quay của mặt phẳng phân cực bởi các cấu trúc xoắn do con người tạo ra, mà theo cách hiểu ngày nay, được xem là những cấu trúc xoắn nhân tạo [27]. Đến năm 1914, Karl Ferdinand Lindman đã tiếp tục nghiên cứu về sự tương tác giữa sóng điện từ và các vòng xoắn kim loại [28]. Năm 1967, Victor Georgievich Veselago đã nghiên cứu về mặt lý thuyết sự lan truyền sóng phẳng trong môi trường có hằng số điện môi và độ từ thẩm âm [29]. Ý tưởng của Veselago đã bị bỏ qua trong ba thập kỷ do không có vật liệu nào được biết đến có chiết suất âm. Vào những năm 90, John Brian Pendry và cộng sự đã cố gắng đạt được.

Năm 1998, nhà khoa học John B. Pendry cùng các cộng sự tại Đại học Hoàng gia Anh đã đề xuất mô hình lưới dây kim loại mỏng với đặc tính độ điện thẩm âm và độ từ thẩm dương như được mô tả trên Hình 1(a) [30]. Cấu trúc này có kích thước ô đơn vị P nhỏ hơn nhiều lần bước sóng hoạt động λ của sóng điện từ ($P \ll \lambda$), vì vậy, nó được coi là đồng nhất và thuộc loại vật liệu MMs. Tiếp đó, vào năm 1999, Pendry tiếp tục thành công trong việc phát triển mô hình vật liệu có độ từ thẩm âm trong dải tần số GHz. Mô hình này bao gồm một mảng tuần hoàn các cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh (Split Ring Resonators - SRRs), được chế tạo từ kim loại đồng (Cu) kết hợp

với chất điện môi FR-4 như thể hiện trên Hình 1(b) (c) [31].

Đến năm 2000, David R. Smith và các cộng sự tại Đại học California, San Diego lần đầu tiên sản xuất ra vật liệu có cả độ điện thẩm âm và độ từ thẩm âm, kết hợp các cấu trúc do Pendry đề xuất trong một cấu trúc duy nhất [32]. Cấu trúc mà Smith đề xuất được phát triển dựa trên công trình tiên phong của Pendry, qua đó ông đã chứng minh sự tồn tại của vật liệu đầu tiên có cả độ điện thẩm âm và độ từ thẩm âm.



Hình 1.1. MMs đầu tiên do Pendry đề xuất: (a) Cấu trúc dây dẫn mảnh [30]
(b) Cấu trúc SRRs (c) Dây tuần hoàn SRRs [31]

Dựa trên cấu trúc của Smith, nhiều cấu trúc MMs mới đã được đề xuất và kiểm chứng, mở ra khả năng tạo ra MMs có chiết suất âm. Một số cấu trúc điển hình bao gồm: cấu trúc kết hợp, cấu trúc xương cá, cấu trúc chữ Φ . Để đạt được chiết suất âm, các cấu trúc này thường bao gồm hai thành phần chính: thành phần từ để tạo ra độ từ thẩm âm ($\mu < 0$) và thành phần điện để tạo ra độ điện thẩm âm ($\epsilon < 0$) dưới tần số plasma. Sự kết hợp giữa hai thành phần này là yếu tố cốt lõi để tạo ra các tính chất độc đáo của vật liệu MMs.

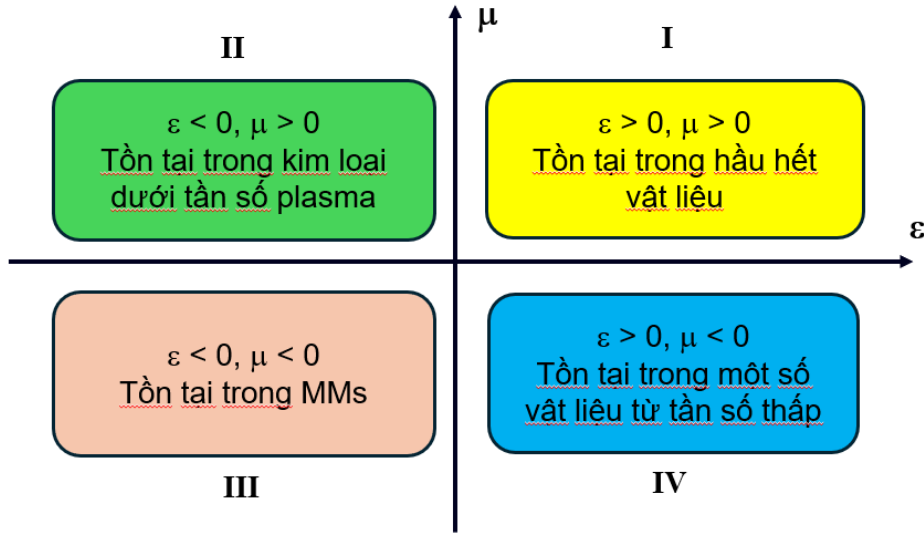
1.1.2. Phân loại và tính chất của vật liệu biến hóa

Hình 1.2. trình bày giản đồ phân loại các vật liệu dựa trên tham số điện thẩm ϵ và từ thẩm μ . Dựa trên các giá trị của ϵ và μ , vật liệu được chia thành bốn miền chính:

Miền thứ I ($\epsilon > 0$ và $\mu > 0$): Vật liệu thuộc miền này có phổ biến trong tự nhiên, như không khí, nước, và hầu hết các chất rắn, lỏng hoặc khí thông thường. Sóng điện từ có thể lan truyền qua các vật liệu này, nhưng thường xảy ra hiện tượng tổn hao năng lượng.

Miền thứ II ($\epsilon < 0$ và $\mu > 0$). Vật liệu thuộc miền này cũng có trong tự nhiên, các kim loại dưới tần số plasma và có thể được chế tạo từ các dây kim loại được sắp

xếp một cách tuần hoàn. Khi tần số của sóng điện từ hoạt động thấp hơn tần số plasma, vật liệu này có thể được kích thích bởi sóng có vector điện trường dọc theo trục z .



Hình 1.2. Phân loại vật liệu theo độ điện thẩm (ϵ) và từ thẩm (μ)

Miền thứ III ($\epsilon < 0$ và $\mu < 0$): Vật liệu thuộc miền này có cả độ điện thẩm và độ từ thẩm âm, được gọi là vật liệu chiết suất âm. Việc chế tạo các vật liệu này từ các chất đồng nhất là vô cùng khó khăn. Tuy nhiên, một số cấu trúc nhân tạo đã được đề xuất để tạo ra tính chất này, như: cấu trúc SRRs, cấu trúc hình chữ S, cấu trúc hai thanh kim loại song song được ngăn cách bởi lớp điện môi.

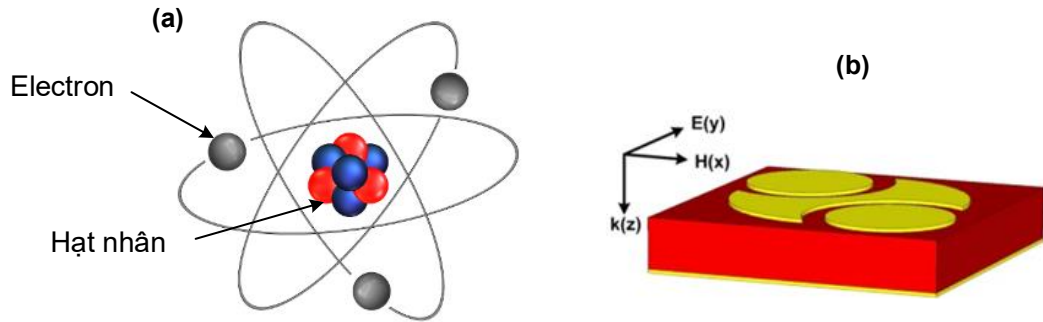
Miền thứ IV ($\epsilon > 0$ và $\mu < 0$): Sóng điện từ có thể lan truyền trong môi trường này, tương tự như trong môi trường vật liệu thông thường ($\epsilon > 0$ và $\mu > 0$), sóng điện từ cũng có thể lan truyền và có tổn hao khi truyền trong môi trường vật liệu có $\epsilon < 0$ và $\mu < 0$ nhưng có một điểm khác biệt quan trọng. Hướng truyền sóng (vận tốc pha $\vec{v}_p$) ngược chiều với hướng truyền năng lượng (vận tốc nhóm $\vec{v}_g$) tạo nên tính chất sóng ngược đặc trưng của vật liệu chiết suất âm.

Miền thứ II và thứ IV có một trong hai giá trị độ điện thẩm hoặc độ từ thẩm âm, Khi sóng điện từ truyền vào, năng lượng sẽ nhanh chóng bị dập tắt, dẫn đến tính chất không cho sóng lan truyền ổn định.

Phân loại này cung cấp cơ sở để nghiên cứu các đặc tính bất thường của các vật liệu nhân tạo, như khả năng tạo chiết suất âm hay kiểm soát sóng điện từ một cách độc đáo.

Trước đây, người ta tin rằng tính chất vật lý của vật liệu được quyết định bởi bản chất của các nguyên tử và cấu trúc mạng tinh thể, và những tính chất này là cố định, không thể thay đổi. Tuy nhiên, con người đã thành công trong việc thiết kế các loại vật liệu nhân tạo, cho phép điều khiển các tính chất điện, từ và quang của chúng thông

qua sự sắp xếp có chủ ý của các nguyên tử. Về cơ bản, MMs có cấu trúc tương tự như vật liệu truyền thống được thể hiện như trên Hình 1.3. Với vật liệu tự nhiên, các tính chất của chúng được xác định bởi cấu trúc điện tử của nguyên tử và cách các nguyên tử sắp xếp trong mạng tinh thể. Trong khi đó, đối với MMs, các tính chất đặc trưng của chúng phụ thuộc vào thành phần và cấu trúc của các “giả nguyên tử” được thiết kế.



Hình 1.3. (a) Mô hình nguyên tử vật liệu trong tự nhiên và (b) Nguyên tử MMs

Các “giả nguyên tử” trong MMs được bố trí trong các ô cơ sở có kích thước nhỏ hơn nhiều so với bước sóng hoạt động. Nhờ đó, MMs có thể được xem như một môi trường đồng nhất, trong đó các thành phần cấu tạo bên trong không còn được phân biệt mà được đặc trưng bằng các đại lượng hiệu dụng như độ điện thẩm và từ thẩm. Các tính chất điện từ của MMs được mô tả và dự đoán dựa trên sự tương tác giữa sóng điện từ và môi trường đồng nhất này, theo các phương trình Maxwell. Do đó, bằng cách sắp xếp vị trí và điều chỉnh các tham số cấu trúc của MMs, chúng ta có thể kiểm soát độ điện thẩm và từ thẩm, qua đó thay đổi các đặc tính điện từ của vật liệu. Điều này mở ra khả năng tạo ra các hiện tượng điện từ độc đáo mà vật liệu tự nhiên không thể đạt được, chẳng hạn như chiết suất âm, đảo ngược định luật Snell, hay đảo ngược hiệu ứng Doppler,...

1.1.3. Một số ứng dụng của vật liệu biến hóa

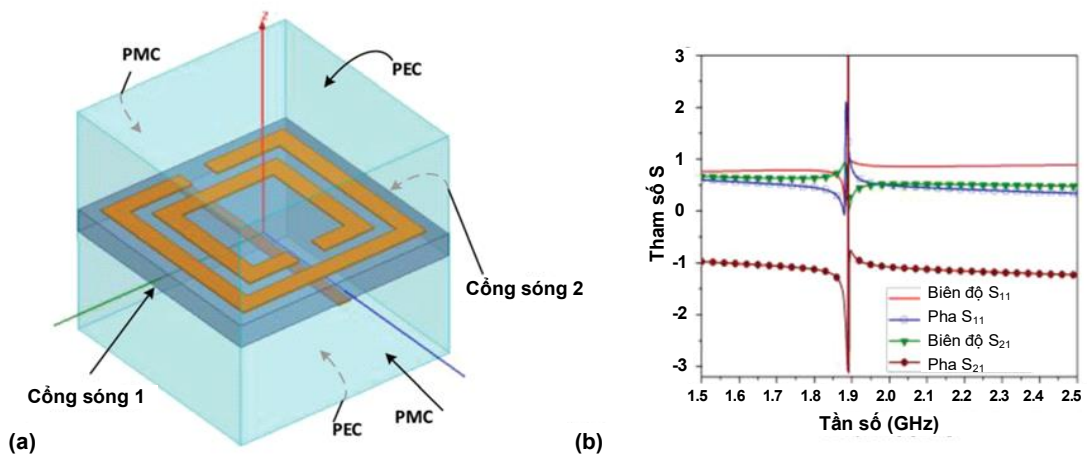
MMs sở hữu nhiều đặc điểm vượt trội so với vật liệu tự nhiên nhờ khả năng điều khiển linh hoạt các tính chất điện từ. Chúng có thể có chiết suất âm, dẫn đến hiện tượng khúc xạ ngược, mở ra ứng dụng trong siêu thấu kính và điều hướng sóng. Ngoài ra, MMs có thể được thiết kế để hấp thụ hoàn toàn sóng điện từ, giúp cải thiện hiệu suất tàng hình và giảm nhiễu trong viễn thông. Một số loại còn có hằng số điện thẩm hoặc từ thẩm gần bằng không, cho phép điều khiển pha sóng và tối ưu hóa truyền dẫn năng lượng. Đặc biệt, chúng có thể chuyển đổi phân cực sóng điện từ và điều chỉnh tính chất theo môi trường, giúp tăng tính linh hoạt trong các ứng dụng cảm biến và viễn thông. Bên cạnh đó, khả năng điều hướng sóng để tạo hiệu ứng tàng hình là một trong những tiềm năng đột phá của vật liệu biến hóa. Nhờ những ưu điểm này, MMs

đang mở ra nhiều hướng nghiên cứu và ứng dụng quan trọng trong công nghệ hiện đại.

▪ *Vật liệu biến hóa trong thiết kế ăng-ten*

MMs được kì vọng mang lại nhiều ứng dụng thực tiễn như tàu ngầm tàng hình, áo tàng hình vi sóng, ăng-ten nhỏ gọn và thấu kính chiết suất âm [33]. Trong số các ứng dụng tiềm năng, thiết kế ăng-ten được xem là một trong những lĩnh vực quan trọng nhất của MMs [34]. MMs có thể được tích hợp vào ăng-ten dưới dạng một hoặc hai lớp, đóng vai trò như chất nền hoặc được thêm vào cấu trúc hình học để nâng cao hiệu suất hoạt động [35, 36]. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc ứng dụng MMs trong thiết kế ăng-ten có thể cải thiện đáng kể các thông số quan trọng, giảm kích thước ăng-ten, tăng công suất bức xạ, cải thiện độ khuếch đại và khả năng định hướng của ăng-ten [37, 38]. Bên cạnh đó, MMs còn được sử dụng để giảm bức xạ ở hai bên và phía sau của ăng-ten, cũng như hạn chế tỷ lệ hấp thụ trong trường hợp ăng-ten được đeo trên cơ thể người. Điều này mở ra tiềm năng lớn trong việc ứng dụng MMs vào các thiết bị di động và thiết bị đeo thông minh, giúp cải thiện hiệu quả và đảm bảo an toàn cho người sử dụng [39, 40].

MMs được ứng dụng trong thiết kế ăng-ten có thể tồn tại dưới dạng một ô đơn vị hoặc một mảng các ô đơn vị. Vì vậy, khi thiết kế ăng-ten, các nhà nghiên cứu thường tập trung vào việc thiết kế và phân tích các yếu tố chính ảnh hưởng đến tần số cộng hưởng, hằng số điện môi, và độ từ thẩm của ô đơn vị. Kích thước của mỗi ô đơn vị có thể được điều chỉnh để đảm bảo thỏa mãn các điều kiện tại tần số cộng hưởng. Thông thường, kích thước của ô đơn vị nhỏ hơn $1/10$ bước sóng hoạt động. Tuy nhiên, để MMs đáp ứng điều kiện đồng nhất, kích thước này cần phải nhỏ hơn nhiều so với bước sóng hoạt động.

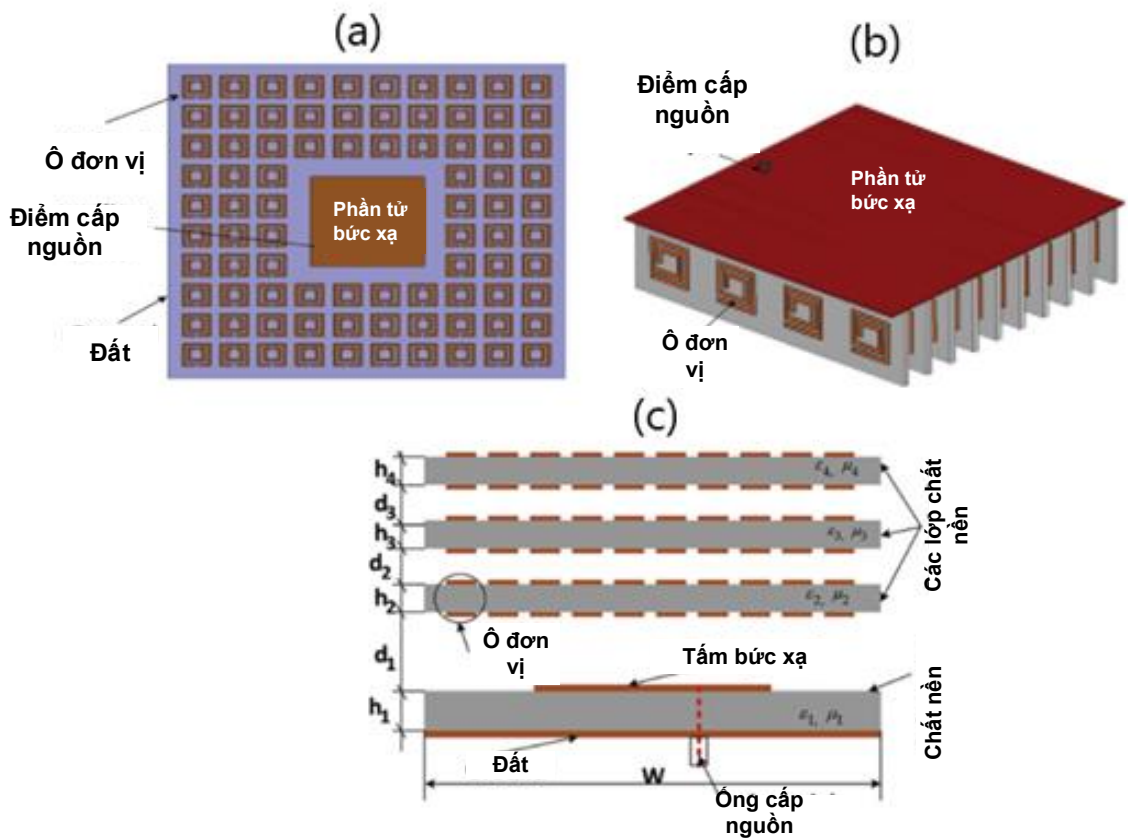


Hình 1.4. Mô hình mô phỏng MMs ứng dụng trong thiết kế ăng-ten hoạt động tại tần số 1,88 GHz (a) ô đơn vị, (b) biểu đồ biên độ, pha của hệ số phản xạ và hệ số truyền qua [41]

Ví dụ, một ô đơn vị của MMs được thiết kế cho điện thoại di động GSM hoạt

động tại tần số 1,88 GHz được thể hiện như trên Hình 1.4 [41]. Thiết kế này cho thấy sự tối ưu hóa về kích thước và cấu trúc để đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật tại tần số hoạt động cụ thể, đồng thời đảm bảo hiệu suất điện từ cao và tính đồng nhất của vật liệu.

Gần đây, MMs được xem là một giải pháp hiệu quả để cải thiện độ lợi của ăng-ten. Cụ thể, MMs có thể được sử dụng như một chất dẫn từ nhân tạo bằng cách bố trí các ô đơn vị MMs xung quanh các phần tử bức xạ của ăng-ten [42]. Ngoài ra, chúng có thể được sắp xếp dưới dạng một hoặc nhiều lớp đặt ở phía trên hoặc phía dưới các phần tử bức xạ [43], hoặc được sử dụng như là tải của ăng-ten [44]. Hình 1.5 minh họa một số mô hình sử dụng MMs để cải thiện độ lợi của ăng-ten.



Hình 1.5. Mô hình ứng dụng MMs trong cải thiện độ lợi của ăng-ten: (a) MMs xung quanh phần tử bức xạ [42], (b) MMs làm tải của ăng-ten [43], (c) MMs ở lớp trên và dưới phần tử bức xạ [44].

Mỗi mô hình đều có ưu điểm và nhược điểm riêng. Hiệu quả cải thiện độ lợi phụ thuộc vào các yếu tố như số lượng lớp vật liệu, loại ô đơn vị được sử dụng, và khoảng cách giữa các phần tử bức xạ với bề mặt của MMs. Việc tối ưu hóa các yếu tố này đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiệu suất của ăng-ten, đồng thời đảm bảo thiết kế đáp ứng yêu cầu ứng dụng cụ thể.

Để mở rộng dải tần hoạt động của ăng-ten, MMs có thể được tích hợp vào cấu

trúc ăng-ten hoặc sắp xếp thành một lớp trên cùng, nằm phía trên bề mặt bức xạ của ăng-ten như thể hiện trên Hình 1.5 (c). Trong cách bố trí này, băng thông của ăng-ten phụ thuộc vào số lượng ô đơn vị của MMs và khoảng cách giữa lớp MMs với bề mặt bức xạ. Việc tối ưu hóa số lượng ô đơn vị và khoảng cách phù hợp đóng vai trò quan trọng trong việc mở rộng dải tần hoạt động, giúp ăng-ten đạt được hiệu suất cao hơn trong các ứng dụng yêu cầu băng thông rộng. Thiết kế này thường được sử dụng để nâng cao hiệu quả hoạt động của ăng-ten trong các hệ thống thông tin hiện đại [41].

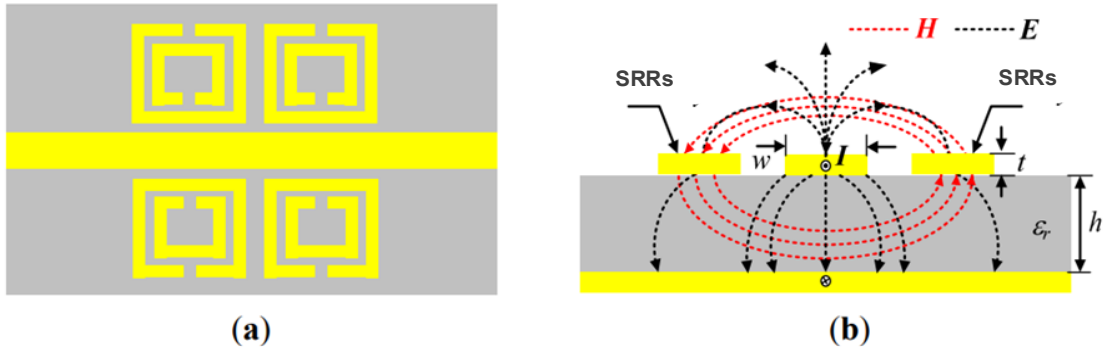
▪ *Vật liệu biến hóa trong chế tạo cảm biến*

Một ứng dụng tiêu biểu khác của MMs là trong lĩnh vực cảm biến, dựa trên khả năng hấp thụ sóng điện từ tại một dải tần số nhất định. Các cảm biến sử dụng MMs làm chất hấp thụ sóng điện từ được đánh giá cao nhờ các ưu điểm vượt trội như độ nhạy cao, chất lượng tín hiệu tốt, chi phí thấp và quy trình chế tạo đơn giản. MMs hấp thụ sóng điện từ có thể được sử dụng để đo các đại lượng như nhiệt độ, áp suất, độ ẩm, và xác định các đặc tính điện từ của vật liệu. Ngoài ra, chúng còn được ứng dụng trong việc cảm nhận các phân tử sinh học và khí đốt. Với những tính năng này, cảm biến dựa trên MMs đang ngày càng trở nên phổ biến và được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như y sinh, công nghiệp hóa chất, kiểm tra chất lượng thực phẩm và nông nghiệp. Sự linh hoạt và hiệu quả của các cảm biến này giúp chúng trở thành một giải pháp đầy hứa hẹn cho các hệ thống đo lường và giám sát hiện đại.

Bên cạnh đó, cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh SRRs với đa dạng hình dạng và cấu trúc liên kết là một trong những thiết kế phổ biến được sử dụng trong các cảm biến dựa trên MMs. Nguyên lý hoạt động của SRRs dựa trên sự tương tác điện từ giữa vật liệu cần đo và sóng điện từ bị giam giữ trong chất hấp thụ tại tần số cộng hưởng.

Một ví dụ điển hình là cấu trúc cảm biến sinh học được Lee và nhóm nghiên cứu đề xuất, như minh họa trên Hình 1.6 (a) [45]. Cảm biến này sử dụng SRRs với kích thước nhỏ gọn để phát hiện sự xuất hiện của liên kết phân tử sinh học. Thiết kế này không chỉ mang lại độ nhạy cao mà còn phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu kích thước cảm biến nhỏ, như trong y sinh và các hệ thống phân tích sinh học hiện đại.

Cấu trúc cảm biến được thiết kế gồm hai cặp SRRs và một đường truyền vi dải phẳng. Đường truyền vi dải phẳng tạo ra sự thay đổi theo thời gian của thành phần từ trường (H) theo hướng vuông góc với bề mặt của SRRs, đồng thời hoạt động như một ống dẫn mở, cho phép sóng và trường điện từ truyền qua mà không bị hoàn toàn giới hạn bên trong. Theo định luật Faraday, khi từ trường H thay đổi theo thời gian và vuông góc với bề mặt SRRs, SRRs sẽ tạo ra sự cộng hưởng với tần số $f_o = 1/2\pi\sqrt{LC}$.



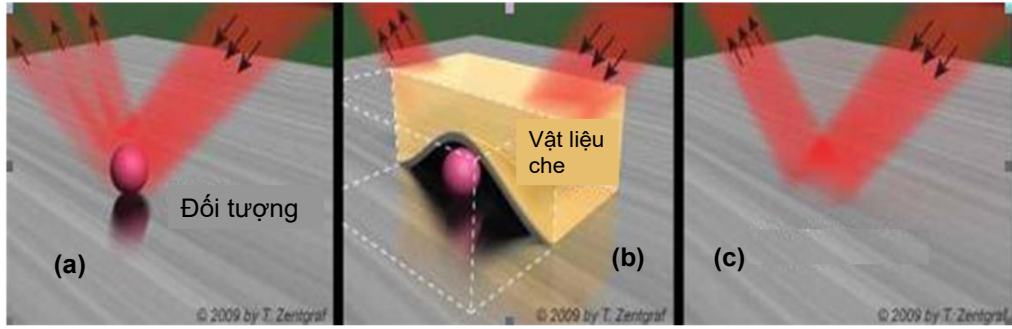
Hình 1.6. Cảm biến sinh học (a) hình ảnh từ trên xuống của một đường truyền vi dải, (b) mặt cắt ngang của đường truyền vi dải với một cặp cộng hưởng vòng có rãnh và sơ đồ phân bố trường điện từ [45].

Trong nghiên cứu, cấu trúc cảm biến được thử nghiệm với biotin và streptavidin để đánh giá khả năng cảm biến sinh học. Biotin và streptavidin có lực hút hóa học mạnh, do đó thường được sử dụng để nghiên cứu độ nhạy và tính chọn lọc của cảm biến sinh học. Cảm biến dựa trên SRRs có bề mặt cảm biến được phủ một lớp vàng (Au), trên đó sợi đơn DNA liên kết với biotin (ss-DNA-Biotin) được cố định nhờ lực hút mạnh giữa ss-DNA và lớp vàng. Sau quá trình cố định này, sự liên kết giữa biotin và streptavidin trên bề mặt SRRs được hình thành thông qua một quá trình xử lý sinh học. Thiết kế này giúp cảm biến đạt độ nhạy cao, đồng thời thể hiện tính chọn lọc vượt trội, mở ra tiềm năng lớn trong các ứng dụng cảm biến sinh học hiện đại.

Trong trường hợp không có sự hiện diện của vật liệu sinh học, tần số cộng hưởng của cảm biến là 10,82 GHz. Khi biotin được thêm vào, tần số cộng hưởng giảm xuống còn 10,70 GHz, với sự thay đổi tần số là $\Delta f_0 = 120$ MHz. Sau khi liên kết giữa biotin và streptavidin hình thành, tần số cộng hưởng tiếp tục thay đổi, giảm xuống còn 10,66 GHz, với sự thay đổi tần số là $\Delta f_0 = 40$ MHz. Sự thay đổi này phản ánh quá trình tương tác sinh học giữa biotin và streptavidin, cho phép cảm biến ghi nhận và phát hiện sự hiện diện của các phân tử sinh học trên bề mặt. Điều này chứng tỏ cảm biến dựa trên SRRs không chỉ có khả năng phát hiện mà còn phân biệt được các giai đoạn liên kết sinh học nhờ vào sự thay đổi tần số cộng hưởng, góp phần khẳng định độ nhạy và hiệu quả cao của thiết kế.

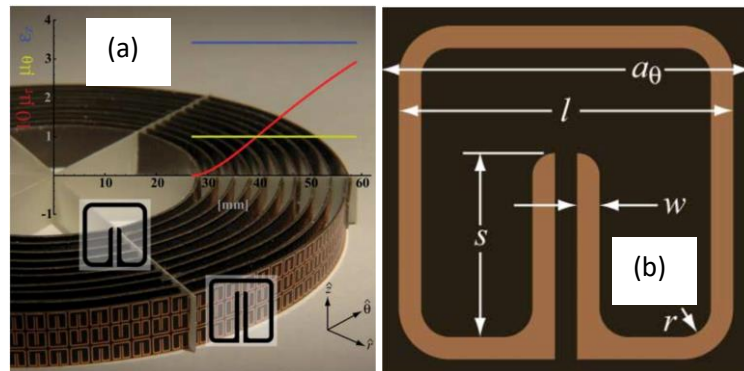
▪ *Vật liệu biến hóa trong chế tạo vật liệu tàng hình*

Vật liệu tàng hình dựa vào khả năng điều khiển và bẻ cong sóng điện từ xung quanh một vật thể làm cho sóng không phản xạ lại mắt người quan sát. Vì vậy, mắt người không thể nhìn thấy vật và khi đó vật trở nên “tàng hình”. Đây là nguyên lý cơ bản trong các nghiên cứu và ứng dụng công nghệ tàng hình.



Hình 1.7. Minh họa một vật được “tàng hình” khi được che phủ bởi lớp vật liệu biến hoá (a) vật được nhìn thấy. (b) vật được che phủ bởi lớp vật liệu và (c) Vật tàng hình nhờ lớp vật liệu biến hoá [46]

Vào năm 2006, giáo sư John Pendry và giáo sư David Smith cùng các cộng sự nghiên cứu lần đầu tiên chế tạo một MMs có khả năng tàng hình một vật trong dải tần vi ba như thể hiện trên Hình 1.8 [47]. Kết quả nghiên cứu này có ý nghĩa quan trọng trong lĩnh vực khoa học quốc phòng, vì vi ba thường được sử dụng trong radar, mở ra khả năng tàng hình các vật thể khỏi sự phát hiện của radar. Vài năm sau, các nhóm nghiên cứu của giáo sư Shuang Zhang và giáo sư Baile Zhang, cùng các cộng sự, tiếp tục phát triển công nghệ này để tạo ra hiệu ứng tàng hình trong vùng ánh sáng nhìn thấy, làm tăng thêm tiềm năng ứng dụng của MMs trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt là trong các công nghệ tàng hình tiên tiến [48, 49].



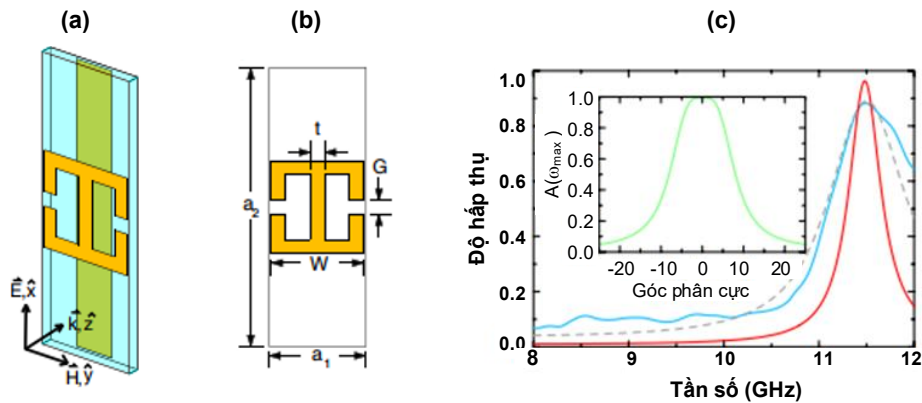
Hình 1.8. (a) Hình ảnh 2D của MMs có chiết suất thay đổi bao quanh vật cần tàng hình, (b) Cấu trúc ô cơ sở [47]

Trong các thí nghiệm sử dụng MMs, vật bị tàng hình thường có kích thước rất nhỏ, ở cấp milimet. Tuy nhiên, việc mở rộng công nghệ tàng hình để áp dụng cho các vật thể có kích thước lớn hơn, như con người hoặc chiếc máy bay, hiện vẫn là một thách thức lớn đối với các nhà nghiên cứu. Điều này đòi hỏi sự phát triển mạnh mẽ của các vật liệu và công nghệ mới, cùng với việc tối ưu hóa các cấu trúc MMs để xử lý các tần số và kích thước sóng khác nhau. Vì vậy, việc tàng hình các vật thể lớn vẫn là một bài toán khó và chắc chắn sẽ còn nhiều thách thức trong tương lai.

1.2. Vật liệu biến hóa hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ

1.2.1. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ và tiềm năng ứng dụng

Hiện nay, với sự tiến bộ của lĩnh vực truyền thông, hiện tượng nhiễu xạ sóng điện từ và ô nhiễm môi trường do bức xạ sóng điện từ ngày càng gia tăng. Điều này tạo ra nhu cầu phát triển các vật liệu có khả năng hấp thụ năng lượng của sóng điện từ và các phương pháp hiệu quả để giảm tác động của sóng điện từ. Một số các vật liệu truyền thống được sử dụng phổ biến làm chất hấp thụ sóng điện từ như vật liệu từ tính, carbon, composite,... Tuy nhiên, các vật liệu hấp thụ này có nhược điểm là có kích thước khá dày, hiệu suất thấp và dải tần làm việc hẹp. Trong thời gian gần đây, MA thu hút sự chú ý nghiên cứu nhờ vào ưu điểm siêu mỏng [50], không nhạy cảm với góc phân cực [51], và hiệu quả hấp thụ gần như tuyệt đối [52, 53]. Vật liệu MA đầu tiên được nghiên cứu bởi N.I. Landy và nhóm nghiên cứu vào năm 2008. Cấu trúc ô cơ sở của vật liệu này bao gồm mặt trên là cộng hưởng vòng có rãnh SRRs làm bằng kim loại và mặt dưới là một thanh kim loại, ngăn cách mặt trên và mặt dưới là lớp điện môi FR-4 được thể hiện như trong Hình 1.9 (a) và 1.9 (b).

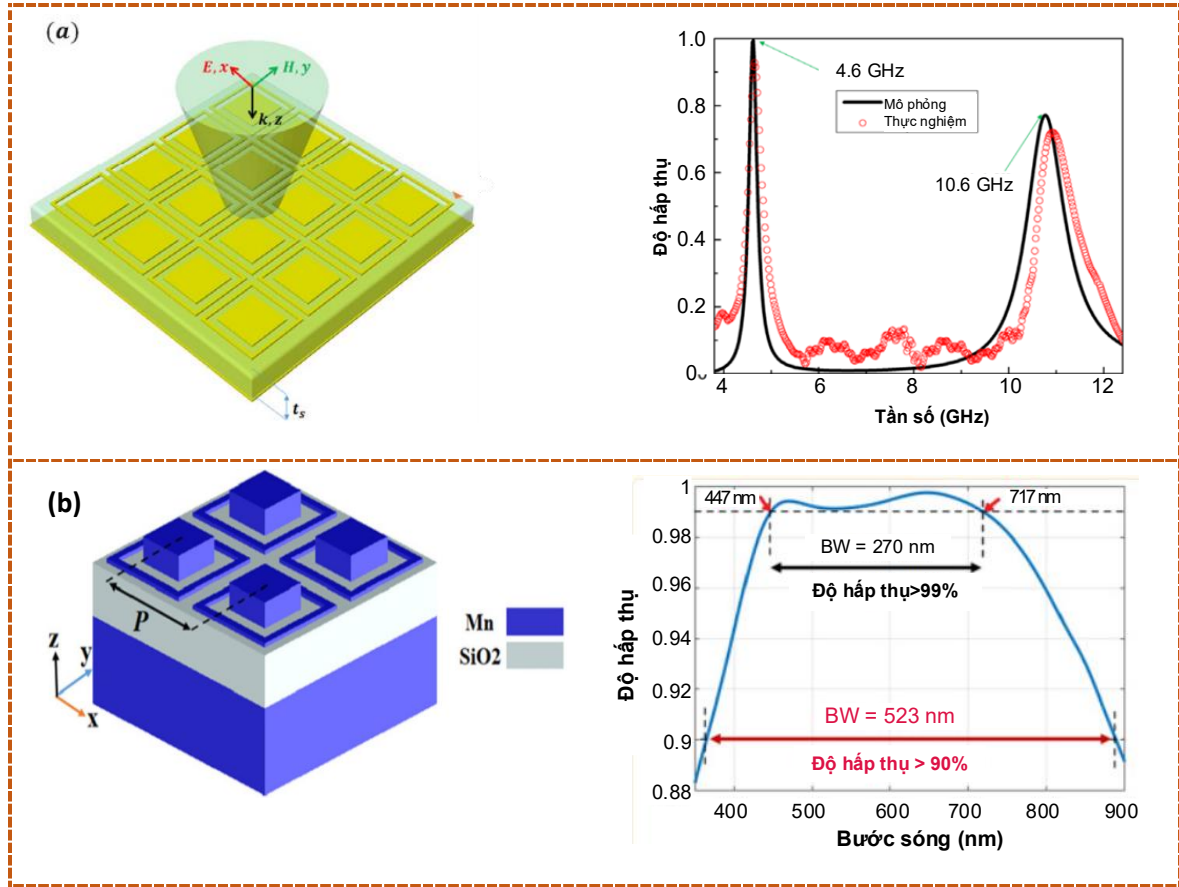


Hình 1.9. MA đề xuất bởi Landy (a) ô cơ sở (b) mặt trên của ô cơ sở và (c) độ hấp thụ [1]

Khi sóng điện từ chiếu đến, bề mặt vật liệu tương tác với sóng điện từ, vòng cộng hưởng SRRs tạo ra cộng hưởng điện, trong khi đó, lớp kim loại cộng hưởng ở mặt trên và thanh kim loại ở mặt dưới tạo thành cặp kim loại song song, tạo ra cộng hưởng từ. Thông qua việc điều chỉnh thông số kích thước của thanh kim loại ở mặt dưới hoặc độ dày lớp điện môi, ta có thể điều chỉnh tần số cộng hưởng điện và cộng hưởng từ sao cho trở kháng vào của cấu trúc vật liệu phối hợp tốt với trở kháng của môi trường truyền từ đó đạt hiệu quả hấp thụ sóng điện từ cao. Cấu trúc do Landy và cộng sự đề xuất đã đạt được độ hấp thụ cao lên đến 96% tại tần số 11,5 GHz [1].

Kể từ khi cấu trúc này được giới thiệu, nhiều nghiên cứu về MA đã được triển khai nghiên cứu, từ dải tần vô tuyến đến dải tần quang học, với nhiều ứng dụng thực tế quan trọng. Những ứng dụng này bao gồm công nghệ tàng hình, y tế, ăng-ten, radar

[54], và hệ thống viễn thông [55],... Bên cạnh đó nhiều cấu trúc tối ưu được nghiên cứu nhằm đạt được hấp thụ đa dải tần [56, 57], hấp thụ băng rộng và không phụ thuộc vào phân cực sóng điện từ [58-60] như thể hiện trong Hình 1.10.



Hình 1.10. Hình ảnh cấu trúc và phổ hấp thụ của (a) MA đa dải tần [61],

(b) MA băng rộng [62]

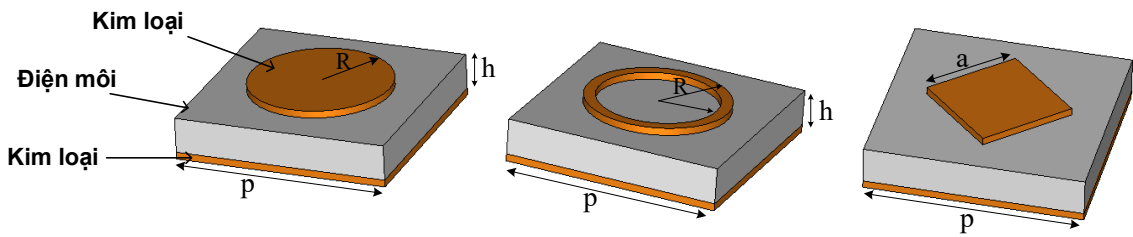
Những tiến bộ này giúp mở rộng khả năng ứng dụng của MA, từ việc cải thiện hiệu quả tàng hình đến việc tối ưu hóa các hệ thống radar và viễn thông trong môi trường thực tế.

▪ *Nguyên lý thiết kế vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ*

Để đạt được MA có khả năng hấp thụ sóng điện từ một cách hoàn hảo, nhiều kỹ thuật khác nhau đã được áp dụng, bao gồm kỹ thuật giao thoa, kỹ thuật phối hợp trở kháng để tối thiểu phản xạ, sử dụng cấu trúc tạo hiệu ứng cộng hưởng điện từ mạnh để tăng tổn hao, tích hợp vật liệu tiên tiến để tăng hiệu suất,...

MA hoạt động dựa trên sự tổn hao năng lượng sóng điện từ khi nó truyền qua hoặc bị phản xạ trong cấu trúc. MA thường được thiết kế với cấu trúc tuần hoàn có đặc tính cộng hưởng mạnh, giúp điều khiển sự truyền, phản xạ và hấp thụ sóng điện từ hiệu quả. Một số dạng cấu trúc MA cơ bản bao gồm: cấu trúc ba lớp kim loại-điện môi-kim loại, cấu trúc chỉ có kim loại và cấu trúc hai lớp kim loại-điện môi. Cấu trúc

phổ biến nhất là cấu trúc ba lớp kim loại – điện môi – kim loại, trong đó lớp trên cùng là các phần tử cộng hưởng kim loại được sắp xếp tuần hoàn, lớp điện môi ở giữa và lớp kim loại liên tục ở dưới cùng. Hình dạng của các lớp cộng hưởng kim loại ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng cộng hưởng và hiệu quả hấp thụ của vật liệu, từ đó cải thiện hiệu suất hấp thụ và khả năng điều chỉnh các tần số cộng hưởng. Một số hình dạng của lớp kim loại trên cùng thường có dạng lưới, vòng, hoặc các hình dạng đặc biệt giúp tạo ra cộng hưởng điện từ. Hình 1.11 minh họa một số mô hình cấu trúc MMs ba lớp có hình dạng lớp cộng hưởng kim loại khác nhau: đĩa tròn, vòng tròn và hình vuông. Lớp điện môi đóng vai trò như một lớp cách điện giữa hai lớp kim loại, ảnh hưởng đến khả năng cộng hưởng và mở rộng băng thông. Lớp kim loại mặt sau là lớp phản xạ hoàn toàn, giúp triệt tiêu sóng phản xạ, từ đó tối ưu hóa quá trình hấp thụ. Các cấu trúc MA có thể được thiết kế để hoạt động hiệu quả trong nhiều dải tần số, từ vô tuyến đến quang học, và có ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như công nghệ tàng hình, viễn thông, y tế và radar, cũng như trong các hệ thống bảo vệ môi trường chống lại bức xạ sóng điện từ.



Hình 1.11. Mô hình cấu trúc MA 3 lớp kim loại - điện môi - kim loại: (a) dạng đĩa tròn, (b) dạng vòng tròn và (c) dạng hình vuông

Khi sóng điện từ chiếu tới bề mặt vật liệu, năng lượng của sóng tới sẽ chia thành ba thành phần: phần năng lượng phản xạ $R(\omega)$ là phần sóng phản xạ ngược trở lại môi trường, được tạo ra do sự khác biệt giữa trở kháng của vật liệu và môi trường; phần bị vật liệu hấp thụ $A(\omega)$ là phần năng lượng mà vật liệu hấp thụ do bản chất của vật liệu, thường là do sự cộng hưởng hoặc khả năng hấp thụ sóng điện từ của cấu trúc MA; phần năng lượng truyền ra khỏi vật liệu $T(\omega)$ là phần năng lượng bị truyền qua vật liệu và thoát ra khỏi vật liệu, chủ yếu xảy ra khi vật liệu không hoàn toàn cản trở sóng điện từ.

Để tính toán độ hấp thụ của vật liệu, ta sử dụng biểu thức sau [1]:

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

trong đó $R(\omega) = |S_{11}|^2$ và $T(\omega) = |S_{21}|^2$ tương ứng là hàm phản xạ và hàm truyền qua phụ thuộc tần số.

S_{11} , S_{21} là các hệ số phản xạ và hệ số truyền qua mô tả tỉ lệ sóng điện từ phản xạ lại từ đầu vào của hệ thống và tỉ lệ sóng điện từ truyền từ đầu vào của hệ thống qua vật liệu và đi ra tại đầu ra.

Theo biểu thức (1.3) cho thấy, để đạt được độ hấp thụ tuyệt đối thì hai thành phần phản xạ và truyền qua phải đồng thời bằng 0 (hay nói khác chúng bị triệt tiêu). Với các thiết kế MA cơ bản hiện nay gồm ba lớp kim loại - điện môi - kim loại, lớp đồng liên tục ở phía dưới có khả năng ngăn chặn hoàn toàn sự truyền qua của sóng điện từ nên sóng truyền qua $T(\omega) = 0$. Vì vậy, biểu thức (1.1) có thể viết lại thành:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega). \quad (1.2)$$

Từ biểu thức (1.2) có thể thấy, MA có thể đạt được độ hấp thụ tuyệt đối ($A(\omega) = 1$) khi thiết kế đảm bảo $R(\omega) = 0$.

Để đảm bảo không có sóng phản xạ trở lại môi trường truyền, yêu cầu về phối hợp trở kháng của MMs với môi trường truyền ($Z(\omega) = Z_0$) là cần thiết trong thiết kế MA. Trở kháng hiệu dụng của MA được tính toán theo biểu thức [63]:

$$Z(\omega) = \sqrt{\frac{\mu(\omega)}{\varepsilon(\omega)}} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)}{(1 - S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)}}. \quad (1.3)$$

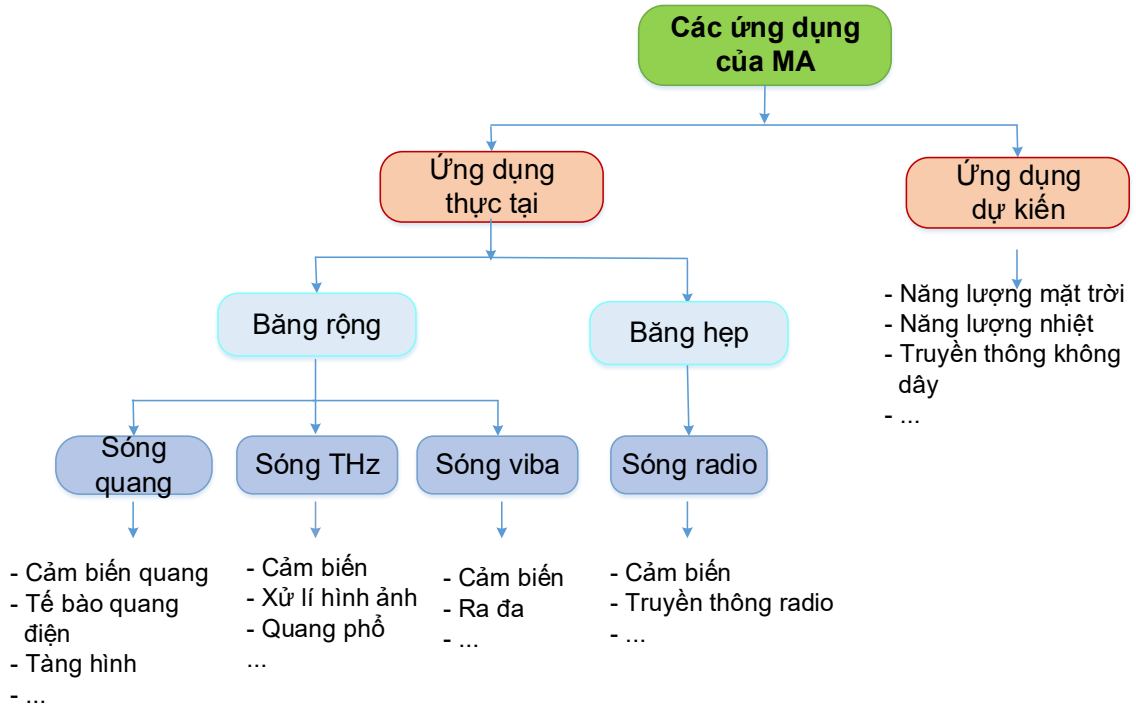
Theo tính toán, trong trường hợp phối hợp trở kháng thì sóng phản xạ từ bề mặt vật liệu gần như bằng 0 [64]:

$$R(\omega) = \left| \frac{Z(\omega) - Z_0}{Z(\omega) + Z_0} \right|^2 \approx 0. \quad (1.4)$$

Trong trường hợp này, sóng phản xạ sẽ bị triệt tiêu hoàn toàn. Kết quả là toàn bộ năng lượng của sóng điện từ tới được hấp thụ hoàn toàn bên trong vật liệu. Trong quá trình này, hai loại tổn hao chính xuất hiện trong vật liệu hấp thụ là tổn hao điện môi và tổn hao Ohmic. Tổn hao điện môi xảy ra khi năng lượng của sóng điện từ bị hấp thụ bởi vật liệu và chuyển thành nhiệt, trong khi tổn hao Ohmic xảy ra do sự tiêu tán năng lượng điện từ thành nhiệt khi dòng điện chạy qua các thành phần dẫn điện trong vật liệu (như kim loại hoặc hợp chất dẫn điện) [1, 65].

▪ *Tiềm năng ứng dụng của vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ*

Cho đến nay, MA đã thay thế các bộ hấp thụ truyền thống công kênh và kém hiệu quả như bộ hấp thụ hình nêm và ferit. Các MA hiện được sử dụng trong công nghệ tàng hình, ứng dụng ô tô, y tế, ăng-ten radar, hệ thống viễn thông, thiết bị quang điện tử, thu năng lượng và cảm biến [66]. Hình 1.12 mô tả tiềm năng ứng dụng của MA.



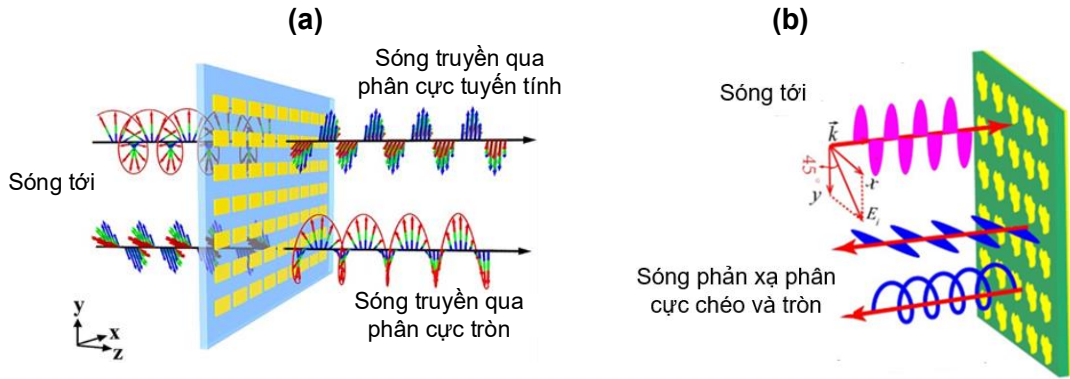
Hình 1.12. Phân loại ứng dụng của MA [66]

Các ứng dụng của MA được phân thành hai nhóm: các ứng dụng thực tại và các ứng dụng dự kiến trong tương lai. Về khả năng ứng dụng trong thực tại, theo độ rộng của dải phổ hấp thụ, bộ hấp thụ được chia thành hấp thụ băng rộng và hấp thụ băng hẹp. Dải tần số quang, dải tần THz và dải tần số vi ba là trọng tâm chính của băng rộng, mặt khác, băng tần hẹp chủ yếu liên quan đến các ứng dụng trong vùng tần số vô tuyến. Ngoài ra, theo dải tần số, các bộ hấp thụ tiếp tục được chia thành hấp thụ dải tần số quang, dải tần THz và dải tần số vi ba.

1.2.2. Vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ và ứng dụng

Độ lớn, pha và độ phân cực là các tính chất cơ bản của sóng điện từ. Trong số đó, sự phân cực đóng vai trò quan trọng và được kỳ vọng sẽ trở thành yếu tố then chốt trong công nghệ truyền thông tương lai, cho phép truyền tải thông tin giữa các thiết bị khác nhau. Việc kiểm soát trạng thái phân cực của sóng điện từ là một yêu cầu thiết yếu. Để kiểm soát trạng thái phân cực của sóng điện từ, các phương pháp thông thường được sử dụng như quang học cách tử, tinh thể lưỡng sắc và hiệu ứng lưỡng chiết. Tuy nhiên, các phương pháp này tồn tại hạn chế là thể tích công kênh và độ dày lớn. Gần đây, với khả năng điều khiển biên độ và pha của sóng điện từ, MMs đã cho thấy tiềm năng ứng dụng trong việc thiết kế bộ chuyển đổi phân cực sóng điện từ do ưu điểm nhỏ gọn hơn so với các phương pháp thiết kế thông thường [67]. Cho đến nay, các nghiên cứu về MPC đã được thiết kế hoạt động với các dải tần số khác nhau từ GHz, THz cho đến vùng ánh sáng nhìn thấy. Về cấu hình, bộ chuyển đổi phân cực được chia thành hai loại, gồm cấu hình theo phương pháp truyền qua và cấu hình theo

phương pháp phản xạ. Cấu hình theo phương pháp truyền qua đòi hỏi thiết kế đa lớp phức tạp, khiến việc chế tạo trở nên khó khăn. Thêm vào đó, loại cấu hình này thường không thể đồng thời đạt được hiệu suất cao và băng thông rộng [68]. Đối với cấu hình phản xạ, sử dụng các cấu trúc MMs hai chiều đơn lớp, mang lại giải pháp đơn giản và hiệu quả hơn [69, 70]. Hình 1.13 (a) minh họa chuyển đổi phân cực sóng truyền qua và Hình 1.13 (b) minh họa chuyển đổi phân cực sóng phản xạ.



Hình 1.13. Hình ảnh MPC (a) chuyển đổi phân cực sóng truyền qua [71] và (b) chuyển đổi phân cực sóng phản xạ [72]

Trong luận án này, nghiên cứu sinh tập trung nghiên cứu nguyên lý thiết kế, cơ chế hoạt động của MPC chuyển đổi phân cực sóng phản xạ.

▪ Cơ chế chuyển đổi phân cực sóng điện từ

Vật liệu biến hóa có khả năng điều khiển và chuyển đổi phân cực sóng điện từ dựa trên các cơ chế tương tác đặc biệt giữa sóng và cấu trúc vật liệu làm thay đổi hướng dao động của vector điện trường E , dẫn đến sóng sau khi phản xạ được chuyển đổi phân cực so với sóng tới.

Đối với bộ chuyển đổi phân cực sóng phản xạ, quá trình chuyển đổi phân cực sóng phản xạ có thể đạt được bằng cách thiết kế các cấu trúc có sự bất đối xứng như cấu trúc hình chữ L, hình elip, hình xoắn ốc,... Tính bất đối xứng của cấu trúc làm ảnh hưởng đến sự phân bố của trường điện từ dẫn đến thay đổi trạng thái phân cực của sóng sau khi phản xạ [73].

Với thiết kế vật liệu biến hoá chuyển đổi phân cực sóng phản xạ cấu trúc gồm 3 lớp kim loại - điện môi - kim loại, lớp kim loại liên tục ở mặt dưới đóng vai trò ngăn chặn sóng điện từ truyền qua vật liệu. Sóng điện từ sau khi đi qua lớp điện môi sẽ phản xạ tại bề mặt của lớp này, và sóng phản xạ thu được sẽ có sự chuyển đổi phân cực so với sóng tới.

Để đạt hiệu quả chuyển đổi phân cực, sóng điện từ tương tác với vật liệu cần tạo ra sóng phản xạ có cường độ đáng kể ở phân cực mong muốn (TE hoặc TM). Khi

sóng tới có một phân cực cụ thể (ví dụ TE) chiếu vào vật liệu, bề mặt với tính chất không đối xứng của vật liệu sẽ tạo ra các thành phần phản xạ và truyền qua mang phân cực khác nhau. Sự tương tác này dẫn đến hiệu ứng chuyển đổi phân cực của sóng điện từ.

Khi sóng điện từ tương tác với vật liệu, biểu thức viết dưới dạng năng lượng đối với thành phần phản xạ (R), thành phần hấp thụ (A) và thành phần truyền qua (T) có dạng [1, 74]:

$$R(\omega) + A(\omega) + T(\omega) = 1 \quad (1.5)$$

$$= A(\omega) + T(\omega) + |R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2. \quad (1.6)$$

Trong đó $R_{xy} = E_{rx} / E_{iy}$ và $R_{yy} = E_{ry} / E_{iy}$ tương ứng là hệ số phản xạ vuông góc và hệ số phản xạ đồng phân cực của sóng phản xạ.

Để đánh giá hiệu suất chuyển đổi phân cực của bộ chuyển đổi phân cực tuyến tính, tỉ lệ chuyển đổi phân cực (Polarization Conversion Ratio – PCR) được tính theo biểu thức sau [74]:

$$PCR = \frac{|R_{xy}|^2}{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2}. \quad (1.7)$$

Ngoài ra, để đánh giá mức độ hiệu quả của năng lượng sóng tới được chuyển đổi thành sóng có phân cực mong muốn, tỉ lệ chuyển đổi năng lượng (energy conversion ratio - ECR) được sử dụng và được xác định bởi biểu thức sau [75]:

$$ECR = |r_{xy}|^2 + |r_{yy}|^2. \quad (1.8)$$

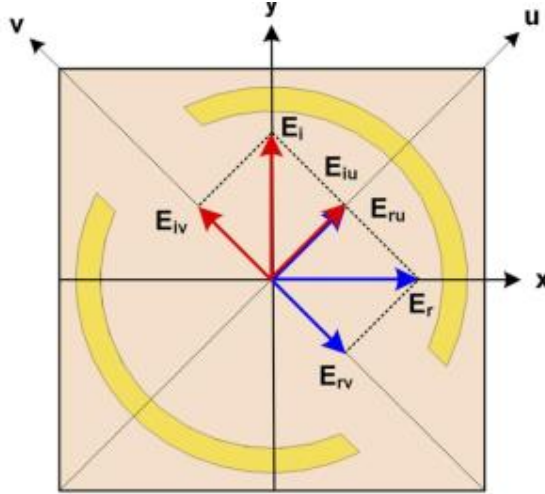
Từ biểu thức (1.7) cho thấy hiệu suất chuyển đổi phân cực phụ thuộc vào các hệ số R_{xy} và R_{yy} . Giá trị hiệu suất chuyển đổi phân cực thể hiện mức độ hiệu quả của quá trình chuyển đổi phân cực. Giá trị của PCR càng gần 100% thì hiệu suất của bộ chuyển đổi phân cực càng cao. Khi sự phân cực của sóng tới vật liệu dọc theo trục y , hiệu suất chuyển đổi phân cực được tính theo biểu thức (1.7). Tương tự, đối với sóng tới phân cực x , các chỉ số x và y trong biểu thức (1.7) được hoán đổi cho nhau.

Khi hệ số phản xạ đồng phân cực R_{yy} cao, điều đó cho thấy sóng điện từ phản xạ hoặc truyền qua vật liệu vẫn giữ nguyên phân cực ban đầu (phân cực y). Trong trường hợp này, hiệu suất chuyển đổi phân cực sẽ thấp. Ngược lại, nếu hệ số phản xạ vuông góc R_{xy} cao, điều này biểu thị năng lượng của sóng tới đã được chuyển đổi từ phân cực x thành phân cực y (hoặc ngược lại), dẫn đến hiệu suất chuyển đổi phân cực cao. Vậy, để đạt được hiệu suất chuyển đổi cao, cần tối thiểu hóa sự phản xạ đồng

phân cực (R_{yy} thấp) và tối đa hệ số phản xạ vuông góc (R_{xy} cao). Quá trình tối ưu hóa hiệu suất chuyển đổi phân cực có thể thực hiện bằng cách thiết kế cấu trúc MMs sao cho sự tương tác giữa sóng điện từ và các thành phần của vật liệu được tăng cường. Điều này giúp kích hoạt mạnh mẽ các cơ chế cộng hưởng điện từ bên trong vật liệu, từ đó thúc đẩy quá trình chuyển đổi phân cực hiệu quả.

Đối với sóng phân cực sóng phản xạ, trạng thái chuyển đổi phân cực được quyết định bởi độ lớn và sự lệch pha của sóng phản xạ đồng phân cực và sóng phản xạ vuông góc. Một số dạng chuyển đổi phân cực bao gồm chuyển đổi phân cực tuyến tính thành phân cực tuyến tính (Linear to Linear - LL) [76, 77], chuyển đổi phân cực tuyến tính thành phân cực tròn (Linear to Circular - LC) [78, 79], chuyển đổi phân cực tròn thành phân cực tròn (Circular to Circular - CC) [80] đã được nghiên cứu.

Để xác định trạng thái phân cực của hiện tượng chuyển đổi phân cực sóng phản xạ diễn ra trên MMs, điện trường tới và điện trường phản xạ được phân tích bằng công cụ toán học như thể hiện trên Hình 1.14.



Hình 1.14. Phân tích điện trường tới phân cực y và phản xạ phân cực x thành các thành phần u, v

Sóng điện từ tới theo phương y (E_i) có thể phân tách thành hai thành phần E_{iu} và E_{iv} có phương $\pm 45^\circ$ theo trục y . Sóng phản xạ E_r theo phương x cũng được tách thành hai thành phần E_{ru} và E_{rv} có phương $\pm 45^\circ$ theo trục x . Sóng tới và sóng phản xạ được biểu diễn bởi biểu thức sau [73]:

$$\begin{aligned} E_i &= \hat{y}E_i = \hat{u}E_{iu} + \hat{v}E_{iv}. \\ E_r &= \hat{u}E_{ru} + \hat{v}E_{rv} = \hat{u}(r_{uu}E_{iu}e^{i\Phi_{uu}} + r_{uv}E_{iv}e^{i\Phi_{uv}}) + \hat{v}(r_{vu}E_{iu}e^{i\Phi_{vu}} + r_{vv}E_{iv}e^{i\Phi_{vv}}). \end{aligned} \quad (1.9)$$

Trong đó, $\hat{u}$ và $\hat{v}$ là các vectơ đơn vị; r_{uu} , Φ_{uu} và r_{vv} , Φ_{vv} là độ lớn và pha của phản xạ đồng phân cực và r_{uv} , Φ_{uv} và r_{vu} , Φ_{vu} lần lượt là độ lớn và pha của phản xạ vuông góc trong hệ tọa độ uv . Ở đây, sự mất mát năng lượng của sóng điện từ tới có

thể được bỏ qua vì điện môi có tổn thất thấp. Do đó, biên độ của r_{uu} và r_{vv} có thể được xem là bằng nhau.

- Chuyển đổi phân cực chéo xảy ra khi:

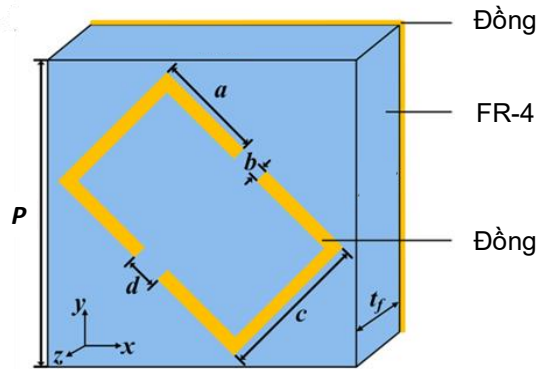
$r_{uu} \approx r_{vv} \approx 1; r_{uv} \approx r_{vu} \approx 0$ và $\Delta\varphi = \Phi_{uu} - \Phi_{vv} = \pm 180^\circ + 2k\pi$ (k là số nguyên), bộ chuyển đổi thực hiện chuyển đổi phân cực tuyến tính sang phân cực tròn. Điều đó chứng tỏ rằng E_{ru} hoặc E_{rv} ngược với hướng tới của chúng, dẫn đến trường tổng hợp của E_{ru} và E_{rv} sẽ nằm dọc theo trục x . Điều đó có nghĩa là sóng tới phân cực được quay một góc 90° và lúc đó bộ chuyển đổi thực hiện chuyển đổi phân cực chéo [81].

- Chuyển đổi phân cực tuyến tính thành phân cực tròn xảy ra khi:

$r_{uu} \approx r_{vv} \approx 1; r_{uv} \approx r_{vu} \approx 0$ và $\Delta\varphi = \Phi_{uu} - \Phi_{vv} = \pm 90^\circ + 2k\pi$ (k là số nguyên), bộ chuyển đổi thực hiện chuyển đổi phân cực tuyến tính sang phân cực tròn [79, 82].

- Chuyển đổi phân cực tròn sang phân cực tròn xảy ra khi cấu trúc tạo ra đảo ngược độ trễ pha giữa hai sóng phản xạ thành phần. Điều này có nghĩa là khi sóng ban đầu có phân cực tròn trái, độ trễ pha giữa hai sóng phản xạ thành phần là $+90^\circ$. Sau khi đi qua vật liệu chuyển đổi phân cực tròn sang phân cực tròn, nó sẽ bị biến đổi thành phân cực tròn phải với độ trễ pha giữa hai thành phần lúc này là -90° .

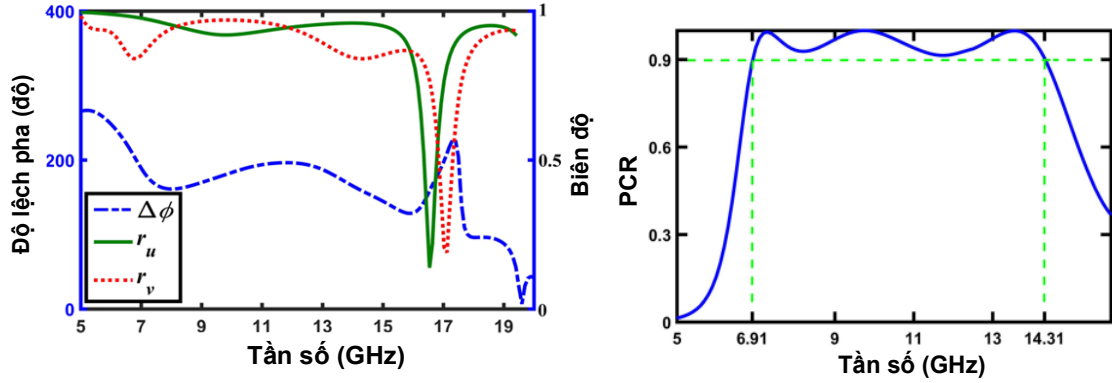
Ví dụ phân tích các đặc trưng điện từ của một MPC có cấu trúc như mô tả trên Hình 1.15 [83].



Hình 1.15. Cấu trúc ô cơ sở của MPC đề xuất [83]

Độ lớn và pha của các hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực vuông góc được biểu diễn trên Hình 2.5 (a). Trong hình, đường nét liền màu xanh lục biểu thị r_u , đường nét đứt màu đỏ biểu thị cho r_v và đường nét đứt màu xanh lam biểu thị cho độ lệch pha của r_u và r_v . Từ Hình 2.5 (a) thấy rằng trong dải tần từ 6,91 - 14,31 GHz, độ lớn của các hệ số chuyển đổi đồng phân cực có giá trị gần bằng 1. Bên cạnh đó, độ lệch pha sóng phản xạ giữa phân cực u và v trong dải tần từ 6,91 - 14,31 GHz là khoảng $\pm 180^\circ$ cho thấy bộ chuyển đổi được thiết kế thực hiện chuyển đổi phân cực tuyến tính trong băng tần rộng này.

Kết quả khảo sát hiệu suất chuyển đổi phân cực của cấu trúc đề xuất được thể hiện trên Hình 1.16(b). Kết quả chỉ ra rằng hiệu suất chuyển đổi phân cực đạt trên 90% trong dải tần từ 6,91 - 14,31 GHz tương ứng với dải tần mà hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực vuông góc có giá trị gần bằng 1 và 0, độ lệch pha của chúng là khoảng $\pm 180^\circ$.



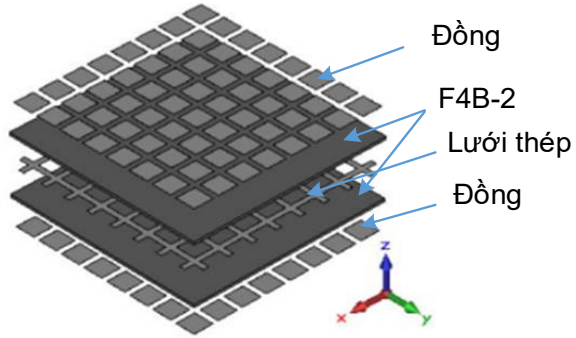
Hình 1.16. (a) Độ lớn và pha của các hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực vuông góc; (b) Hiệu suất chuyển đổi phân cực của MPC đề xuất [83]

▪ *Tiềm năng ứng dụng của vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ*

MPC đã bắt đầu được ứng dụng vào nhiều lĩnh vực trong thực tế, đặc biệt trong các ngành công nghệ cao, trong y tế và lĩnh vực quân sự. Trong y tế, MPC đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện chất lượng hình ảnh y tế, chẳng hạn như hình ảnh siêu âm và MRI. Nhờ khả năng điều chỉnh tần số và phân cực sóng điện từ, MPC giúp tăng độ rõ nét của hình ảnh ngay cả trong môi trường có mức nhiễu cao, qua đó hỗ trợ chẩn đoán chính xác hơn. Trong quân sự, MPC được ứng dụng để làm lệch hướng sóng radar, giúp các phương tiện như máy bay chiến đấu, tàu ngầm hoặc xe tăng tránh bị phát hiện. Vật liệu này tạo ra hiệu ứng “tàng hình” bằng cách thay đổi hướng phản xạ của sóng radar, khiến chúng không quay trở lại nguồn phát radar. Do đó, radar không thể nhận diện được các vật thể mục tiêu, nâng cao khả năng ẩn mình và bảo vệ chiến lược.

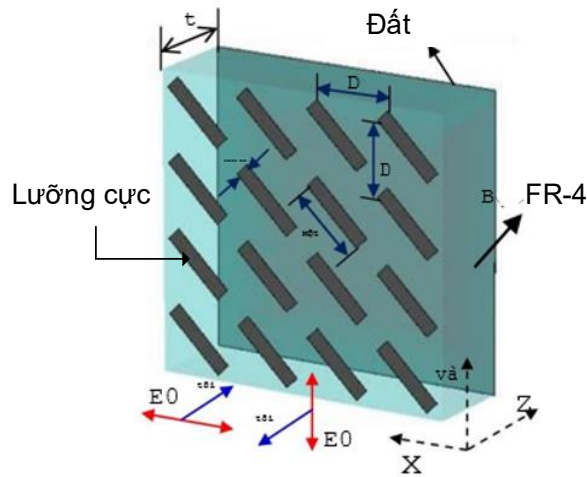
Một thiết kế mái che radar tàng hình được Yan đề xuất nhằm tối ưu hóa khả năng tàng hình của sóng điện từ tới, đặc biệt ứng dụng trong lĩnh vực quân sự [84]. Cấu trúc đề xuất kết hợp giữa một bề mặt chọn lọc tần số (Frequency Selective Surfaces - FSS) và một lớp chuyển đổi phân cực được phân cách bằng một lớp xốp.

Cấu trúc của FSS bao gồm ba lớp: lớp trên cùng và dưới cùng bao gồm các mẫu kim loại đồng hình vuông tuần hoàn có độ dẫn điện $5,8 \times 10^7$ S/m được ngăn cách bởi chất nền điện môi F4B-2 dày 2mm có hằng số điện môi là 2,65, tổn hao điện môi là 0,001 và mảng lưới dây sắp xếp theo chu kì. Mô hình 3 chiều của FSS được mô tả trên Hình 1.17.

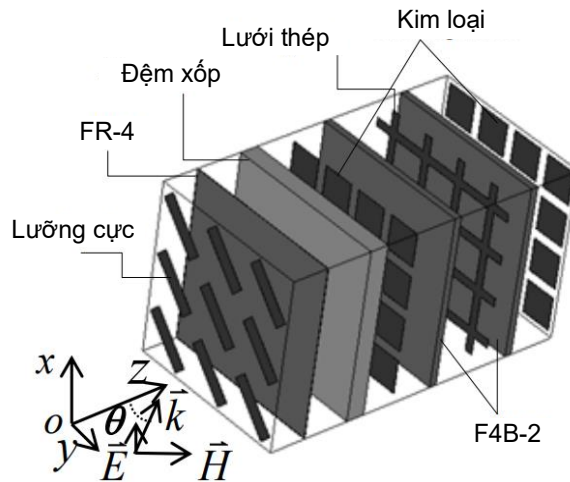


Hình 1.17. Mô hình 3D của FSS [84]

Cấu trúc của MPC cũng bao gồm 3 lớp: lớp trên cùng là mẫu kim loại có cấu trúc lưỡng cực xiên tuần hoàn, được tạo trên bề mặt của chất nền điện môi FR-4 mỏng có độ dày 0,1 mm, dưới cùng là lớp kim loại đồng, đóng vai trò như một tấm chắn phản xạ hoàn toàn sóng điện từ thể hiện như trên Hình 1.18.



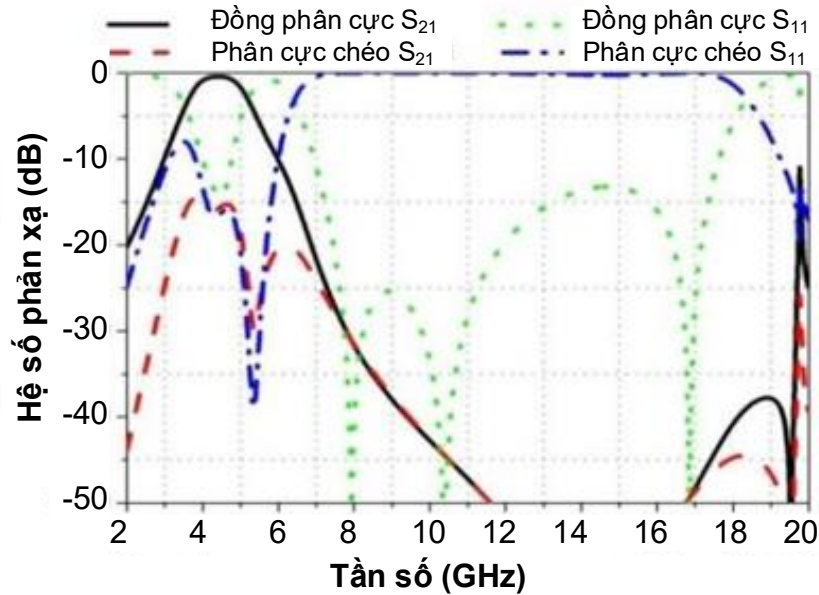
Hình 1.18. Mô hình 3D của MPC phản xạ được đề xuất [84]



Hình 1.19. Hình ảnh 3D của cấu trúc MPC kết hợp FSS làm mái che tàng hình [84]

Để đạt được khả năng tàng hình cho mái che radar đối với sóng điện từ phân

cực tuyến tính, thiết kế kết hợp giữa FSS và MPC được thực hiện nhằm thay đổi trạng thái phân cực của sóng như được thể hiện trên Hình 1.19. Sự kết hợp này cho phép điều chỉnh và kiểm soát hiệu quả phân cực của sóng phản xạ, từ đó giúp ngăn chặn radar phát hiện các vật thể mục tiêu. FSS giúp lựa chọn và điều chỉnh tần số sóng radar, ngăn không cho sóng phản xạ quay trở lại nguồn phát. MPC được sử dụng để chuyển đổi phân cực của sóng phản xạ, làm thay đổi hướng và đặc tính của sóng điện từ, giúp sóng radar không thể nhận diện vật thể. Việc kết hợp giữa hai yếu tố này giúp tạo ra hiệu ứng "tàng hình" mạnh mẽ hơn, vì sóng radar sẽ bị lệch hướng và không phản xạ lại đúng theo phương thức thông thường, khiến radar không thể nhận diện được các phương tiện như máy bay chiến đấu, tàu ngầm hoặc các phương tiện quân sự khác.



Hình 1.20. Hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực vuông góc của cấu trúc đề xuất [84]

Các tham số S mô phỏng sóng phản xạ đồng phân cực và phân cực vuông góc trong trường hợp sóng tới vuông góc với bề mặt được mô tả trên Hình 1.20. Kết quả mô phỏng cho thấy cấu trúc MPC kết hợp FSS mang lại những đặc tính sau:

- Có một dải thông tại tần số 4,4 GHz, độ rộng băng thông -3dB xấp xỉ 1,55 GHz đối với sóng đồng phân cực. Điều này cho thấy sóng phản xạ đồng phân cực đạt hiệu suất tốt trong một dải tần cụ thể.

- Phản xạ phân cực chéo có băng thông rộng từ 7,0 GHz - 17,6 GHz, hiện tượng này xảy ra đối với cả phân cực x và phân cực y trong trường hợp sóng tới vuông góc với bề mặt vật liệu. Điều này có nghĩa là sóng điện từ được chuyển đổi phân cực hiệu quả trong một dải tần rộng.

Những kết quả này chứng tỏ rằng cấu trúc MPC kết hợp với FSS không chỉ cung cấp khả năng tàng hình mà còn cho phép truyền và phản xạ sóng trong dải tần rộng. Trong dải tần từ 4,2 GHz đến 4,6 GHz, sóng điện từ có thể truyền qua với cùng trạng thái phân cực của nó. Trong khi đó, trong dải tần từ 7,0 GHz đến 17,6 GHz, sóng tới có thể bị phản xạ phân cực chéo hiệu quả. Vì vậy, mái vòm tàng hình này có khả năng làm vật thể "vô hình" đối với hệ thống radar phân cực tuyến tính, vì ngay cả sóng phát hiện cũng bị phản xạ theo hướng tới của nó, không quay lại radar để nhận diện. Điều này làm tăng khả năng ẩn mình của các phương tiện quân sự trong môi trường chiến đấu.

1.3. Vật liệu biến hóa đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ

MMs với những tính chất điện từ, quang, nhiệt và các tính chất khác đã chứng tỏ hiệu quả cao trong nhiều lĩnh vực. Tuy nhiên, phần lớn các ứng dụng hiện tại đang là đơn lẻ, trong khi nhiều tình huống thực tế yêu cầu một cấu trúc tích hợp nhiều tính năng. Chẳng hạn, các bộ phận của máy bay đôi khi yêu cầu không chỉ hiệu suất tàng hình điện từ cao mà còn cần khả năng giảm tiếng ồn và đảm bảo các tính chất cơ học vượt trội, hoặc trong các ứng dụng quân sự, máy bay tàng hình thông minh cần sự chuyển đổi linh hoạt giữa chức năng hấp thụ, giảm thiểu phản xạ radar để tránh bị phát hiện và chức năng chuyển đổi phân cực khiến radar xác định sai vị trí thực tế của máy bay. Trong những trường hợp như vậy, các MFM đa chức năng có thể đóng một vai trò quan trọng. MFM có khả năng điều khiển sóng điện từ và thực hiện nhiều nhiệm vụ trong cùng một cấu trúc, cho phép tích hợp nhiều tính năng như tàng hình, hấp thụ sóng, và các tính năng cơ học trong một thiết kế duy nhất. Với những tiến bộ trong thiết kế và chế tạo, MFM hứa hẹn mang lại nhiều ứng dụng mới trong các lĩnh vực như viễn thông, radar, cảm biến, và tàng hình. Một số kết quả nghiên cứu gần đây về MFM chẳng hạn như cấu trúc MFM có khả năng giảm nhiệt và chịu tải do Chen và cộng sự đề xuất giúp mở rộng ứng dụng trong các hệ thống yêu cầu tính bền và chống nhiệt cao [85], Yuan và cộng sự đã đề xuất một chất hấp thụ ba chiều (3D) kết hợp màng tổ ong và màng điện trở, đạt được khả năng hấp thụ sóng điện từ và hiệu suất cơ học cao [86], L. L. Zhang và cộng sự đã phát triển một cấu trúc phân cực phản xạ đa dải tần, có thể điều chỉnh được và chuyển đổi sóng hồng ngoại giữa phân cực tuyến tính và phân cực chéo dựa trên mảng graphene loại hình elip không tuần hoàn [87]. Những nghiên cứu này không chỉ minh họa sự phát triển mạnh mẽ trong lĩnh vực MFM mà còn mở ra nhiều triển vọng ứng dụng trong các lĩnh vực yêu cầu tính linh hoạt cao và nhiều tính năng kết hợp trong một hệ thống duy nhất.

Trong số các MFM, MFM tích hợp hai chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân

cực sóng điện từ hiện đang thu hút nhiều sự quan tâm nghiên cứu, chúng giúp kiểm soát và thao tác sóng điện từ một cách hiệu quả và linh hoạt mở ra nhiều ứng dụng tiềm năng trong tương lai.

1.3.1. Một số phương pháp thiết kế vật liệu biến hóa đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ

Với yêu cầu về tính di động, nhỏ gọn và có thể chuyển đổi hoạt động giữa hai chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ, một số phương pháp thiết kế MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực hiệu quả gần đây đã được đề xuất, bao gồm:

Tích hợp các linh kiện điện tử như điốt: Việc tích hợp các phần tử điện tử như điốt vào các vật liệu MFM giúp điều khiển dòng điện và tần số của sóng điện từ. Những phần tử này cung cấp khả năng thay đổi tính chất của vật liệu, điều chỉnh các đặc tính như hấp thụ sóng, chuyển đổi phân cực hoặc thay đổi tính chất quang học khi có sự tác động của các yếu tố bên ngoài như điện trường, từ trường [88-91].

Thay đổi hình dạng cơ học: Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc thay đổi hình dạng cơ học của vật liệu có thể giúp đạt được nhiều chức năng khác nhau, như điều chỉnh khả năng hấp thụ sóng điện từ, chuyển đổi phân cực hoặc tăng cường khả năng tàng hình. Việc thay đổi cấu trúc hoặc hình dạng của các vật liệu giúp chúng linh hoạt hơn trong việc đáp ứng đa dạng các yêu cầu [92, 93].

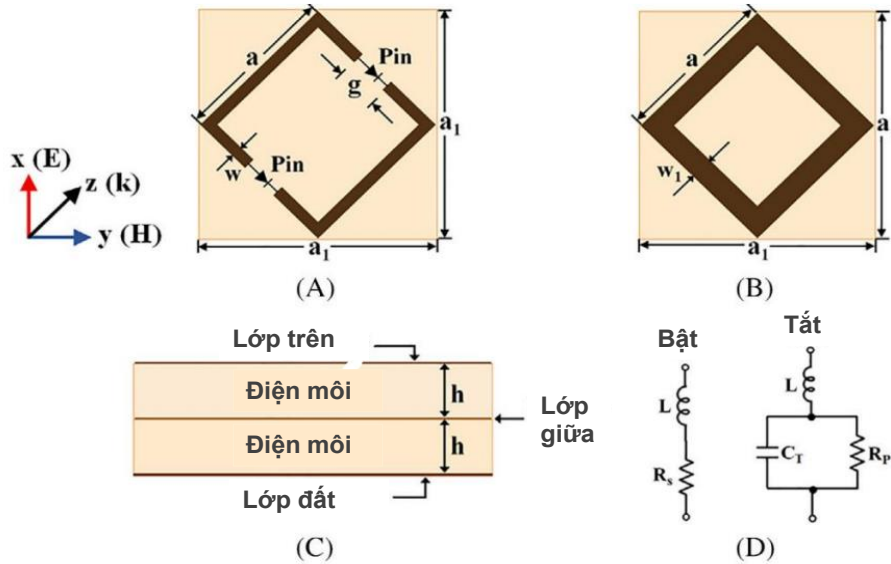
Tích hợp vật liệu nước: Một hướng nghiên cứu tiềm năng cho vật liệu đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực là cấu trúc tích hợp nước, với sự hỗ trợ của nước như một thành phần điều chỉnh chính. Sự thay đổi lượng nước trong cấu trúc có thể làm thay đổi đáng kể các đặc tính cộng hưởng của vật liệu, giúp kiểm soát độ hấp thụ theo yêu cầu đồng thời có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ [18, 19].

Sử dụng vật liệu có khả năng thay đổi trạng thái: Các vật liệu như Chalcogenide GeSbTe, Vanadium dioxide (VO_2) và graphene có khả năng thay đổi trạng thái vật lý của chúng dưới tác động của nhiệt độ, ánh sáng hoặc điện trường. Những vật liệu này có thể chuyển từ trạng thái này sang trạng thái khác, giúp cải thiện tính linh hoạt và khả năng ứng dụng của MFM. Chúng đặc biệt hữu ích trong các hệ thống yêu cầu khả năng điều chỉnh tính chất điện từ hoặc quang học theo thời gian hoặc điều kiện môi trường [94-98].

1.3.1.1. Phương pháp tích hợp các linh kiện điện tử như điốt

Ta biết rằng hầu hết các vật liệu biến hóa siêu bề mặt (metasurface materials) - còn gọi là vật liệu 2D, được hình thành bởi cấu trúc cộng hưởng như bộ cộng hưởng vòng chia SRRs. Việc thu được các phản ứng khác nhau của sóng điện từ khi truyền

qua siêu bề mặt còn tùy thuộc vào dải tần hoạt động. Đối với hầu hết các ứng dụng thực tế như truyền thông không dây, tần số hoạt động phải cố định và do đó, để đạt được hoạt động đa chức năng, vật liệu biến hoá siêu bề mặt cần phải điều chỉnh cấu hình lại được. Một trong những cách để cấu hình lại được các vật liệu biến hoá siêu bề mặt thì việc tích hợp các phần tử như điốt là một trong những giải pháp được thực hiện khá phổ biến hiện nay.



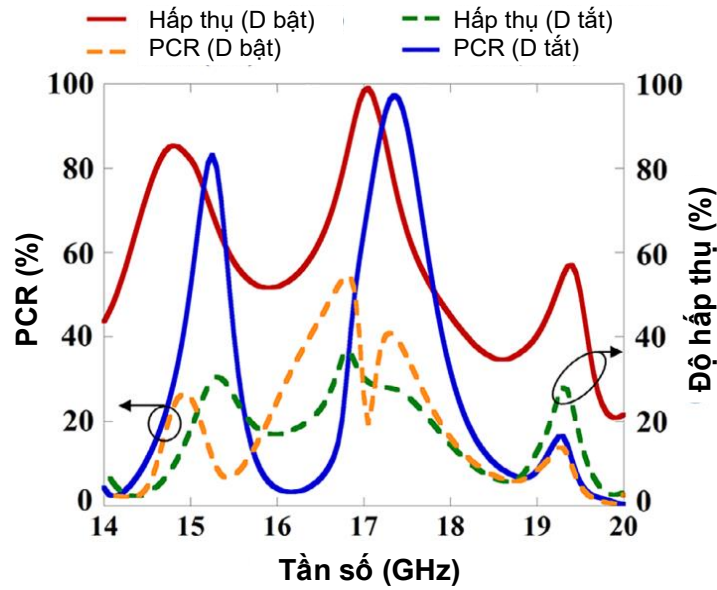
Hình 1.21. (a) lớp trên của ô đơn vị; (b) lớp giữa của ô đơn vị; (c) hình chiếu bên của ô đơn vị và (d) mạch tương đương của điốt PIN ở chế độ bật và tắt [12]

Hình 1.21 trình bày cấu trúc do R. Dutta và nhóm nghiên cứu đề xuất để tạo vật liệu biến hoá siêu bề mặt đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ tích hợp điốt PIN. Cấu trúc đề xuất bao gồm một dãy tuần hoàn các ô đơn vị, mỗi ô đơn vị bao gồm hai chất nền điện môi có hằng số điện môi là 4,4 và độ tổn thất là 0,02. Lớp cộng hưởng kim loại phía trên có dạng hình vuông được tạo từ vật liệu đồng. Lớp kim loại phía dưới được thiết kế để chặn hoàn toàn sự truyền qua của sóng điện từ. Hai khe được khắc ở lớp trên để gắn phần tử điốt PIN [12].

Với cấu trúc sử dụng điốt PIN, tính đa chức năng được thực hiện thông qua việc sử dụng điốt PIN như một công tắc bên ngoài để điều chỉnh giữa chế độ hấp thụ và chế độ chuyển đổi phân cực.

Hình 1.22 trình bày kết quả độ hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực của cấu trúc đề xuất trong dải tần số từ 14 – 20 GHz ứng với hai trạng thái tắt, bật của điốt PIN. Khi điốt PIN ở trạng thái tắt (điện trở $R_s = 1,5 \text{ G}\Omega$), điốt PIN tạo trở kháng cao giữa các dải kim loại. Do đó, dải kim loại ở lớp trên được coi như hở mạch, độ dẫn điện bề mặt hấp thụ bằng 0, dẫn đến cấu trúc vòng phân chia không đối xứng đối với trục x và trục y . Lúc này cấu trúc hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực với

hiệu suất chuyển đổi phân cực lớn hơn 80% tại các tần số 15,25 GHz và 17,35 GHz.

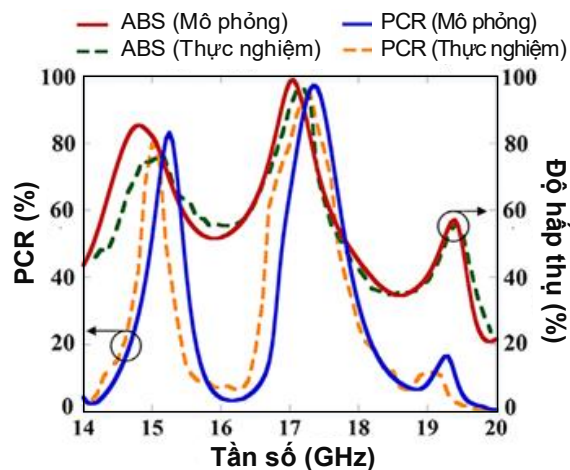


Hình 1.22. Độ hấp thụ và PCR của cấu trúc đề xuất tương ứng với hai trạng thái tắt, bật của điốt PIN [12]

Khi điốt PIN ở trạng thái bật (điện trở $R_s = 10 \Omega$), trở kháng của điốt PIN là rất nhỏ, lúc này cấu trúc hoạt động ở chế độ hấp thụ tại tần số 14,85 và 17,05 GHz với độ hấp thụ đạt được lớn hơn 80%.

Cơ chế hoạt động này cho phép cấu trúc chuyển đổi linh hoạt giữa hai chức năng, đáp ứng các yêu cầu khác nhau trong dải tần số được thiết kế.

Kết quả khảo sát độ hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực giữa mô phỏng và thực nghiệm được thể hiện trong Hình 1.23.

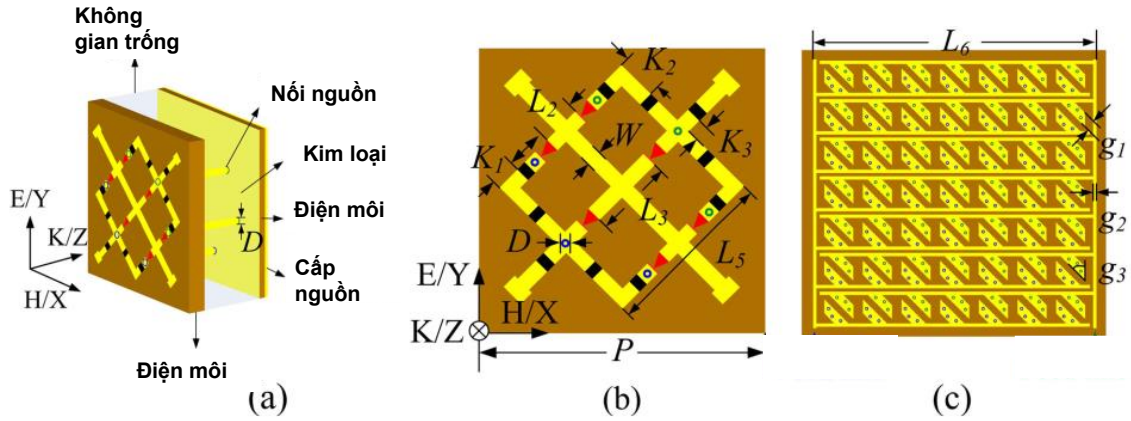


Hình 1.23. Độ hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi trong mô phỏng và thực nghiệm [12]

Theo đó, kết quả thực nghiệm cho thấy sự phù hợp tốt với kết quả mô phỏng. Tuy nhiên, có một số khác biệt nhỏ giữa mô phỏng và thực nghiệm được ghi nhận. Nguyên nhân chính là do trong mô phỏng, sóng tới được giả định là lí tưởng, điều

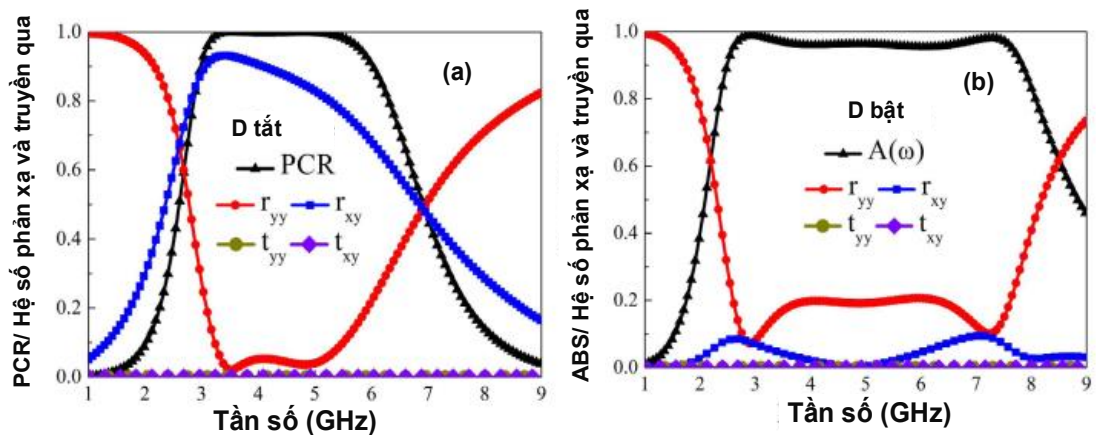
này khó đạt được hoàn toàn trong các điều kiện thực tế tại phòng thí nghiệm. Ngoài ra, một số sai lệch nhỏ cũng có thể phát sinh từ các lỗi trong quá trình chế tạo mẫu thực nghiệm. Những khác biệt này được đánh giá là không đáng kể, cho thấy cấu trúc đề xuất hoạt động hiệu quả và đáng tin cậy trong cả điều kiện thực nghiệm và mô phỏng.

Một cấu trúc khác của MFM tích hợp phân tử điốt PIN được đề xuất bởi J.Wang và nhóm nghiên cứu được trình bày như trên Hình 1.24 [99].



Hình 1.24. Ô cơ sở của MFM đề xuất (a) Hình ảnh 3D, (b) hình ảnh nhìn từ trên xuống, (c) mặt dưới tấm cấp nguồn [99]

Kết quả mô phỏng hiệu suất chuyển đổi phân cực, hiệu suất hấp thụ và các hệ số phản xạ trong trường hợp điốt PIN ở trạng thái tắt và trạng thái bật như thể hiện trên Hình 1.25 cho thấy cấu trúc do Tian và nhóm nghiên cứu đề xuất thể hiện khả năng chuyển đổi phân cực chéo với hiệu suất chuyển đổi phân cực đạt trên 90% trong dải tần 2,97 - 6,03 GHz khi điốt PIN ở trạng thái tắt và độ hấp thụ đạt gần tuyệt đối với độ hấp thụ trên 90% trong dải tần từ 2,56 - 7,62 GHz khi điốt PIN ở trạng thái bật.



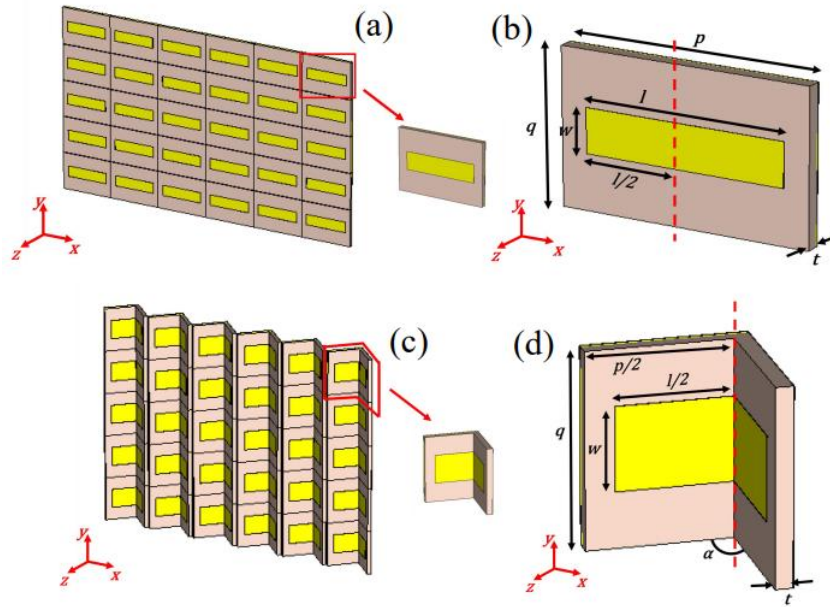
Hình 1.25. Hiệu suất chuyển đổi phân cực và các hệ số phản xạ khi điốt ở trạng thái tắt và (b) độ hấp thụ và các hệ số phản xạ khi điốt ở trạng thái bật [99]

Mặc dù phương pháp tích hợp các phân tử cho thấy hiệu suất chuyển đổi cao,

khả năng điều khiển dễ dàng thông qua điện áp kích thích. Tuy nhiên phương pháp này có hạn chế là phức tạp trong thiết kế và chế tạo do yêu cầu về tích hợp linh kiện bán dẫn, ngoài ra việc phân cực cho diốt hoạt động yêu cầu một thiết bị nguồn đi kèm.

1.3.1.2. Phương pháp thay đổi hình dạng cơ học

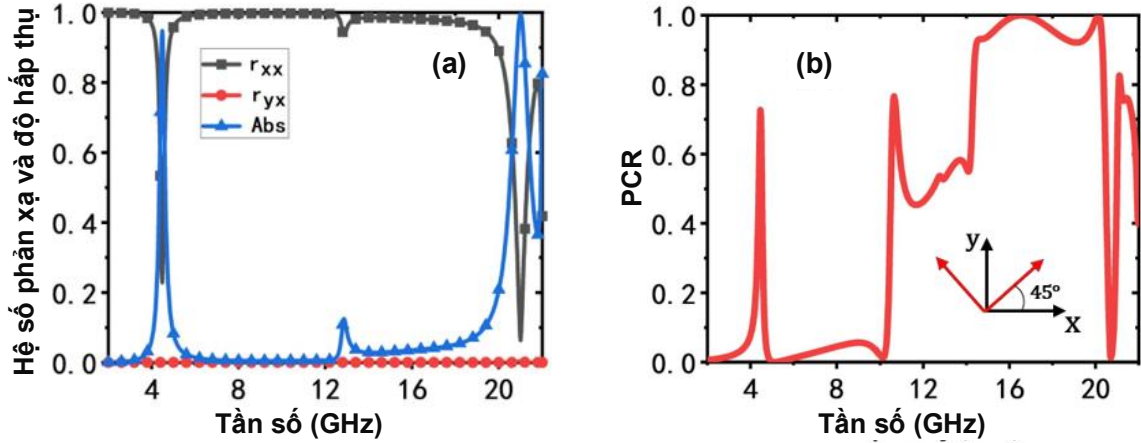
Với sự phát triển của công nghệ sản xuất, các MMs hiện nay có thể được thiết kế linh hoạt với khả năng uốn cong, kéo dài, và thậm chí tạo thành các hình dạng tùy ý. So với cấu trúc MMs phẳng, MMs không phẳng có nhiều ưu thế vượt trội, bao gồm khả năng tích hợp đa chức năng, thu nhỏ kích thước vật liệu và tăng cường hiệu suất hấp thụ sóng điện từ [100, 101]. Một thiết kế MFM với cấu trúc không phẳng dạng zig-zag với khả năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực, do Y. Liu và cộng sự đề xuất, được trình bày trong Hình 1.26.



Hình 1.26. MMs đề xuất với (a) (b) cấu trúc phẳng và (c) (d) cấu trúc zig-zag [101]

Cấu trúc vật liệu phẳng ban đầu được thể hiện trong Hình 1.26(a) bao gồm một mảng tuần hoàn các ô đơn vị với bề mặt ô đơn vị là một dải kim loại, ngăn cách giữa dải kim loại và lớp đồng liên tục phía dưới là lớp điện môi FR-4 có hằng số điện môi là 4,3 và độ suy hao là 0,025. Để thay đổi hướng phân cực của sóng điện từ khi chiếu đến, cấu trúc phẳng được gấp tại vị trí trung tâm của từng ô đơn vị với một góc gấp khúc nhất định như thể hiện trên Hình 1.26(c),(d). Kết quả khảo sát thể hiện trên Hình 1.27 cho thấy cấu trúc thực hiện chức năng hấp thụ tại các tần số 4,48 GHz, 21,02 GHz, đồng thời thực hiện chức năng chuyển đổi phân cực chéo trong dải tần 14,43 - 20,32 GHz của MMs khi chuyển sang cấu trúc zig-zag có nhiều điểm tần số cộng hưởng hơn và độ hấp thụ cao hơn như thể hiện trên Hình 1.27.

Bên cạnh đó, cấu trúc Hình 1.26(c) có thể thực hiện chuyển đổi phân cực tuyến tính thành phân cực tròn, chuyển đổi phân cực tròn thành phân cực tuyến tính băng rộng, chuyển đổi phân cực chéo băng rộng thành phân cực tròn băng rộng. Ngoài ra có thể thu được sóng phân cực tuyến tính phản xạ của bất kì trạng thái phân cực nào bằng cách điều chỉnh góc phân cực của sóng tới. Với những kết quả đạt được cho thấy cấu trúc zig-zag có khả năng điều chỉnh linh hoạt cấu trúc mà không cần tác động điện từ, tuy nhiên cấu trúc này hạn chế trong các hệ thống có tốc độ cao.



Hình 1.27. Hiệu suất (a) hấp thụ và (b) chuyển đổi phân cực của cấu trúc zig-zag [101]

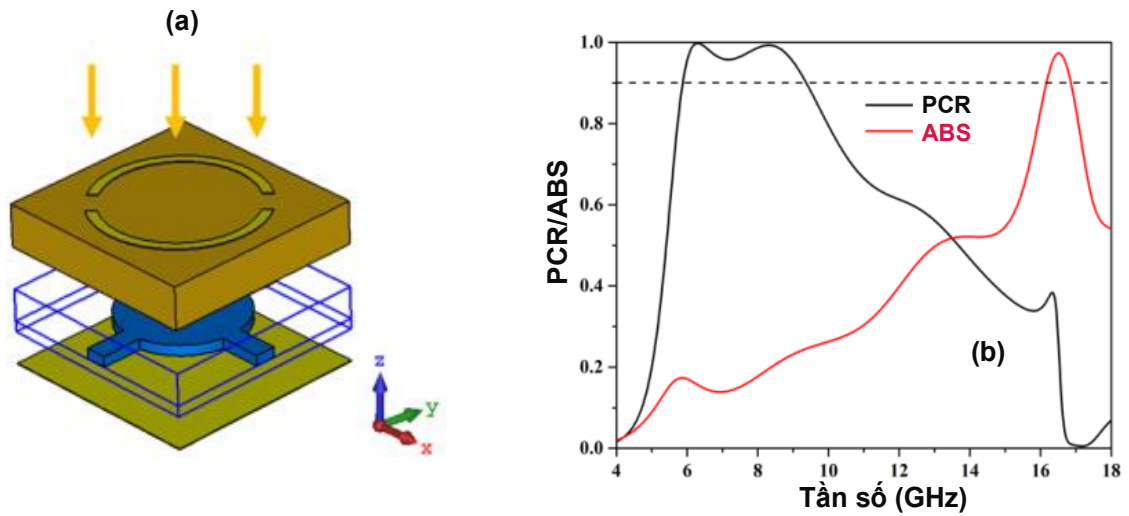
Mặc dù cấu trúc cho thấy hiệu suất hoạt động cao ở cả hai chế độ, tuy nhiên, cấu trúc này yêu cầu cần độ chính xác trong quá trình gập, hơn nữa băng thông hoạt động ở chế độ hấp thụ còn hẹp.

1.3.1.3. Phương pháp tích hợp vật liệu nước

Với nguồn tài nguyên phong phú, thân thiện với môi trường, nước sở hữu nhiều đặc điểm vượt trội như hằng số điện môi cao [102], độ phân tán tần số lớn [103] và tính trong suốt trong quang học [104]. Những đặc tính này giúp nước có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong nghiên cứu về hấp thụ băng rộng [105, 106]. Tuy nhiên, xét về mặt chức năng, các phương pháp thiết kế sử dụng nước chủ yếu tập trung vào việc phát triển các cấu trúc có chức năng duy nhất là hấp thụ băng rộng.

Gần đây, nước còn được ứng dụng trong các cấu trúc MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ. Một cấu trúc MFM do Li và nhóm nghiên cứu đề xuất bao gồm hai vòng cung kim loại đối xứng ở lớp trên cùng, một lớp điện môi FR-4, một bình chứa nước, và lớp kim loại dưới cùng như minh họa trong Hình 1.28 [18]. Khi không tích hợp nước, cấu trúc này có thể thực hiện chuyển đổi phân cực chéo với hiệu suất đạt trên 90% trong các dải tần 5,9 - 10,0 GHz và 14,3 - 16,4 GHz. Ngược lại, khi được tích hợp nước, cấu trúc này hoạt động như một bộ hấp thụ sóng điện từ

gần tuyệt đối trong dải tần 16,1 - 16,9 GHz.



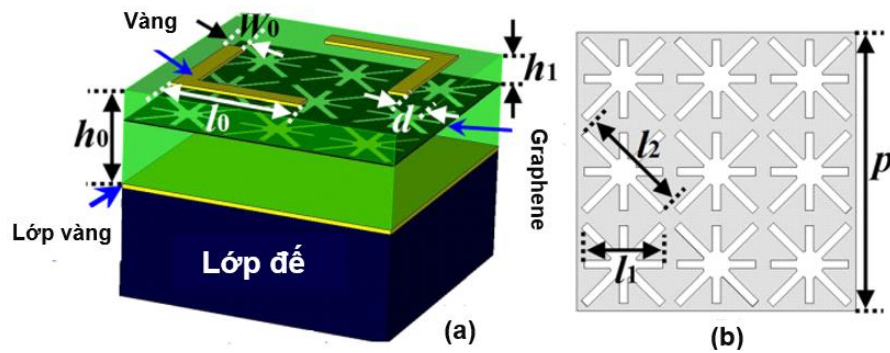
Hình 1.28. (a) Cấu trúc ô đơn vị và (b) hiệu suất chuyển đổi phân cực và độ hấp thụ của MFM đề xuất [18]

1.3.1.4. Phương pháp tích hợp vật liệu có khả năng thay đổi trạng thái

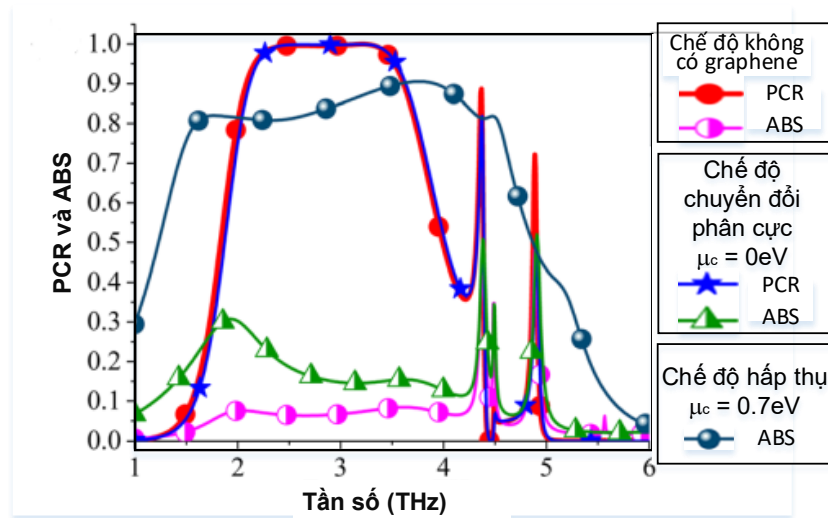
Các phương pháp thay đổi hình dạng cơ học, tích hợp các phần tử đã giải quyết được một số hạn chế của MMs như giới hạn dải tần làm việc và độ phức tạp của quá trình chế tạo. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu này đã thiết kế thành công MMs siêu bề mặt đa chức năng hoạt động trong dải tần vi ba. Gần đây hơn, việc kết hợp các siêu bề mặt với các vật liệu có khả năng thay đổi trạng thái, chẳng hạn như Chalcogenide GeSbTe, Vanadium dioxide (VO_2) và Graphene đã được đề xuất để tạo MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ. Trong số các vật liệu này, Graphene thu hút được nhiều sự quan tâm nghiên cứu của các nhà khoa học trong việc thiết kế các thiết bị nhờ các đặc tính của nó về khả năng điều chỉnh độ dẫn điện cho phép kiểm soát linh hoạt hoạt động của thiết bị, tính ổn định hóa học giúp tăng tuổi thọ và hiệu suất của vật liệu và độ bền cơ học cao phù hợp với các ứng dụng cần độ tin cậy và khả năng chịu lực. Những đặc tính ưu việt của Graphene đã mở ra tiềm năng lớn trong việc thiết kế các thiết bị tiên tiến hoạt động hiệu quả và ổn định trong nhiều môi trường và dải tần số khác nhau [107-109].

Graphene là một vật liệu hai chiều (2D) gồm một lớp nguyên tử carbon đơn lớp được sắp xếp trong cấu trúc lục giác, với nhiều tính chất đặc biệt [110, 111]. Vật liệu này được coi là một nền tảng tuyệt vời cho MMs và cung cấp khả năng giam giữ sóng điện từ mạnh mẽ. Các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng bằng cách tạo lớp graphene trên đế Boron nitride, độ linh động của điện tử có thể đạt tới $300.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Điều này mang lại tiềm năng lớn trong việc kết hợp graphene với MMs, giúp cải thiện khả năng điều chỉnh tính chất điện từ của thiết bị. Năm 2010, N. Papasimakis và cộng sự là người đầu tiên kết hợp MMs với graphene để nghiên cứu phản ứng điện từ của

cộng hưởng plasmonic [112]. Họ đã chỉ ra rằng graphene đã thay đổi đáng kể các đặc tính truyền dẫn của cấu trúc được thiết kế. Trong dải tần số THz, graphene thể hiện hiệu ứng tương tác mạnh mẽ với sóng điện từ và cho phép sóng tới với tần số nhất định được hấp thụ hoặc phản xạ cộng hưởng trên graphene. Với những ưu điểm trên, trong những năm gần đây, MMs hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ dựa trên graphene đã được nghiên cứu rộng rãi [97, 113-117]. Tuy nhiên, dù đã đạt được hiệu suất cao, các thiết bị này chủ yếu chỉ cung cấp một chức năng đơn lẻ, chưa hỗ trợ tốt cho các hệ thống đòi hỏi tính di động, nhỏ gọn, và đa chức năng. Điều này cho thấy nhu cầu cải tiến để mở rộng khả năng ứng dụng của graphene trong MMs. Các thiết bị dựa trên MMs hiện nay, dù chủ yếu mang tính đơn chức năng, đã tạo cơ sở vững chắc để đề xuất các cấu trúc đa chức năng. L. Peng và nhóm nghiên cứu đã đề xuất một cấu trúc MMs có khả năng chuyển đổi hoạt động linh hoạt giữa chế độ hấp thụ và chế độ chuyển đổi phân cực [5]. Vật liệu đa chức năng đề xuất có cấu trúc đơn giản gồm một siêu bề mặt chuyển đổi phân cực được chế tạo từ vật liệu vàng và một siêu bề mặt hấp thụ dựa trên graphene được thể hiện như trên Hình 1.29.



Hình 1.29. Cấu trúc MMs đa chức năng (a) cấu trúc ô đơn vị, (b) lớp graphene trong một ô đơn vị [5]



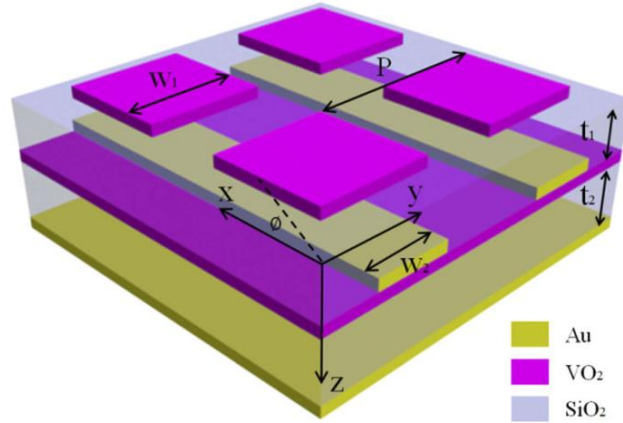
Hình 1.30. Kết quả mô phỏng cấu trúc đề xuất ở chế độ hấp thụ và chế độ chuyển đổi phân cực [5]

Hoạt động của cấu trúc đề xuất được điều chỉnh thông qua việc thiết lập thế hóa học của graphene $\mu_c = 0$ eV, chất hấp thụ graphene bị trung hòa và không tham gia vào quá trình hấp thụ. Lúc này cấu trúc hoạt động như một bộ chuyển đổi phân cực đạt hiệu suất chuyển đổi phân cực lớn hơn 90% trong dải tần 2,11 - 3,63 THz. Ngược lại, khi $\mu_c = 0,7$ eV, cấu trúc hoạt động như một bộ hấp thụ sóng điện từ tới với hiệu suất lớn hơn 80% trong dải tần 1,59 - 4,54 THz như thể hiện trên Hình 1.30.

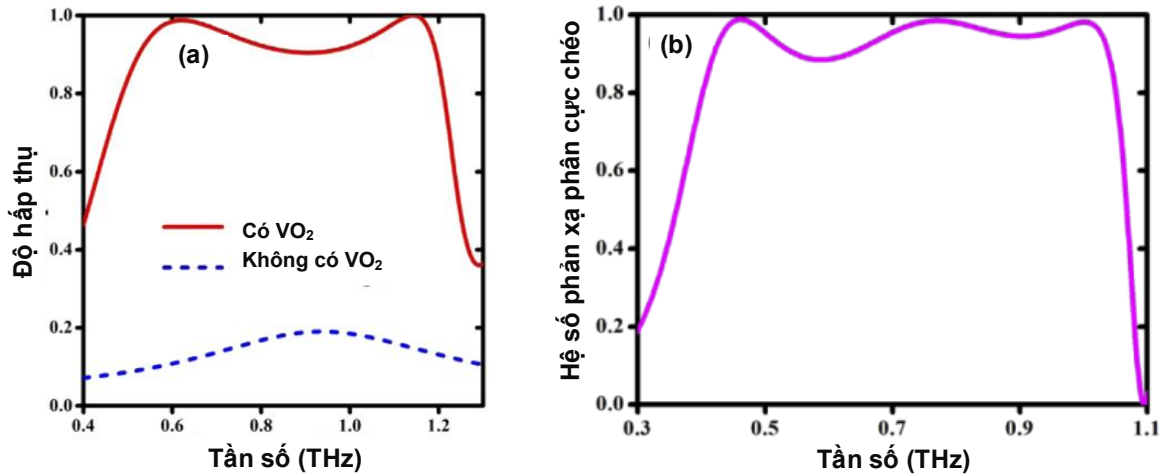
Tuy nhiên, so với các vật liệu có khả năng thay đổi trạng thái khác, phương pháp dựa trên vật liệu graphene vẫn còn tồn tại những hạn chế như chi phí sản xuất cao và độ phức tạp trong quá trình chế tạo. Vì vậy, việc nghiên cứu đề xuất vật liệu khác là cần thiết để giảm chi phí, đơn giản hóa quy trình chế tạo, đồng thời duy trì hoặc cải thiện hiệu suất của các thiết bị.

Các nghiên cứu đến nay cho thấy, trong các vật liệu có khả năng thay đổi trạng thái, VO₂ thể hiện tiềm năng đáng kể nhờ khả năng thay đổi tính chất điện từ một cách linh hoạt, chi phí thấp hơn và quy trình sản xuất tương đối dễ dàng. Những vật liệu này có thể là giải pháp thay thế hiệu quả cho graphene trong việc thiết kế các cấu trúc MMs đa chức năng, mở ra cơ hội cho các ứng dụng rộng rãi hơn trong tương lai. VO₂ đặc biệt hấp dẫn do khả năng chuyển pha từ điện môi sang kim loại ở nhiệt độ thấp (khoảng 68°C), đây là điểm rất phù hợp cho các thiết bị tiêu thụ điện năng thấp. Quá trình chuyển pha của VO₂ chủ yếu xuất phát từ sự chuyển đổi pha điện môi (ở nhiệt độ thấp) sang pha kim loại (ở nhiệt độ cao). Trong quá trình chuyển pha, độ điện thẩm của VO₂ thay đổi đáng kể. Ngoài ra, khi được kích thích bởi nhiệt độ, điện trường ngoài hoặc kích thích bằng quang học [118-120], VO₂ thể hiện sự chuyển pha nhanh chóng (thời gian chuyển pha khoảng 100fs). Sự chuyển pha này đi kèm với sự thay đổi đột ngột về độ dẫn và độ truyền qua của vật liệu. Những đặc tính độc đáo này đã mở ra nhiều ứng dụng quan trọng của VO₂ trong việc sử dụng để lưu trữ thông tin trong điện trở nhớ và bộ điều biến [121, 122]. Gần đây, VO₂ đã nhận được sự quan tâm lớn trong việc nghiên cứu và chế tạo MFM [95, 98, 123].

Cấu trúc MFM có khả năng chuyển đổi hoạt động ở chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ dựa trên vật liệu VO₂ đã được Z. Y. Song và cộng sự đề xuất [7]. Cấu trúc ô đơn vị được thiết kế bao gồm 6 lớp được thể hiện như trên Hình 1.31. Vật liệu VO₂ được sử dụng có độ dẫn điện là 2×10^5 S/m khi VO₂ ở pha kim loại và có độ dẫn điện là 2×10^2 S/m khi VO₂ ở pha điện môi.



Hình 1.31. Cấu trúc ô đơn vị của MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực do Z. Y. Song và cộng sự đề xuất [7]

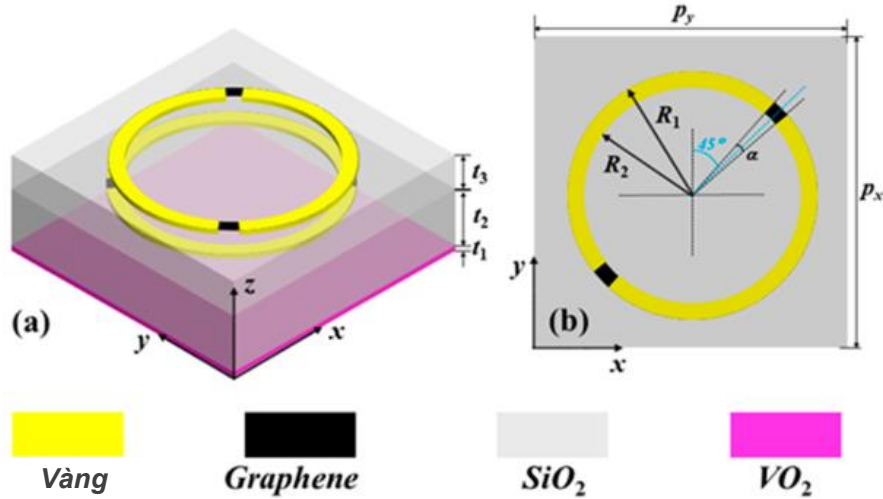


Hình 1.32. (a) Độ hấp thụ và (b) hệ số chuyển đổi vuông góc tương ứng với VO₂ ở pha kim loại và pha điện môi [7]

Cấu trúc đề xuất có thể chuyển đổi chức năng hấp thụ băng thông rộng sang chức năng chuyển đổi phân cực tuyến tính trong cùng một dải băng tần. Khi VO₂ ở pha kim loại (tương ứng với độ dẫn điện là 2×10^5 S/m), độ hấp thụ đạt được lớn hơn 90% trong dải tần từ 0,52 THz - 1,2 THz. Khi VO₂ ở pha điện môi (tương ứng với độ dẫn điện là 2×10^2 S/m), cấu trúc đề xuất thực hiện chuyển đổi phân cực tuyến tính băng rộng với hệ số phản xạ vuông góc lớn hơn 90% trong dải tần từ 0,42 THz - 1,04 THz như thể hiện trên Hình 1.32. MFM có thể chuyển đổi chức năng dựa trên VO₂ này là tiềm năng cho các ứng dụng tiên tiến như hệ thống thông tin 6G, công nghệ tàng hình,...

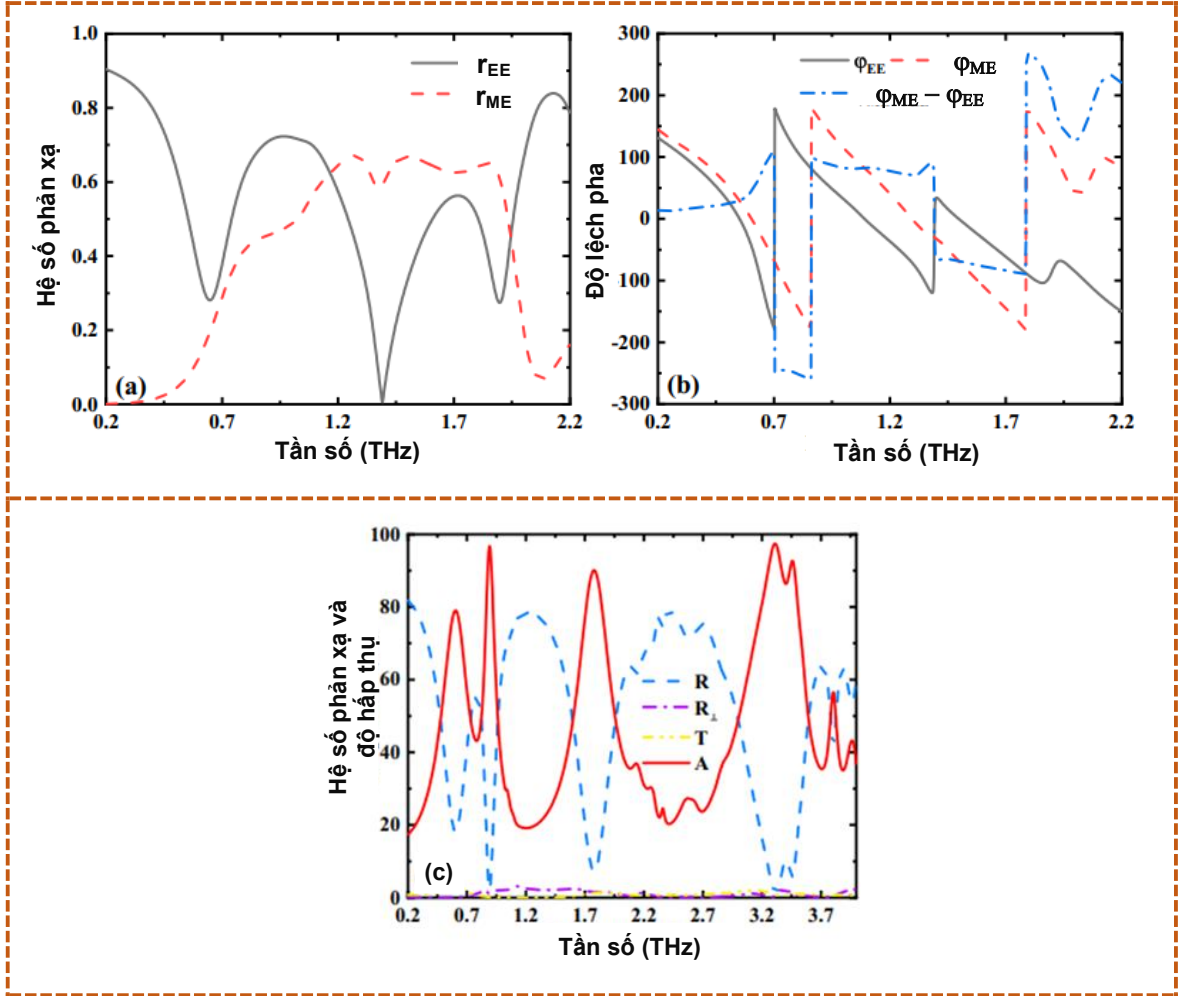
Một cấu trúc MFM kết hợp chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực tuyến tính sang phân cực tròn khác được Cao và nhóm nghiên cứu đề xuất cho ứng dụng trong các hệ thống liên lạc và giám sát radar [15]. Cấu trúc đề xuất được thể hiện trên Hình 1.33 gồm 5 lớp sắp xếp từ trên xuống dưới như sau: bộ cộng hưởng vòng có

rãnh bằng kim loại, bộ đệm SiO_2 , bộ cộng hưởng vòng có rãnh kim loại, bộ đệm SiO_2 và lớp VO_2 . Bộ cộng hưởng vòng có rãnh được làm bằng kim loại vàng có độ dày $0,2 \mu\text{m}$, độ dẫn điện là $4,561 \times 10^7 \text{ S/m}$. Các khe hở của hai vòng chia kim loại được bố trí theo chiều dọc và các khoảng trống được lấp đầy bằng vật liệu graphene có độ dày 1 nm . Lớp điện môi là vật liệu SiO_2 có hằng số điện môi $= 3,75$ và độ tổn hao là $0,0004$. Độ dẫn điện của VO_2 và graphene có thể thay đổi thông qua điều chỉnh điện áp và nhiệt độ.



Hình 1.33. (a) Hình ảnh 3D ô đơn vị của cấu trúc MMs đa chức năng và (b) hình ảnh mặt trên của ô đơn vị [15]

Các đặc trưng điện từ tương ứng với chức năng hấp thụ và chức năng chuyển đổi phân cực được khảo sát thông qua phương pháp mô phỏng. Bằng cách kết hợp sự chuyển pha kim loại - điện môi của VO_2 và sự biến đổi thể năng hóa học của graphene, các chức năng khác nhau bao gồm hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ được tích hợp vào một cấu trúc duy nhất. Khi VO_2 ở trạng thái kim loại, tùy vào thể năng hóa học của graphene, cấu trúc đề xuất thể hiện đặc tính chuyển đổi phân cực tuyến tính sang phân cực tròn (tương ứng với $m_c = 0,05 \text{ eV}$) trong các dải tần $0,64 - 1,28 \text{ THz}$ và $1,54 - 1,85 \text{ THz}$, các hệ số phản xạ có giá trị gần như nhau và độ lệch pha tương ứng là khoảng 90° (hoặc -270°) và -90° . Như vậy sóng được phân cực tròn phải và phân cực tròn trái trong vùng tần số tương ứng như thể hiện trên Hình 1.34(a)(b). Khi thể năng hóa học của graphene là $1,2 \text{ eV}$, cấu trúc đề xuất thể hiện chức năng hấp thụ sóng điện từ tần số THz. Sóng THz tới phân cực TE thể hiện ba đỉnh hấp thụ ở $0,89 \text{ THz}$, $1,78 \text{ THz}$ và $3,31 \text{ THz}$ tương ứng với độ hấp thụ lần lượt là $96,77\%$, $90,14\%$ và $97,44\%$ như được thể hiện trên Hình 1.34(c). Khi VO_2 ở trạng thái cách điện, cấu trúc đề xuất thực hiện chức năng như một bộ lọc đối với sóng THz tới phân cực TE và phân cực TM với góc phân cực là 45° .



Hình 1.34. (a)(b) Biên độ hệ số phản xạ và độ lệch pha cho sóng tới phân cực TE và (c) Phổ phản xạ, phổ truyền qua và phổ hấp thụ của cấu trúc đề xuất [15]

1.3.2. Ứng dụng của vật liệu biến hoá đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ.

Bộ hấp thụ và bộ chuyển đổi phân cực sóng điện từ là những thiết bị quan trọng cho công nghệ THz. Chúng có những ứng dụng quan trọng trong các thiết bị cảm biến, bộ tách sóng quang và bộ điều biến, và đặc biệt là không thể thiếu trong chẩn đoán hình ảnh y tế, môi trường theo dõi và giám sát, quang phổ hóa học, radar có độ phân giải cao và liên lạc tốc độ cao. Các chất hấp thụ được sử dụng để hấp thụ và làm tiêu tan tác động của sóng điện từ, trong khi bộ chuyển đổi phân cực có khả năng điều chỉnh trạng thái phân cực của sóng chiếu sáng. Những thiết bị này được nghiên cứu rộng rãi trong thời gian gần đây cho đa dạng các lĩnh vực như quân sự, viễn thông, an ninh, cảm biến,... Việc kết hợp các đặc tính có thể điều chỉnh được và các chức năng khác nhau vào một cấu trúc MMs duy nhất hiện đang là một vấn đề nghiên cứu mới và có thể được sử dụng để giải quyết những thách thức lớn hiện nay.

Trong lĩnh vực quân sự và hàng không, việc giảm tiết diện phản xạ radar (RCS) là một yếu tố quan trọng để tăng cường khả năng tàng hình của các phương tiện và

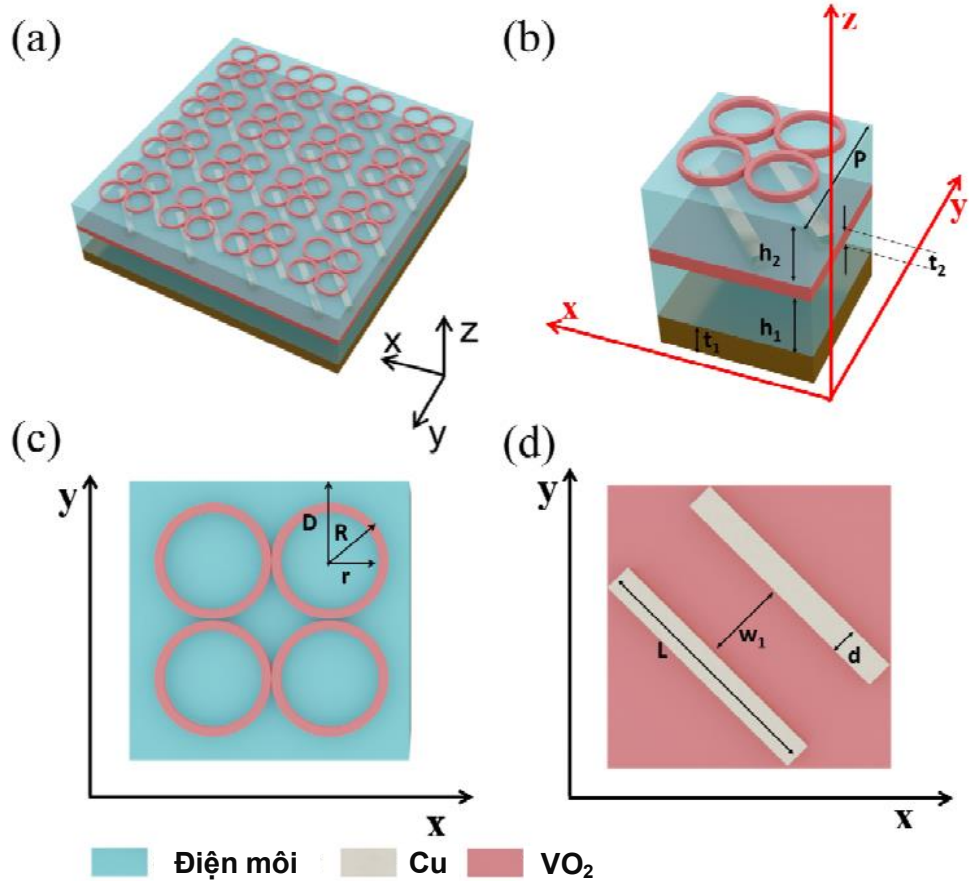
thiết bị. Một nghiên cứu đáng chú ý trong lĩnh vực này của Shuguang Fang và cộng sự, trong đó họ đã phát triển một siêu bề mặt linh hoạt đa chức năng có khả năng hấp thụ sóng điện từ và chuyển đổi phân cực, nhằm giảm RCS một cách hiệu quả [124].

Trong lĩnh vực viễn thông, việc tích hợp các chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực vào siêu bề mặt (metasurface) có thể tăng cường độ ổn định của tín hiệu, giảm nhiễu và cải thiện hiệu suất truyền dẫn. Cấu trúc đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực cho phép kiểm soát linh hoạt sóng điện từ, mở ra tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống viễn thông thông minh, nơi yêu cầu khả năng thích ứng nhanh với điều kiện thực tế [125]. Hay như trong lĩnh vực hình ảnh THz trong y tế, an ninh,..., một trong những thách thức lớn là nhiễu tín hiệu từ các phản xạ không mong muốn và tín hiệu nền mạnh. Việc sử dụng vật liệu đa chức năng có thể hoạt động ở chế độ hấp thụ, giúp giảm nhiễu, tăng độ nhạy cảm biến và cải thiện hiệu suất thiết bị, giúp hình ảnh thu được sắc nét hơn và có độ tương phản cao hơn. Bên cạnh đó, Hình ảnh terahertz có thể bị ảnh hưởng bởi sự phân cực của sóng khi truyền qua các vật liệu khác nhau. Vì vậy, sóng tới có thể được chuyển đổi phân cực giúp điều chỉnh góc phân cực tối ưu cho các ứng dụng hình ảnh cụ thể. Điều này đặc biệt hữu ích trong việc phân biệt các loại vật liệu có đặc tính phân cực khác nhau, chẳng hạn như vải, nhựa, hoặc mô sinh học [126].

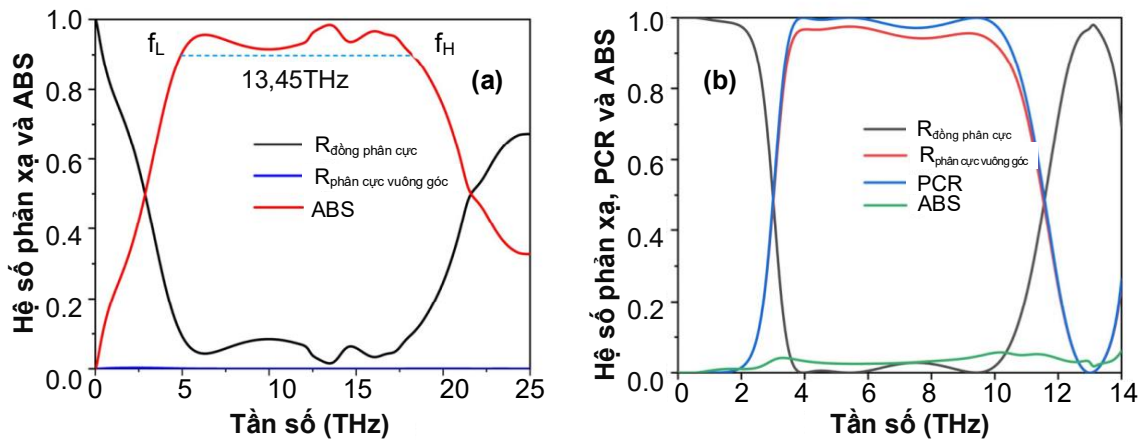
Một nghiên cứu gần đây của Wei Zou và nhóm nghiên cứu đã đề xuất một cấu trúc đa chức năng tích hợp vật liệu VO_2 , có khả năng chuyển đổi giữa chế độ hấp thụ và chế độ chuyển đổi phân cực được thể hiện như trên Hình 1.35. Cấu trúc đề xuất hoạt động hiệu quả trong băng thông rộng ở cả hai chế độ và có tiềm năng ứng dụng trong chuyển mạch quang, cảm biến nhiệt và nhiều ứng dụng khác [127].

Cấu trúc ô đơn vị của MFM đề xuất bao gồm 6 lớp vật liệu xếp chồng lên nhau: Lớp trên cùng gồm 04 vòng VO_2 tạo ra cộng hưởng điện từ giúp chuyển đổi giữa hai chức năng, lớp điện môi, lớp vật liệu đồng, lớp VO_2 liên tục, lớp điện môi và cuối cùng là lớp đồng liên tục.

Bằng cách khai thác khả năng chuyển pha của VO_2 , cấu trúc đề xuất có thể chuyển đổi linh hoạt giữa chế độ hấp thụ băng rộng và chế độ chuyển đổi phân cực. kết quả mô phỏng thể hiện trên Hình 1.36 cho thấy: ở chế độ hấp thụ (tương ứng với VO_2 ở trạng thái kim loại), thiết bị đạt khả năng hấp thụ siêu băng rộng từ 4.95 THz đến 18,39 THz, với độ hấp thụ trên 90%; ở chế độ chuyển đổi phân cực (tương ứng với VO_2 ở trạng thái cách điện), thiết bị hoạt động như một bộ chuyển đổi phân cực trong dải tần 3,51 THz – 10,26 THz, với hiệu suất chuyển đổi phân cực trên 90% trong phản xạ phân cực chéo.



Hình 1.35. (a) Cấu trúc sơ đồ của MFM đề xuất. (b) Mô hình 3D, (c) mặt trên của ô đơn vị và (d) lớp đồng ở giữa [127]



Hình 1.36. (a) Phổ mô phỏng hệ số phản xạ, hiệu suất hấp thụ và (b) phổ mô phỏng hệ số phản xạ, hiệu suất chuyển đổi phân cực và hiệu suất hấp thụ của MFM đề xuất [127]

1.4. Kết luận chương 1

Để hình thành cơ chế hấp thụ trong MMs, các cấu trúc MMs cơ bản gồm 3 lớp kim loại - điện môi - kim loại với lớp kim loại trên cùng có cấu trúc cộng hưởng giúp tạo trở kháng vào phù hợp với trở kháng của môi trường truyền. Lớp kim loại dưới

cùng giúp triệt tiêu sóng điện từ, ngăn sóng điện từ truyền ra ngoài vật liệu, sóng điện từ chủ yếu bị hấp thụ bên trong lớp điện môi ở giữa. Bên cạnh đó, để hình thành cơ chế chuyển đổi phân cực sóng điện từ, tính đối xứng của cấu trúc ô cơ sở trong các MMs được lưu tâm trong thiết kế. Khi tính đối xứng của cấu trúc so với trường tới bị phá vỡ, vật liệu biến hóa có thể sinh ra đáp ứng điện từ ở các phương khác so với trường tới. Từ đó, trạng thái phân cực của sóng điện từ được chuyển đổi so với trạng thái phân cực của sóng điện từ tới.

Việc kết hợp hai chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực vào một cấu trúc vật liệu nhằm tạo ra các vật liệu đa chức năng hiện đang được nghiên cứu và có tiềm năng lớn cho các ứng dụng trong tương lai. Một số phương pháp được nghiên cứu gần đây như phương pháp tích hợp các phân tử, phương pháp thay đổi cấu trúc bề mặt cộng hưởng, phương pháp tích hợp vật liệu có độ tổn hao lớn, phương pháp sử dụng vật liệu thay đổi trạng thái như graphene hay VO_2 ,... đã chứng tỏ khả năng chuyển đổi hoạt động hiệu quả ở cả hai chế độ hấp thụ và chế độ chuyển đổi phân cực. Trong đó, phương pháp sử dụng vật liệu nước và phương pháp tích hợp vật liệu chuyển pha VO_2 thể hiện tính ưu việt nhờ nước là vật liệu có tổn hao lớn, thích hợp cho các ứng dụng hấp thụ băng rộng và VO_2 có đặc tính chuyển pha nhanh đồng thời khả năng điều khiển linh hoạt bằng nhiều phương pháp như bơm laze, điều khiển bằng nhiệt hoặc điện trường ngoài. Tuy nhiên các cấu trúc tích hợp nước và VO_2 cho đến nay vẫn còn hạn chế về băng thông hoạt động đồng thời ở cả hai chế độ và hoạt động kém ổn định với sự thay đổi của góc tới sóng điện từ.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu sinh tập trung nghiên cứu thiết kế MFM có khả năng chuyển đổi hoạt động ở hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ với cấu trúc tích hợp nước và cấu trúc tích hợp vật liệu chuyển pha VO_2 . Các thiết kế này hoạt động trong dải tần số GHz và THz đạt được hiệu suất hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực cao, băng thông rộng và hoạt động ổn định với góc tới và góc phân cực.

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để thực hiện mục tiêu đã đề ra, luận án được thực hiện dựa trên sự kết hợp các phương pháp bao gồm: phương pháp tính toán lí thuyết, phương pháp mô phỏng, phương pháp chế tạo và đo đạc thực nghiệm. Đây là các phương pháp có độ tin cậy cao và được sử dụng phổ biến trong nghiên cứu vật liệu biến hóa. Dựa trên mô hình cấu trúc của các MMs với đặc tính hấp thụ và chuyển đổi phân cực cơ bản đã được nghiên cứu, chúng tôi đề xuất cấu trúc hình học của MMs kết hợp với các vật liệu được lựa chọn nhằm tối ưu khả năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện trong dải tần GHz và THz, phù hợp với các ứng dụng thực tiễn. Tiếp theo, các đặc trưng điện từ của MMs (như các hệ số phản xạ, phân bố điện trường, từ trường, phân bố dòng điện,...) được mô phỏng và khảo sát thông qua phần mềm mô phỏng thương mại điện từ CST. Việc khảo sát các đặc trưng này giúp xác định ảnh hưởng của hình dạng, kích thước và loại vật liệu đối với hiệu suất hoạt động, đồng thời hiểu được cơ chế hoạt động của cấu trúc từ đó giúp tối ưu hóa thiết kế. Song song với phương pháp mô phỏng, luận án kết hợp phương pháp tính toán làm cơ sở phân tích cơ chế hoạt động của cấu trúc, xác định được tần số cộng hưởng của MMs và xác định các thông số ảnh hưởng đến tính chất của MMs. Cuối cùng, phương pháp chế tạo mẫu và đo đạc thực nghiệm được thực hiện. Do giới hạn của thiết bị đo đạc tại phòng thí nghiệm của Viện Khoa học Vật liệu có dải đo từ 0 – 20GHz, vì vậy, trong số các cấu trúc đề xuất, mẫu MPC và mẫu MFM hoạt động vùng tần số GHz được lựa chọn nghiên cứu bằng phương pháp chế tạo thực nghiệm. Trong đó, mẫu MPC được chế tạo bằng kĩ thuật quang khắc, mẫu MFM tích hợp nước được chế tạo bằng kĩ thuật quang khắc kết hợp công nghệ in 3D. Sau khi chế tạo, các đặc trưng của mẫu được đo đạc, khảo sát và so sánh với kết quả tính toán lí thuyết và mô phỏng. Việc so sánh các kết quả này giúp đánh giá độ chính xác của thiết kế và mô phỏng, từ đó rút ra những kết luận quan trọng về hiệu suất và khả năng ứng dụng các cấu trúc đề xuất vào trong thực tế.

2.1. Phương pháp tính toán lí thuyết

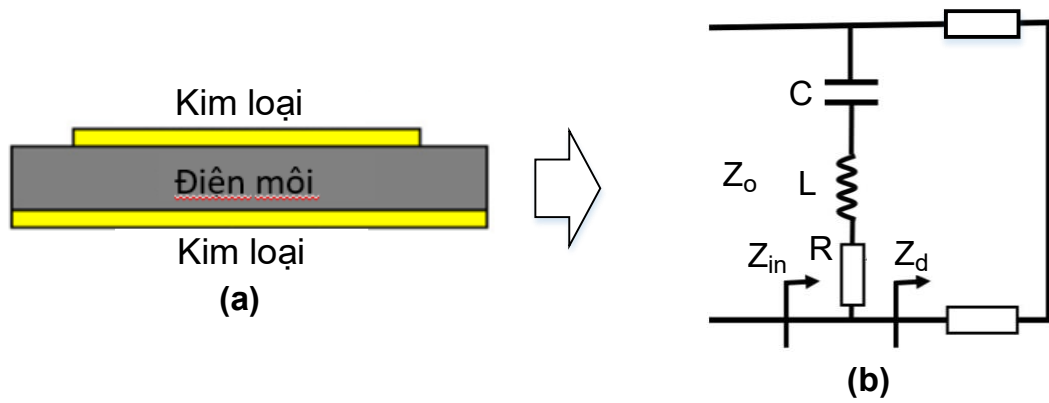
2.1.1. Mạch điện tương đương

Trong thiết kế MMs có đặc tính hấp thụ sóng điện từ, để tối ưu hoá các thông số cấu trúc ô đơn vị nhằm thỏa mãn điều kiện phối hợp trở kháng, một trong các phương pháp hiệu quả là sử dụng lí thuyết đường truyền để phân tích cấu trúc đề xuất và mô tả các đặc tính truyền dẫn của MMs bằng trở kháng của mạch. Trong sơ đồ mạch tương đương, MMs được mô tả thông qua mạch RLC nối tiếp và/hoặc song song và một đường truyền ngắn mạch thể hiện cho lớp điện môi và lớp kim loại phía dưới. Với các cấu trúc MMs sử dụng vật liệu kim loại như vàng, bạc, đồng, giá trị

điện trở của các kim loại này có thể bỏ qua. Trong khi đó, các giá trị điện cảm L , điện dung C lại phụ thuộc vào kích thước hình học của cấu trúc và tính chất điện từ của loại vật liệu cấu thành nên MMs. Lúc này, MMs hoạt động tương ứng với mạch điện gồm điện cảm L và tụ điện C và cộng hưởng tại tần số $\omega = 1/\sqrt{LC}$.

Từ đó, tần số cộng hưởng của MMs có thể xác định được từ phương pháp mạch LC tương đương.

Hình 2.1 là mô hình cấu trúc MMs gồm ba lớp kim loại – điện môi – kim loại và sơ đồ mạch điện LC tương đương của cấu trúc bao gồm: phần bên trái là đường truyền trong không gian có trở kháng là Z_o , phần giữa tượng trưng cho mạch RLC nối tiếp tương ứng với lớp đồng trên cùng. Trong đó R , L , C và Z_{in} tương ứng là điện trở, điện cảm, điện dung và trở kháng vào của MMs. Phần bên phải là đường truyền ngắn mạch cho lớp nền điện môi và lớp kim loại phía dưới với trở kháng tương đương là Z_d . [128].



Hình 2.1. (a) Mô hình của MMs ba lớp kim loại – điện môi – kim loại truyền thống
(b) Sơ đồ mạch điện tương đương [128]

Khi sóng tới tương tác với bề mặt vật liệu, độ hấp thụ của cấu trúc được biểu thị bằng biểu thức [128] :

$$A(\omega) = 1 - \left| \frac{Z_{in}(\omega) - Z_o}{Z_{in}(\omega) + Z_o} \right|^2, \quad (2.1)$$

trong đó:

$$Z_o = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} = 120\pi \approx 377\Omega, \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{Z_{in}(\omega)} = \frac{1}{R + j\omega L - \frac{j}{\omega C}} + \frac{1}{Z_d(\omega)}, \quad (2.3)$$

$$Z_d(\omega) = j \sqrt{\frac{\mu_o \mu_r}{\varepsilon_o \varepsilon_r}} \tan\left(\frac{k_o d}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}\right). \quad (2.4)$$

Trong các biểu thức trên, ε_o , μ_o , k_o là hằng số điện môi, độ từ thẩm và số sóng của không gian tự do, ε_r và μ_r lần lượt là độ điện thẩm và từ thẩm tương đối của chất nền điện môi FR-4. Từ phương trình (2.1), cấu trúc đặt hấp thụ hoàn hảo khi $Z_{in} = Z_o$. Phương trình (2.2) – (2.4) cho thấy Z_{in} được xác định bởi R, L, C, Z_d . Tần số cộng hưởng và trở kháng vào có thể được điều chỉnh bằng cách thay đổi cấu trúc bề mặt nhằm đạt phối hợp trở kháng giữa MA và môi trường truyền. Đồng thời, tổn hao lớn có thể đạt được bằng cách chọn vật liệu phù hợp với độ dày và hằng số điện môi của lớp điện môi.

2.1.2. Phương pháp tính toán trở kháng vào của cấu trúc

Về mặt cấu tạo, MMs được cấu thành từ các ô cơ ở sắp xếp trong không gian một cách tuần hoàn (hoặc không tuần hoàn). Do vậy, về bản chất, MMs không phải là vật liệu đồng nhất. Tuy nhiên, kích thước của các ô cơ sở này cũng như khoảng cách giữa chúng là rất nhỏ so với bước sóng hoạt động. Vì thế, sóng ánh sáng hầu như không thể phân giải được chi tiết hình ảnh của từng ô cơ sở. Theo lý thuyết môi trường hiệu dụng, MMs lúc này như một khối đồng nhất với hai thông số đặc trưng cho toàn khối là độ điện thẩm (ε) và độ từ thẩm (μ). Lúc này, việc thay đổi cấu trúc vật lý và thành phần vật liệu cấu thành nên các ô cơ sở đều làm thay đổi cơ bản tính chất điện từ của vật liệu. Vào năm 1970, Nicolson đề xuất biểu thức tính toán thông số trở kháng của vật liệu thông qua hàm phản xạ và truyền qua [129]. Tuy nhiên, hệ số phản xạ và truyền qua là các hàm của tần số và được biểu diễn dưới dạng phức và chứa thông tin pha do vậy khó khăn cho việc tính toán. Năm 2004, Chen và cộng sự đề xuất biểu thức tính hệ số phản xạ và truyền qua thông qua chiết suất n và trở kháng vào của vật liệu (Z) như sau [130]:

$$S_{11} = \frac{R_{01}(1 - e^{jnk_o d})}{1 - R_{01}^2 e^{jnk_o d}}, \quad (2.5)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - R_{01}^2) e^{jnk_o d}}{1 - R_{01}^2 e^{jnk_o d}}, \quad (2.6)$$

$$\text{trong đó:} \quad R_{01} = \frac{Z - 1}{Z + 1}. \quad (2.7)$$

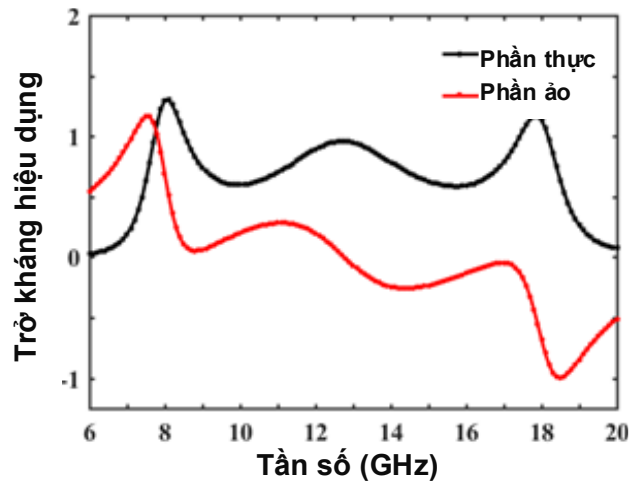
Bằng cách đảo ngược biểu thức (2.5) và (2.6), trở kháng Z có thể tính được theo biểu thức:

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (2.8)$$

Trên thực tế, một số phần mềm như HFFS, CST giúp tính toán các biểu thức Maxwell và cho ra kết quả là các hệ số phản xạ và truyền qua. Do vậy, luận án sử dụng kết quả các hệ số phản xạ S_{11} , S_{21} thu được từ mô phỏng làm đầu vào để tính toán cho trở kháng vào của vật liệu theo biểu thức (2.8).

Ví dụ về kết quả tính toán trở kháng hiệu dụng Z của cấu trúc MA đã đề xuất được trình bày trên Hình 2.2 [131].

Kết quả cho thấy, ở dải tần 8 GHz – 18 GHz, phần thực của Z có giá trị xấp xỉ bằng 1 và phần ảo của Z có giá trị xấp xỉ bằng 0. Điều này cho thấy trở kháng của bề mặt cộng hưởng MA phối hợp trở kháng tốt với trở kháng của môi trường truyền. Đặc biệt ở các tần số 8,6 GHz, 12,8 GHz và 17,3 GHz tương ứng với 03 đỉnh hấp thụ, Z lần lượt là $0,9553 + 0,0752j$, $0,9579 - 0,0102j$ và $0,9302 - 0,0853j$, độ phối hợp trở kháng với môi trường truyền là cao nhất.



Hình 2.2. Kết quả tính toán trở kháng hiệu dụng của MA được đề xuất

Những kết quả này chứng tỏ sóng điện từ chiếu đến bị hấp thụ chủ yếu bên trong vật liệu, điều này giải thích cho lí do cấu trúc MA đạt khả năng hấp thụ cao trong băng thông rộng.

2.1.3. Tính toán hiệu suất hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực

▪ Hiệu suất hấp thụ:

Hiệu suất hấp thụ của cấu trúc MMs có đặc tính hấp thụ được tính theo biểu thức (1.1) đã trình bày ở Chương 1. Cụ thể:

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

trong đó $R(\omega) = |S_{11}|^2$ và $T(\omega) = |S_{21}|^2$ tương ứng là hàm phản xạ và hàm truyền qua phụ thuộc tần số.

▪ *Hiệu suất chuyển đổi phân cực:*

Hiệu suất chuyển đổi phân cực của cấu trúc MMs có đặc tính hấp thụ được tính theo biểu thức (1.7) đã trình bày ở Chương 1. Cụ thể:

$$PCR = \frac{|R_{xy}|^2}{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2}.$$

trong đó $R_{xy} = E_{rx} / E_{iy}$ và $R_{yy} = E_{ry} / E_{iy}$ tương ứng là hệ số phản xạ vuông góc và hệ số phản xạ đồng phân cực của sóng phản xạ.

2.2. Phương pháp mô phỏng

Cho đến nay, phương pháp mô phỏng là một trong những công cụ mạnh mẽ và đa dạng, được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Trong lĩnh vực nghiên cứu MMs, mô phỏng cho phép xác định các đặc trưng của vật liệu như phổ phản xạ, phổ truyền qua, phân bố điện trường, từ trường, phân bố dòng điện trên miền tần số từ đó giúp cho việc thiết kế và tối ưu cấu trúc vật liệu đạt được các tính chất mong muốn.

Quá trình mô phỏng MMs là giải bài toán tương tác giữa sóng điện từ với cấu trúc của MMs có kích thước nhỏ hơn rất nhiều lần so với bước sóng hoạt động. Dưới tác dụng của sóng điện từ, các ô cơ sở của cấu trúc MMs hoạt động như một bộ cộng hưởng. Thông thường, hình dạng ô cơ sở của MMs và thông số hình học của ô cơ sở là khá phức tạp, vì vậy việc giải các phương trình Maxwell tổng quát với MMs là không dễ dàng để thực hiện. Thực tế, có một số kỹ thuật và phần mềm chẳng hạn như HFSS, Comsol Multiphysics, Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST),... giúp tính toán các phương trình Maxwell và đưa ra đặc tính của MMs như độ hấp thụ, hệ số phản xạ và truyền qua, phân bố dòng bề mặt và mật độ năng lượng. Trong số đó phần mềm CST Microwave Studio là một trong những phần mềm thương mại mô phỏng điện từ 3D, chuyên được sử dụng trong việc thiết kế và khảo sát tính chất điện từ của các loại vật liệu, linh kiện và thiết bị. CST dựa trên kỹ thuật tích phân hữu hạn (Finite integration technique - FIT) thể hiện được tương tác trường điện từ với cấu trúc của vật liệu. Nó cho phép mô hình hóa các hiện tượng điện từ và đánh giá thiết kế để đạt được độ hấp thụ tối ưu. Kỹ thuật FIT trình bày lại các phương trình Maxwell thành một biểu thức rời rạc ở dạng tích phân. Các phương trình ma trận thu được của các trường rời rạc có thể sử dụng để mô phỏng hiệu quả trên máy tính. Ngoài ra các tính chất đại số cơ bản của lý thuyết trường điện từ rời rạc cho phép

chứng minh tính chất bảo toàn bằng phương pháp phân tích từ đó đưa ra giải thích về tính ổn định của các biểu thức số trong miền thời gian. Các hiện tượng điện từ vĩ mô đã biết có thể được mô tả bằng nghiệm của bốn phương trình Maxwell [132]:

$$\oint_{(C)} \vec{E} d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}, \quad (2.9)$$

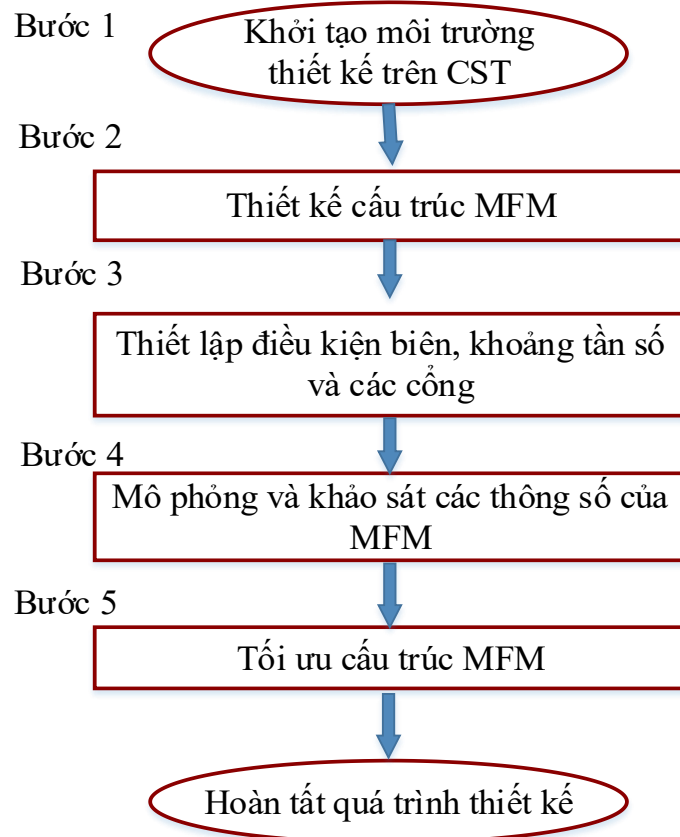
$$\oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \iiint_V \rho dV, \quad (2.10)$$

$$\oint_{(C)} \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) d\vec{S}, \quad (2.11)$$

$$\oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (2.12)$$

Để giải hệ phương trình Maxwell, trong CST có hai phương pháp chính là giải trên miền thời gian (Time Domain Solver) và giải trên miền tần số (Frequency Domain Solver). Phương pháp giải trên miền gian sử dụng kỹ thuật tích hợp hữu hạn (Finite integration technique - FIT) và kỹ thuật ma trận đường truyền (Transmission Line Matrix - TLM), phương pháp giải trên miền tần số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM). Cả hai phương pháp này đều bắt nguồn từ kỹ thuật FIT, vì vậy chúng đều cho kết quả như nhau. Phương pháp giải trên miền thời gian dùng để mô phỏng và phân tích các hiện tượng điện từ trong miền thời gian, phương pháp này hữu ích trong việc phân tích tương tác giữa sóng điện từ và cấu trúc (chủ yếu là các cấu trúc không tuần hoàn ví dụ như ăng ten), trong khi đó phương pháp giải miền tần số hữu ích để phân tích các cấu trúc điện từ trong miền tần số, chẳng hạn như tính toán các tham số S, trở kháng, các đặc tính phản xạ và truyền dẫn. Do đó, luận án sử dụng phương pháp giải trên miền tần số để nghiên cứu đặc trưng điện từ của MMs có kích thước nhỏ và có tính tuần hoàn. Kích thước lưới được thiết lập với mật độ tinh chỉnh lưới thích ứng, đảm bảo tối thiểu 15 ô lưới trên mỗi bước sóng ở tần số cao nhất. Tiêu chí hội tụ cho quá trình lặp được đặt ở mức -40dB. Nguồn kích thích là sóng phẳng truyền theo trục z, với vector điện trường phân cực theo trục y (cho chế độ TE).

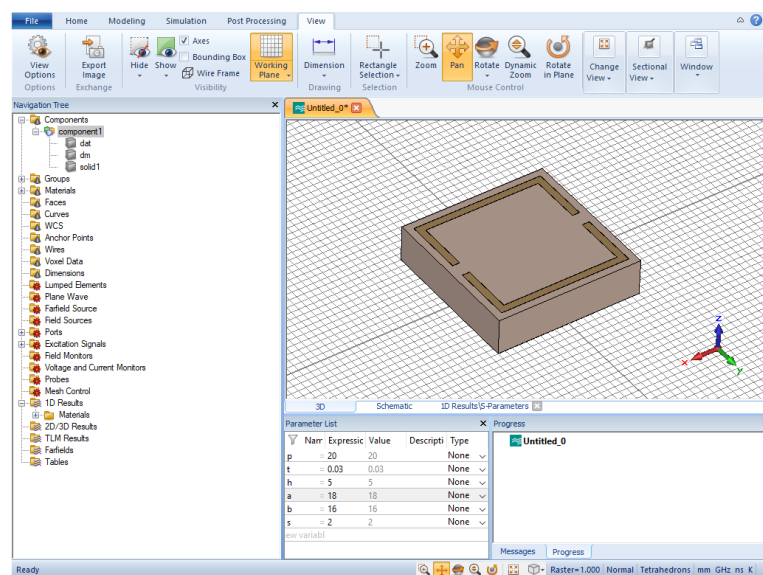
Các bước mô phỏng MMs, MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ dùng phần mềm CST sử dụng phương pháp giải trên miền tần số được mô tả trên Hình 2.3.



Hình 2.3. Các bước thực hiện thiết kế và nghiên cứu các đặc trưng điện từ của MMs, MFM dùng phương pháp mô phỏng trên phần mềm CST

Bước 1. Khởi tạo môi trường mô phỏng

Để thực hiện việc thiết kế cấu trúc và khảo sát đặc trưng điện từ của các MMs, MFM, luận án thực hiện phương pháp mô phỏng dùng phần mềm CST Microwave Studio. Thực hiện khởi động phần mềm CST và lựa chọn phương pháp giải trên miền tần số từ danh sách các phương pháp ta được giao diện mô phỏng như trên Hình 2.4.



Hình 2.4. Giao diện mô phỏng trên phần mềm CST

Bước 2. Thiết kế mô hình cấu trúc

Cấu trúc hình học một ô cơ sở của MMs, MFM đề xuất được thiết kế trên giao diện của phần mềm mô phỏng CST. Quá trình thiết kế bao gồm lựa chọn hình dạng, kích thước phù hợp với dải tần hoạt động và loại vật liệu cho từng lớp cấu trúc của ô cơ sở. Phần mềm mô phỏng CST cung cấp đa dạng các loại hình dạng để thiết kế vật liệu như: hình khối vuông, hình cầu, hình nón, hình trụ, hình vòng xuyên,... đồng thời thư viện trong CST có các loại vật liệu khác nhau với đầy đủ tính chất đặc trưng như độ dẫn điện, hằng số điện môi,... Ngoài ra, một số các linh kiện điện tử như diode, điện trở, tụ điện, điện cảm,... và các loại vật liệu đặc thù khác khi đưa vào cấu trúc chúng ta cần định nghĩa khi mô phỏng. Các vật liệu luận án sử dụng trong các cấu trúc đề xuất cơ bản như đồng, vàng, FR-4, polymer,... đều đã có sẵn trong thư viện của CST, ngoài ra hai loại vật liệu được tích hợp vào các cấu trúc MFM cần được khai báo thêm đó là nước có hằng số điện môi là 2,6, độ tổn hao là 0,03 và vật liệu chuyển pha VO₂. Một số phương pháp có thể dùng để định nghĩa thông số của vật liệu VO₂ như phương pháp Debye bậc 1, Debye bậc 2, phương pháp Drude, phương pháp Lorentz,... Trong đó phương pháp Drude được phát triển bởi Paul Drude vào năm 1900 để giải thích các tính chất điện của các vật liệu đặc biệt là kim loại và là công cụ hữu ích trong lĩnh vực khoa học vật liệu. Vì vậy, luận án sử dụng phương pháp Drude để xác định hằng số điện môi của vật liệu VO₂. Hằng số điện môi của VO₂ được xác định theo biểu thức [133]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2(\sigma)}{\omega^2 + i\gamma\omega}. \quad (2.13)$$

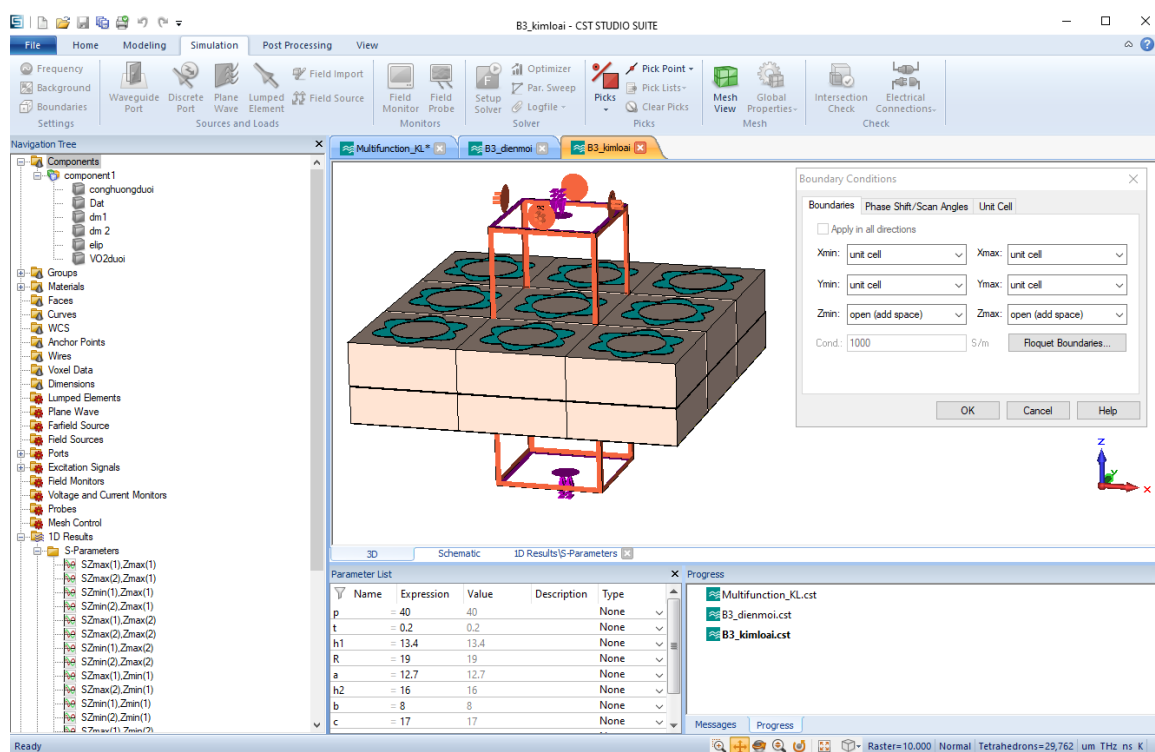
trong đó: ε_{∞} : hằng số điện môi tần số cao;

ω_p : tần số plasma ($\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0} \omega_p^2(\sigma_0)$);

$\gamma = 1/\tau$: hằng số tắt dần.

Bước 3. Thiết lập điều kiện biên, khoảng tần số và các cổng

Các đối tượng nghiên cứu trong luận án có cấu trúc là tuần hoàn. Do đó, sau khi thiết kế, ô cơ sở sẽ được thiết lập điều kiện biên như minh họa trong Hình 2.5 để tạo một dãy tuần hoàn các ô cơ sở giúp mô phỏng vật liệu một cách tương đồng với vật liệu thực tế. Khi đó khoảng cách giữa nguồn phát với đối tượng nghiên cứu được thiết lập sao cho đối tượng nằm ở trung tâm, giữa anten phát và anten thu.

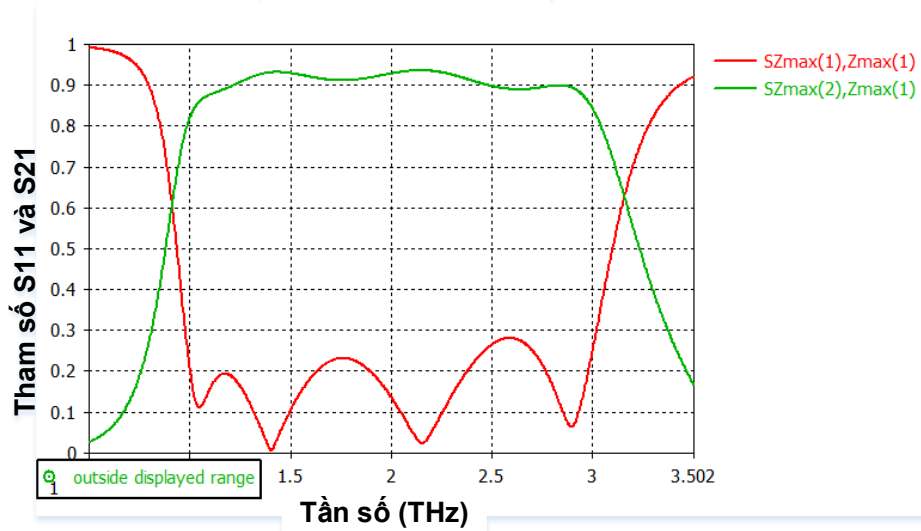


Hình 2.5. Thiết lập điều kiện biên cho ô cơ sở

Tiếp theo thiết lập tần số bắt đầu, tần số kết thúc của dải tần số cần khảo sát và thiết lập các điều kiện khác.

Bước 4. Mô phỏng và khảo sát các thông số của cấu trúc đề xuất

Sau khi thiết kế và thiết lập đầy đủ các thông số cũng như điều kiện hoạt động, MMs và MFM được đưa vào mô phỏng để khảo sát các đặc trưng điện từ, tính chất hấp thụ và chuyển đổi phân cực trong một dải tần nhất định. Trong quá trình mô phỏng, phần mềm CST sẽ tính toán các tham số điện từ trong dải tần số đã thiết lập. Khi mô phỏng hoàn tất, các kết quả, bao gồm các hệ số phản xạ S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22} ,... sẽ được hiển thị dưới dạng biểu đồ, thể hiện mối quan hệ giữa tần số với các giá trị biên độ, pha,... Ngoài ra, các kết quả có thể được xuất ra dưới dạng tệp ASCII với phần mở rộng mặc định là “.txt”. Tệp ASCII chứa dữ liệu kết quả từ quá trình mô phỏng, bao gồm các hệ số phản xạ, cho phép tính toán hiệu suất hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực của MMs, MFM theo các biểu thức (1.1) và (1.7). Đồng thời, các dữ liệu này có thể được nhập vào phần mềm Origin – một công cụ hỗ trợ vẽ đồ thị trong không gian 2D, 3D, cũng như vẽ nhiều đồ thị trên cùng một hình hoặc đồ thị có hai cột,... Hình 2.6 minh họa kết quả mô phỏng hệ số phản xạ S_{11} , S_{21} trên phần mềm CST, cùng với đồ thị hệ số phản xạ S_{11} , S_{21} và hiệu suất chuyển đổi phân cực được vẽ bằng phần mềm Origin.



Hình 2.6. Kết quả mô phỏng hệ số phản xạ S_{11} , S_{21} hiển thị trên phần mềm CST

▪ Khảo sát, lựa chọn vật liệu của các lớp cấu trúc

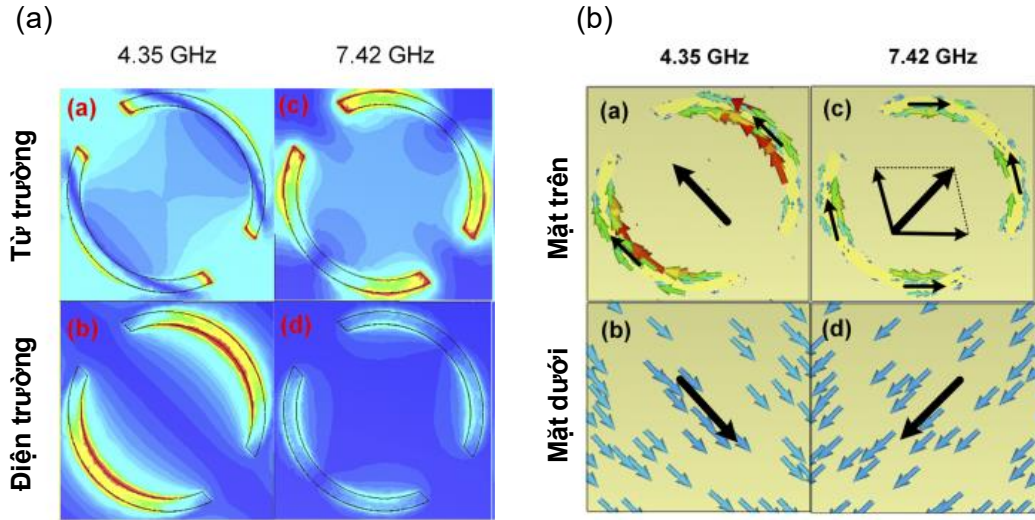
Ảnh hưởng của vật liệu sử dụng làm lớp đất, lớp cộng hưởng hay vật liệu làm lớp điện môi đến hiệu suất của các cấu trúc được khảo sát thông qua việc thay đổi loại vật liệu có trong thư viện của CST. Vật liệu kim loại được lựa chọn tối ưu cho cấu trúc đề xuất hoạt động vùng tần số GHz thường được lựa chọn là đồng (Cu) có độ dẫn điện là 58×10^6 S/m, lớp điện môi được lựa chọn là vật liệu FR-4 có hằng số điện môi là 4,3, độ suy hao là 0,025. Đối với cấu trúc đề xuất hoạt động vùng tần số THz, vật liệu kim loại được lựa chọn tối ưu cho cấu trúc là vàng có độ dẫn điện là 45×10^6 S/m và lớp điện môi được lựa chọn là polyimide có tính năng đàn hồi, độ bền cao và khả năng chịu nhiệt rất tốt với hằng số điện môi là 3,5, độ suy hao là 0,0027.

▪ Khảo sát ảnh hưởng của góc tới và góc phân cực tới hiệu suất của các cấu trúc đề xuất.

Sóng điện từ có thể tương tác với vật liệu từ nhiều góc tới khác nhau. Do đó, chúng tôi tiến hành khảo sát hiệu suất của MMs và MFM khi thay đổi góc tới nhằm đánh giá khả năng hoạt động ổn định của các cấu trúc đề xuất dưới các góc tới khác nhau của sóng điện từ.

▪ Khảo sát phân bố điện trường, từ trường và phân bố dòng điện

Tại các tần số cộng hưởng, luận án phân tích phân bố điện trường, từ trường và dòng điện trên bề mặt vật liệu, như minh họa trong Hình 2.7, nhằm làm rõ hơn cơ chế hấp thụ và cơ chế chuyển đổi phân cực sóng điện từ của MMs, MFM.



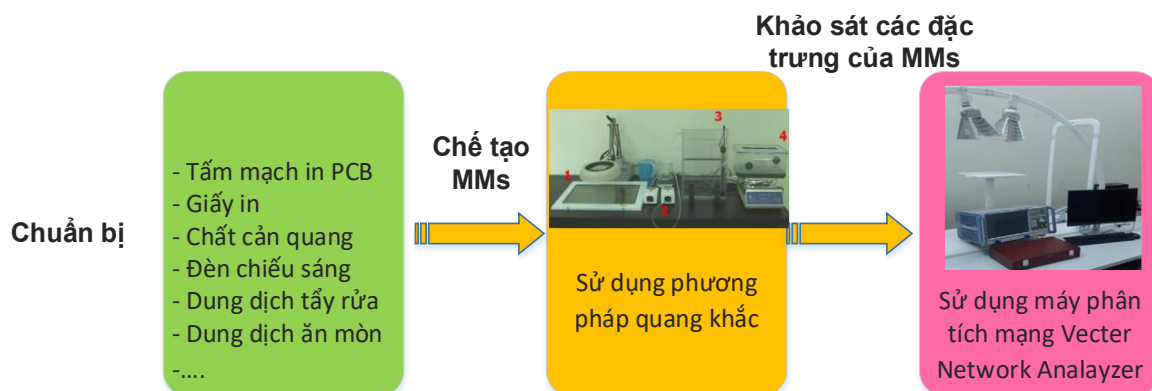
Hình 2.7. Kết quả mô phỏng bằng phần mềm CST: (a) Phân bố điện trường, từ trường và (b) Phân bố dòng điện bề mặt tại các tần số cộng hưởng

Bước 5. Tối ưu cấu trúc đề xuất

Dựa trên cấu trúc của MMs và MFM được lựa chọn nghiên cứu, các tham số hình học và vật liệu của ô cơ sở được xác định nhằm đảm bảo đáp ứng mục tiêu của luận án. Kích thước hình học của ô cơ sở được tối ưu bằng cách khảo sát độ hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực ứng với các giá trị khác nhau của một thông số cấu trúc nhất định (chẳng hạn như kích thước ô cơ sở P, bề dày lớp điện môi h,...) trong khi giữ cố định các thông số còn lại. Bên cạnh các tham số hình học, để thiết kế MFM hoạt động trong dải tần số GHz và THz, các kim loại có độ dẫn điện cao như vàng (Au), bạc (Ag), đồng (Cu), cùng các vật liệu điện môi như Silicon, FR-4, và Polyimide được lựa chọn nghiên cứu nhằm đạt được kết quả tối ưu.

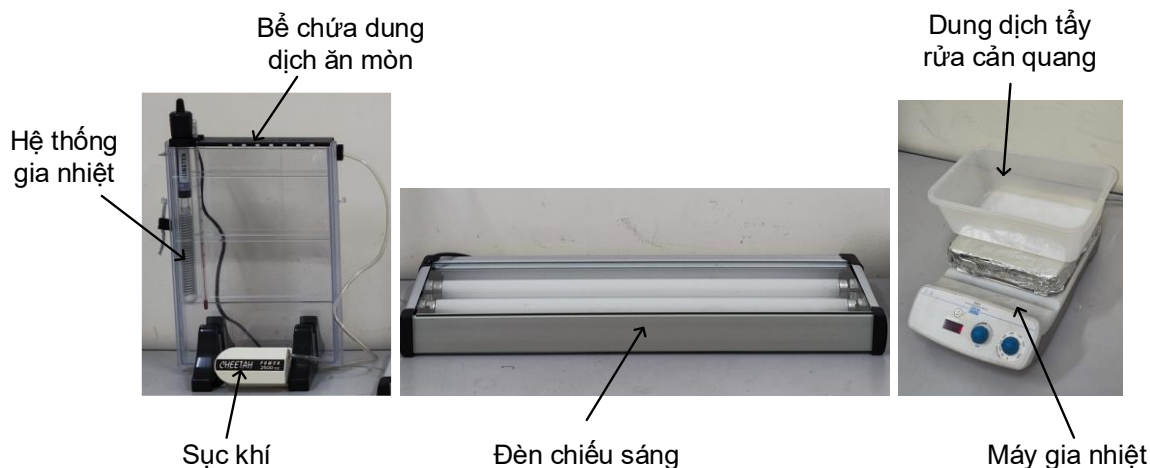
2.3. Phương pháp chế tạo và đo đạc thực nghiệm

Nhằm mục đích kiểm nghiệm và xác định độ chính xác của các giả thuyết và mô hình cấu trúc đã đề xuất trong nghiên cứu bằng phương pháp mô phỏng, luận án tiến hành chế tạo mẫu MMs có đặc trưng chuyển đổi phân cực sóng điện từ và mẫu MMs đa chức năng có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ. Các mẫu MMs này hoạt động trong vùng tần số GHz. Sau khi chế tạo, mẫu được đo đạc các đặc trưng hấp thụ và chuyển đổi phân cực, từ đó có căn cứ để xác định độ tin cậy của các kết quả tính toán và mô phỏng. Quá trình nghiên cứu MMs bằng phương pháp thực hiện chế tạo mẫu MMs và đo đạc thực nghiệm được thể hiện như trên Hình 2.8.



Hình 2.8. *Quá trình thực hiện chế tạo mẫu và đo đạc thực nghiệm*

Để nghiên cứu các tính chất của MMs, MFM cấu trúc kim loại - điện môi - kim loại hoạt động ở dải tần GHz (cấu trúc cộng hưởng có kích thước mm), luận án thực hiện chế tạo mẫu MMs có đặc tính chuyển đổi phân cực sử dụng phương pháp chế tạo quang khắc. Quang khắc là một phương pháp chế tạo vi mạch và vi cấu trúc bằng cách sử dụng ánh sáng để chuyển hình ảnh của một mẫu (còn gọi là mặt nạ - mask) lên bề mặt của vật liệu. Hình 2.9 là ảnh các thiết bị sử dụng để chế tạo mẫu MMs. Các thiết bị sử dụng trong chế tạo MMs hiện được trang bị tại phòng thí nghiệm của Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, bao gồm: đèn chiếu sáng, bộ phận ăn mòn kim loại, bộ phận tẩy rửa chất cản quang, máy gia nhiệt, súc khí,...



Hình 2.9. *Các thiết bị dùng chế tạo MMs tại phòng thí nghiệm của Viện Khoa học vật liệu*

Quá trình chuẩn bị mẫu thực nghiệm bao gồm: tấm mạch in PCB phủ đồng hai mặt dày 0,035 mm với điện môi ở giữa là FR-4 có độ dày 0,8 mm, chất cản quang, tấm mặt nạ được làm từ giấy có độ truyền qua cao, Đèn chiếu sáng với nguồn sáng UV, cường độ chiếu sáng 50 mJ/cm công suất 18 W, dung dịch tẩy rửa lớp cản quang, dung dịch hoá chất ferric chloride (FeCl_3) dùng để ăn mòn kim loại.

Các bước chế tạo MMs sử dụng phương pháp quang khắc được thực hiện tuần tự như sau:

Bước 1: Tạo mặt nạ

MMs sau khi được tối ưu cấu trúc thông qua quá trình mô phỏng trên phần mềm CST, file thiết kế để sử dụng cho quá trình chế tạo mẫu được truy xuất dưới định dạng file STL.

File STL được sử dụng để in hình cấu trúc cộng hưởng trên vật liệu giấy có độ truyền qua cao. Sản phẩm sau khi in được gọi là mặt nạ có cấu trúc giống cấu trúc bề mặt của MMs cần tạo.

Bước 2: Chiếu sáng

Đặt mặt nạ và ép sát mặt nạ lên bề mặt của tấm mạch in PCB đã được phủ chất cảm quang dương. Cảm quang là một lớp polymer hữu cơ có khả năng thay đổi tính chất khi tiếp xúc với tia UV và có thể bị rửa trôi trong các dung môi hữu cơ, các dung dịch tráng rửa. Đây là lớp bảo vệ quan trọng trong quá trình quang khắc, giúp tạo ra các cấu trúc vi mô trên bề mặt mạch in.

Dùng đèn chiếu sáng có công suất 18 W chiếu vào tấm PCB trong thời gian từ 10 phút rồi tắt đèn và gỡ lớp mặt nạ ra khỏi bề mặt vật liệu. Do phản ứng quang hoá, quá trình chiếu sáng đã làm thay đổi tính chất hoá học của phần lớp cảm quang không được mặt nạ che phủ. Do vậy chúng dễ dàng bị rửa trôi trong dung dịch tẩy rửa cảm quang.

Bước 3: Tẩy rửa lớp cảm quang

Gỡ bỏ lớp mặt nạ ra khỏi tấm PCB, sau đó ngâm hoàn toàn tấm PCB trong dung dịch tẩy rửa cảm quang (NaOH 1%) trong thời gian 2 phút, phần lớp cảm quang được ánh sáng chiếu vào sẽ bị hoà tan trong dung dịch, còn lại phần cảm quang chưa thay đổi tính chất hoá học nhờ được che chắn bởi lớp mặt nạ.

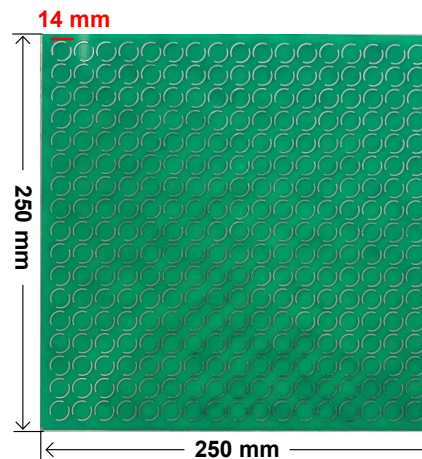
Bước 4: Ăn mòn kim loại:

Sau khi tẩy rửa lớp cảm quang, nhúng tấm PCB vào dung dịch ăn mòn kim loại FeCl_3 trong thời gian khoảng 5 phút ở nhiệt độ phòng (khoảng 25°C), phần kim loại không được che chắn bởi lớp cảm quang sẽ bị ăn mòn. Phần được che chắn là cấu trúc của MMs cần tạo sẽ được giữ lại.

Bước 5: Tẩy rửa lớp cảm quang còn lại

Để loại bỏ lớp cảm quang còn lại, tiến hành chiếu sáng vật liệu tương tự bước 2 mà không cần mặt nạ. Sau đó, nhúng vật liệu vào dung dịch tẩy rửa cảm quang tương tự bước 4. Cuối cùng thu nhận được MMs với cấu trúc cần tạo.

Hình 2.10 trình bày ảnh chụp MMs sau khi chế tạo theo quy trình chế tạo mạch in PCB.



Hình 2.10. Ảnh chụp MMs sau khi chế tạo có đặc tính chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số GHz

Ngoài mẫu MPC được chế tạo bằng công nghệ mạch in PCB, mẫu MFM tích hợp nước có khả năng chuyển đổi hoạt động ở chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực được chế tạo bằng cách kết hợp phương pháp quang khắc cho lớp cộng hưởng kim loại trên một chất nền FR-4 và phương pháp in 3D để chế tạo bình chứa nước tích hợp vào bên trong cấu trúc của MMs.

Phương pháp in 3D bao gồm các quá trình và công nghệ để sản xuất các chi tiết và sản phẩm từ các loại vật liệu khác nhau. In 3D cho phép thiết kế và chế tạo các cấu trúc phức tạp với hình dạng chính xác và chi tiết, điều mà phương pháp truyền thống không có được. Với in 3D, các cấu trúc có thể được tối ưu hóa để tối đa hóa hiệu quả hấp thụ sóng điện từ hoặc tính chất cơ học mà không làm ảnh hưởng đến tính linh hoạt của vật liệu. Để tối đa hiệu suất hấp thụ các vật liệu in 3D thường được sử dụng như là graphene, carbon nanotubes, Poly-lactic Acid (PLA),... Đặc biệt, việc sử dụng các vật liệu composite cho phép tích hợp các thành phần hấp thụ sóng và các chất lỏng (ví dụ như nước) vào trong cấu trúc in 3D.

Trong luận án, để chế tạo MFM tích hợp nước, vật liệu được lựa chọn làm khoang chứa nước là PLA. PLA là một loại polymer sinh học được làm từ các nguồn tái tạo như tinh bột ngô, sắn hoặc mía, có nhiệt độ nóng chảy thấp, thường từ 180° đến 220°. Ngoài ra PLA là vật liệu phân hủy sinh học, thân thiện với môi trường. Khoang chứa nước và các đường dẫn nước vào khoang được chế tạo bằng máy in Flashforge Creator 3, máy in có độ chính xác $\pm 0,2$ mm, với tốc độ in 10 – 150mm/s. Quá trình chế tạo khoang chứa nước và đường dẫn nước bằng phương pháp in 3D gồm các bước sau:

Bước 1. Thiết kế mô hình 3D

Trước tiên, mô hình 3D của khoang chứa nước và các đường dẫn nước sau khi

được thiết kế trên phần mềm mô phỏng CST, chúng được xuất tệp dưới định dạng file STL hoặc OBJ.

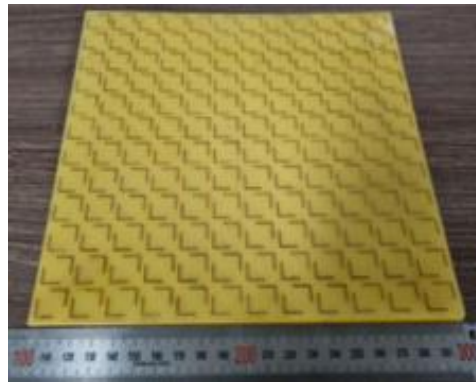
Bước 2. In khoang chứa nước

Sử dụng file STL hoặc OBJ nhập vào phần mềm cắt lớp (Flash Print 5) để thiết lập thông số như độ dày lớp, mật độ in và loại vật liệu. Sau đó, phần mềm sẽ chuyển đổi mô hình thành tệp G-code phù hợp với máy in. Tệp G-code được chuyển sang máy in qua USB, SD card, hoặc Wi-Fi. Tiếp theo, nạp vật liệu PLA vào máy in. Máy sẽ tiến hành in mẫu bằng cách tạo các lớp vật liệu từng bước từ dưới lên trên. Sau khi in xong, mẫu được gỡ ra khỏi bàn của máy in.

Bước 3. Bơm nước vào khoang

Sử dụng kim tiêm hoặc bơm áp suất thấp để đưa nước vào khoang chứa qua lỗ nạp. Sau đó các lỗ nạp được bịt kín để tránh rò rỉ nước ra ngoài. Bước này được thực hiện khi sử dụng MFM hoạt động ở chức năng hấp thụ sóng điện từ.

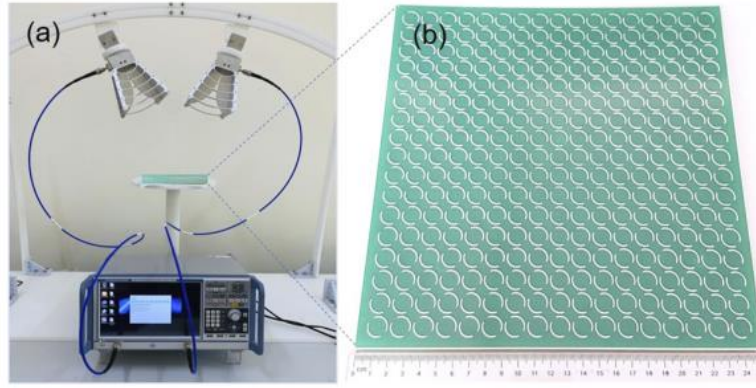
Cuối cùng, để hoàn thiện mẫu, các lớp còn lại của MFM được chế tạo bằng phương pháp quang khắc như đã trình bày ở trên. Mẫu MFM tích hợp nước được thực hiện tại phòng thí nghiệm của Trường Đại học quốc gia Jeonbuk, Hàn Quốc.



Hình 2.11. Hình ảnh mẫu MFM được chế tạo bằng phương pháp quang khắc và in 3D

Sau khi chế tạo, các mẫu MPC, MFM được tiến hành đo các thông số đặc trưng điện từ của mẫu bằng cách sử dụng máy phân tích mạng (Vector Network Analyzer - VNA) Rohde & Schwarz ZNB20 (R&S ZNB20). Thiết bị này hiện có tại Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Đây là máy phân tích mạng vectơ tầm trung, hai cổng, có thể thực nghiệm đo đặc trong dải tần từ 100 KHz đến 20 GHz. Máy phân tích VNA có dải động 140 dB, giúp có thể thực hiện các phép đo chính xác trên các thiết bị thử nghiệm băng thông rộng hoặc các thành phần hoạt động ở tần số thấp.

Hệ thống được bố trí thực nghiệm đo đặc nhờ sử dụng máy phân tích mạng VNA nhằm thu được hệ số phản xạ đồng phân cực S_{yy} và hệ số phản xạ phân cực vuông góc S_{xy} được thể hiện trên Hình 2.12.



Hình 2.12. Thiết lập phép đo cho mẫu MPC hoạt động ở băng tần S và C

Hai anten phát và anten thu được nối vào hai cổng của máy phân tích mạng đã được chuẩn hóa để đo tại dải tần số GHz. Thông qua các tham số S_{11} , S_{21} , ta dễ dàng xác định được hiệu suất hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực của các mẫu MMs sau khi được chế tạo. Các kết quả thực nghiệm này được đối chiếu với các kết quả mô phỏng để khẳng định các kết quả nghiên cứu bằng phương pháp tính toán và phương pháp mô phỏng. Trong tính toán và mô phỏng, các kết quả thu được là lý tưởng do đó khi so sánh với kết quả khảo sát bằng phương pháp thực nghiệm có thể có sự sai lệch giữa kết quả tính toán, mô phỏng và thực nghiệm. Ngoài ra sai số trong quá trình chế tạo hay đo đạc trong môi trường có nhiễu cũng có thể dẫn đến sai lệch kết quả giữa lý thuyết, mô phỏng và thực nghiệm.

2.4. Kết luận chương 2

Trong chương này, luận án đã trình bày các phương pháp nghiên cứu MMs, MFM, bao gồm: phương pháp tính toán, phương pháp mô phỏng bằng phần mềm CST, phương pháp chế tạo mẫu MMs bằng phương pháp quang khắc, phương pháp in 3D và đo đạc thực nghiệm. Mỗi phương pháp đều đóng vai trò quan trọng trong việc nghiên cứu và phát triển MMs có tính chất đặc biệt, từ việc mô hình hóa cấu trúc và tính chất của chúng đến việc kiểm tra và xác nhận thông qua phương pháp chế tạo và đo đạc thực nghiệm. Phương pháp tính toán lý thuyết giúp xác định tần số cộng hưởng, trở kháng và hiệu suất hoạt động của cấu trúc. Phương pháp mô phỏng số hỗ trợ cho các tính toán lý thuyết bằng cách mô phỏng chi tiết cấu trúc và tính chất của vật liệu trong các điều kiện khác nhau, từ đó định hướng cho quá trình thiết kế và tối ưu hóa MMs. Phương pháp chế tạo thực nghiệm cụ thể hóa các kết quả lý thuyết và mô phỏng vào sản phẩm thực tế, sử dụng các kỹ thuật và quy trình tiên tiến để đảm bảo độ chính xác và hiệu suất cao. Cuối cùng, phương pháp đo đạc sử dụng hệ thiết bị phân tích mạng VNA để khảo sát các đặc trưng của MMs. Kết quả nghiên cứu thu được từ các phương pháp được luận án so sánh để kiểm tra tính hiệu quả của mỗi phương pháp nghiên cứu, từ đó tăng độ tin cậy cho kết quả nghiên cứu.

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ CẤU TRÚC VÀ KHẢO SÁT ĐẶC TRƯNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CÓ ĐẶC TÍNH HẤP THỤ VÀ ĐẶC TÍNH CHUYỂN ĐỔI PHÂN CỰC SÓNG ĐIỆN TỪ

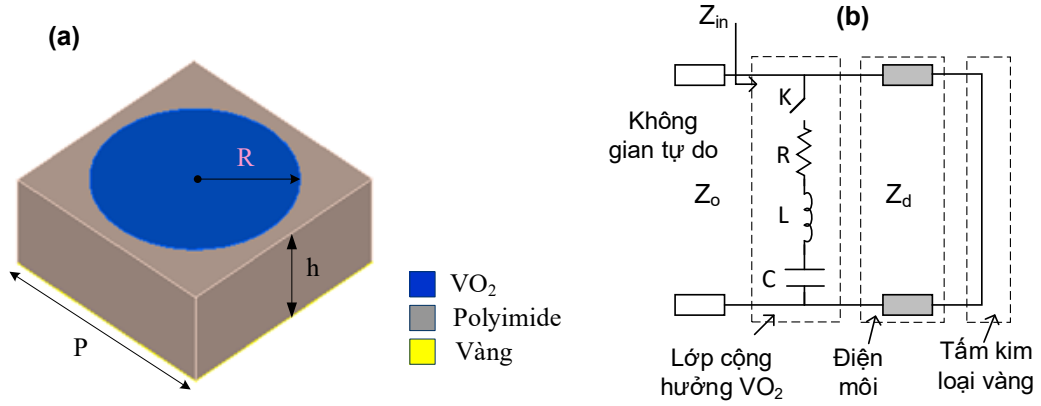
Chương 3 trình bày quá trình thiết kế cấu trúc và khảo sát đặc trưng điện từ của các vật liệu biến hóa có chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ. Các cấu trúc được đề xuất trong chương được nghiên cứu nhằm hoạt động hiệu quả trong các vùng tần số GHz (bao gồm các băng S, C, X, Ku) và vùng tần số THz. Việc lựa chọn các vùng tần số này xuất phát từ nhu cầu ứng dụng rộng rãi của chúng trong các lĩnh vực như thông tin vô tuyến, cảm biến, radar, và ảnh học THz, đồng thời tận dụng được ưu điểm về khả năng điều khiển sóng điện từ linh hoạt trong các dải tần này. Các cấu trúc MPC được thiết kế dựa trên nguyên lý cộng hưởng của vòng SRRs, cho hiệu suất chuyển đổi phân cực cao và cấu trúc gọn nhẹ. Bên cạnh đó, cấu trúc MA sử dụng vật liệu chuyển pha VO₂ được nghiên cứu nhằm khai thác đặc tính thay đổi độ dẫn theo nhiệt độ để đạt hiệu suất hấp thụ cao trong dải THz. Kết quả mô phỏng thu được từ các cấu trúc đề xuất là cơ sở quan trọng cho việc phát triển các vật liệu biến hóa đa chức năng được trình bày trong chương tiếp theo.

3.1. Thiết kế cấu trúc và khảo sát tính chất hấp thụ của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ hoạt động vùng tần số THz

3.1.1. Thiết kế cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ hoạt động vùng tần số THz

Các nghiên cứu về MA đến nay đã đạt được những cấu trúc có hiệu suất cao và băng thông rộng. Tuy nhiên, việc phát triển các cấu trúc hấp thụ có khả năng kiểm soát linh hoạt dải tần hoạt động, hệ số hấp thụ hoặc các đặc trưng điện từ vẫn đang là một hướng nghiên cứu mới và tiềm năng. Với mục tiêu của luận án là thiết kế cấu trúc vật liệu biến hóa đa chức năng tích hợp VO₂ có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ, một cấu trúc MA tích hợp VO₂ được đề xuất nghiên cứu. VO₂ là vật liệu có khả năng thay đổi pha từ điện môi sang dẫn điện khi chịu tác động của các yếu tố bên ngoài như nhiệt độ hoặc điện áp, làm thay đổi đáng kể hằng số điện và độ dẫn điện của nó. Thiết kế ô đơn vị của MA đề xuất gồm có ba lớp: lớp dưới cùng là một lớp kim loại vàng mỏng liên tục để ngăn sóng điện từ truyền qua cấu trúc, lớp điện môi ở giữa là polyimide có hằng số điện môi 3,5 và độ suy hao là 0,0027, lớp trên cùng có hình dạng đĩa tròn làm từ vật liệu VO₂ như thể hiện trên Hình 3.1(a). Cấu trúc này cho phép chủ động điều khiển đặc trưng điện từ nhờ khả năng chuyển pha của VO₂, từ trạng thái điện môi sang

trạng thái kim loại. Việc khảo sát đặc tính hấp thụ của cấu trúc được thực hiện thông qua việc thay đổi độ dẫn điện của lớp VO₂ trong mô phỏng, nhằm đánh giá sự đáp ứng điện từ của vật liệu và làm rõ vai trò của VO₂ trong cơ chế điều khiển chức năng. Đây là bước đầu quan trọng để phát triển vật liệu biến hóa có thể chuyển đổi chức năng một cách chủ động và thích ứng với môi trường.



Hình 3.1. (a) Cấu trúc MA sử dụng VO₂ dạng đĩa tròn và (b) sơ đồ mạch tương đương của cấu trúc

Các thông số thiết kế MA tích hợp vật liệu VO₂ được cho trên Bảng 3.1.

Bảng 3.1. Bảng kích thước các tham số của MA sử dụng VO₂

Tham số	P	h	t	R
Giá trị (μm)	38	17	0,2	16

VO₂ là một vật liệu đặc biệt với khả năng chuyển pha nhanh từ điện môi sang kim loại khi nhận được một kích thích bên ngoài vượt qua ngưỡng như làm nóng trên nhiệt độ tới hạn, đặt một điện áp hoặc dòng điện đủ lớn hoặc kích thích quang. VO₂ đặc biệt thu hút sự quan tâm nhờ khả năng chuyển pha thuận nghịch xảy ra ở nhiệt độ thấp. Cụ thể, VO₂ chuyển từ pha điện môi sang pha kim loại khi nhiệt độ đạt khoảng 68 °C, và ngược lại, chuyển từ pha kim loại trở về pha điện môi khi nhiệt độ giảm xuống dưới khoảng 62 °C [134]. Tính chất chuyển pha này của VO₂ đặc biệt rất hữu ích trong việc phát triển các thiết bị tiêu thụ ít năng lượng. Hằng số điện môi của VO₂ được tính toán dựa trên mô hình Drude: [135, 136]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2(\sigma)}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (3.1)$$

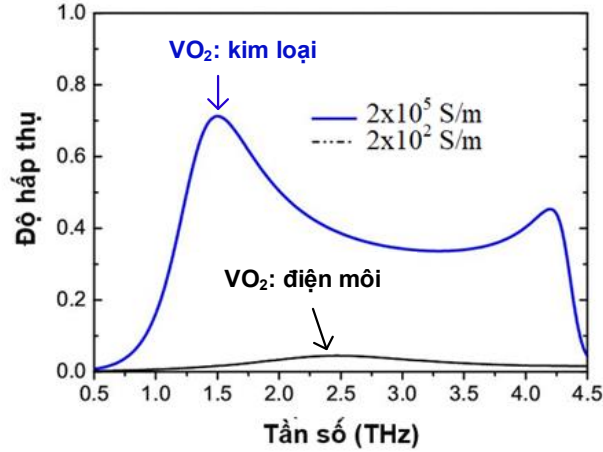
với $\varepsilon_{\infty} = 12, \gamma = 5,75 \times 10^{13} \text{ rad/s}$,

tần số plasma có thể tính bởi:

$$\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0} \omega_p^2(\sigma_0), \quad (3.2)$$

với $\sigma_0 = 3 \times 10^5$ và $\omega_p(\sigma_0) = 1,4 \times 10^{15}$ rad/s.

Cấu trúc MMs được mô phỏng với trường hợp VO_2 ở pha điện môi và VO_2 ở pha kim loại. Kết quả mô phỏng phổ hấp thụ của MA khi VO_2 ở pha kim loại và khi VO_2 ở pha điện môi được thể hiện trên Hình 3.2, cho thấy rằng thiết kế đề xuất hoạt động như một vật liệu phản xạ khi VO_2 ở pha điện môi.



Hình 3.2. Phổ hấp thụ mô phỏng của MA sử dụng VO_2 dạng đĩa tròn ở pha kim loại và pha điện môi

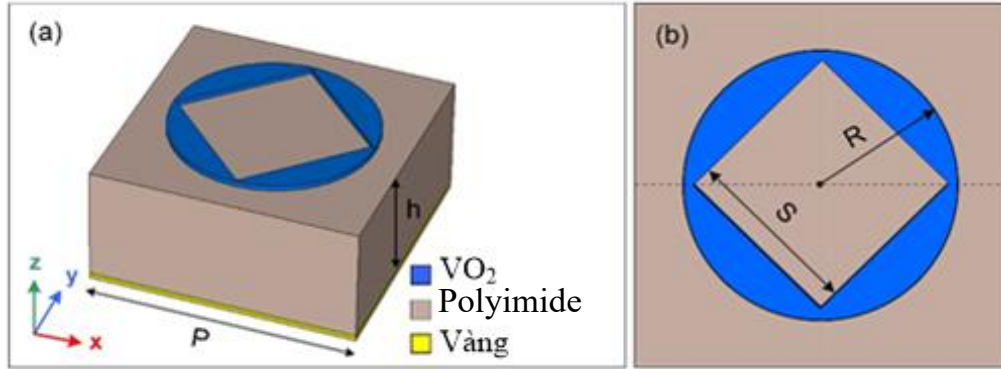
Khi tăng độ dẫn điện của VO_2 , VO_2 chuyển sang pha kim loại, độ hấp thụ của cấu trúc tăng lên đáng kể. Đặc biệt, hai đỉnh hấp thụ xuất hiện, với độ hấp thụ đạt khoảng 70% tại tần số 1,5 THz và 45% tại tần số 4,2 THz khi VO_2 ở trạng thái pha kim loại.

Kết quả khảo sát thu được đối với cấu trúc đề xuất đã cho thấy rằng cấu trúc MA sử dụng VO_2 có thể điều chỉnh hiệu suất hấp thụ nhờ sự chuyển pha của VO_2 , cho phép thiết kế hoạt động linh hoạt và đa chức năng trong dải tần THz. Tuy nhiên, hiệu suất hấp thụ của MA đề xuất chưa cao, chứng tỏ thiết kế chưa đảm bảo tính phối hợp trở kháng giữa trở kháng vào của cấu trúc với trở kháng của môi trường truyền dẫn.

Từ sơ đồ mạch tương đương của MA như thể hiện trên Hình 3.1(b), bao gồm một đường truyền không gian trống có trở kháng là Z_0 , mạch RLC cho lớp cộng hưởng VO_2 kim loại được kết nối với cổng tắc K, một đường truyền cho chất nền polymer và đường truyền ngắn mạch cho lớp kim loại vàng. Tần số cộng hưởng của ô cơ sở được tính theo biểu thức $f_o = 1/2\pi\sqrt{LC}$.

Trở kháng vào của MA là một hàm của các giá trị R, L, C theo biểu thức (2.2) - (2.4) đã đề cập ở Chương 2. Và trở kháng vào có thể được điều chỉnh bằng cách thay đổi cấu trúc bề mặt nhằm đạt phối hợp trở kháng giữa MA và môi trường truyền.

Trên cơ sở đó, chúng tôi thực hiện điều chỉnh hình dạng của lớp cộng hưởng bằng cách khoét lớp cộng hưởng VO₂ bởi một hình vuông có cạnh s , nhằm đạt được tính phối hợp trở kháng cho cấu trúc. Thiết kế sau khi tối ưu được mô tả trên Hình 3.3(a), (b).



Hình 3.3. Ô cơ sở của MA sử dụng VO₂ cấu trúc đĩa tròn bị khoét bởi hình vuông cạnh s : (a) ảnh 3D và (b) ảnh mặt trên ô cơ sở

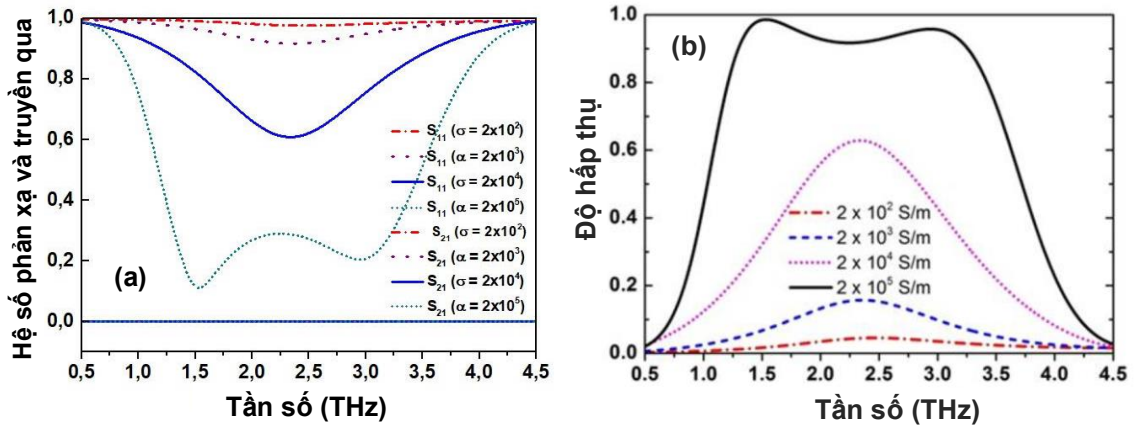
3.1.2. Khảo sát tính chất hấp thụ của MA hoạt động vùng tần số THz

Khi sóng điện từ tương tác với bề mặt MA, các thông số quan trọng để mô tả quá trình này bao gồm độ truyền qua (T), độ phản xạ (R) và độ hấp thụ (A). VO₂ là một vật liệu có độ dẫn điện thay đổi đáng kể theo nhiệt độ môi trường. Độ dẫn của VO₂ phụ thuộc vào nhiệt độ được thể hiện như trên Bảng 3.2. Cụ thể, khi nhiệt độ môi trường thay đổi từ 25°C đến 85°C, độ dẫn điện của VO₂ thay đổi từ 2×10^2 S/m trong pha điện môi đến 2×10^5 S/m trong pha kim loại [137-139].

Bảng 3.2. Sự thay đổi độ dẫn của vật liệu VO₂ vào nhiệt độ

Nhiệt độ	25 °C	50 °C	68 °C	85 °C
Độ dẫn của VO ₂	2×10^2 S/m	2×10^3 S/m	2×10^4 S/m	2×10^5 S/m

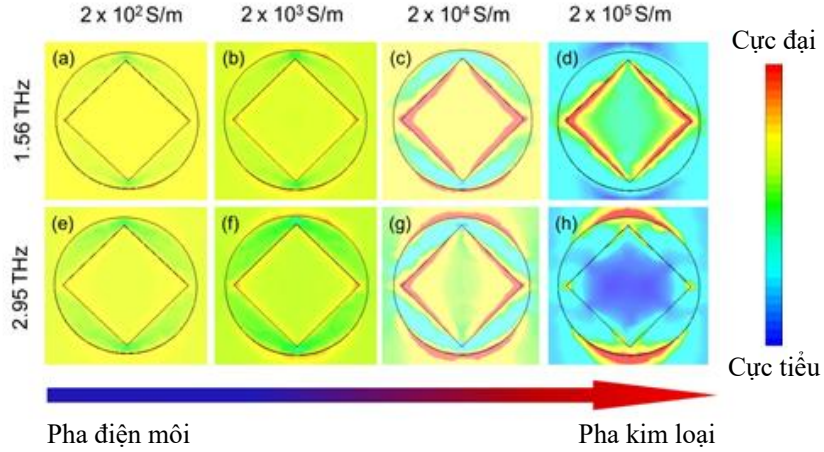
Kết quả mô phỏng về độ truyền qua, độ phản xạ và độ hấp thụ của MA ứng với các giá trị độ dẫn khác nhau của VO₂ được thể hiện trên Hình 3.4. Khi tăng độ dẫn của VO₂ từ 2×10^2 S/m đến 2×10^5 S/m, độ hấp thụ của MA tăng dần từ 4% đến 98%, đồng thời băng thông cũng được mở rộng. Sự gia tăng này chủ yếu xuất phát từ hiện tượng cộng hưởng điện từ mạnh khi VO₂ ở trạng thái có độ dẫn cao, dẫn đến tổn hao Ohmic lớn hơn và khả năng hấp thụ sóng điện từ cao hơn. Kết quả trên cho thấy cấu trúc MA sử dụng VO₂ có tiềm năng lớn trong việc điều chỉnh khả năng hấp thụ sóng điện từ bằng cách kiểm soát nhiệt độ môi trường làm việc để thay đổi độ dẫn của vật liệu.



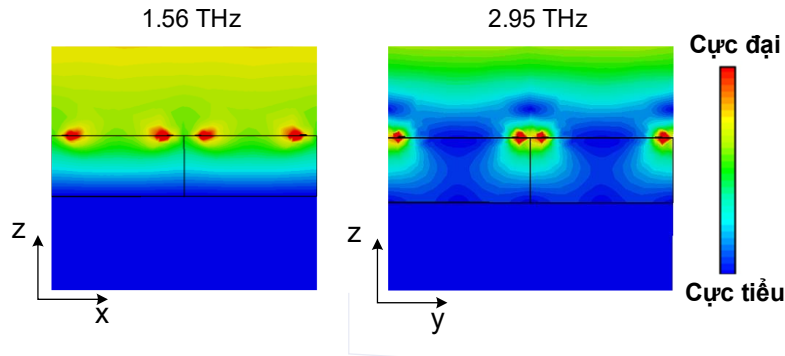
Hình 3.4. (a) Phổ phản xạ, truyền qua mô phỏng và (b) Phổ hấp thụ mô phỏng với các giá trị độ dẫn khác nhau của VO₂

Để hiểu rõ hơn về cơ chế hoạt động của MA đề xuất, phân bố điện trường với các độ dẫn khác nhau của VO₂ đã được mô phỏng, kết quả được thể hiện như trong Hình 3.5. Khi VO₂ có độ dẫn thấp (độ dẫn bằng 2×10^2 S/m), lớp VO₂ ở trạng thái gần như trong suốt đối với sóng điện từ trong dải tần quan sát. Trong trường hợp này, hầu hết sóng điện từ khi chiếu đến sẽ xuyên qua lớp VO₂ và lớp điện môi, sau đó bị phản xạ trở lại từ lớp nền kim loại ở dưới cùng. Hiện tượng này giải thích tại sao cấu trúc MA có độ hấp thụ thấp khi VO₂ ở pha điện môi, như đã quan sát thấy trong Hình 3.4. Độ phản xạ cao và khả năng hấp thụ hạn chế ở pha điện môi của VO₂ cho thấy cấu trúc lúc này hoạt động chủ yếu như một bộ phản xạ khi VO₂ có độ dẫn thấp.

Khi tăng độ dẫn điện của VO₂ từ 2×10^2 S/m tới 2×10^5 S/m, lúc này VO₂ chuyển từ pha điện môi sang pha kim loại. Quan sát điện trường tại tần số cộng hưởng 1,56 GHz cho thấy, điện trường tập trung mạnh dần ở các cạnh hình vuông phía trong của lớp VO₂ tương ứng với việc tăng dần độ dẫn của VO₂. Tại tần số cộng hưởng 2,95 GHz, ứng với VO₂ có độ dẫn 2×10^4 S/m, điện trường tập trung ở các cạnh hình vuông phía trong và hai phía vòng ngoài đĩa tròn của lớp VO₂. Còn khi VO₂ có độ dẫn 2×10^5 S/m, điện trường chuyển sang tập trung hầu hết ở hai phía vòng ngoài đĩa tròn của lớp VO₂. Sự tập trung này tương ứng với sự gia tăng hiệu suất hấp thụ của cấu trúc MA. Ngoài ra, khi VO₂ đạt độ dẫn điện 2×10^4 S/m (tương ứng với nhiệt độ kích thích là 68°C) và 2×10^5 S/m (tương ứng với nhiệt độ kích thích là 85°C), phân bố điện trường bề mặt thay đổi ít. Điều này được giải thích rằng VO₂ đã chuyển sang pha kim loại ở nhiệt độ 68°C. Hơn nữa, ứng với độ dẫn của VO₂ là 2×10^5 S/m, có thể quan sát thấy năng lượng điện trường tập trung ở giao diện giữa lớp VO₂ và lớp điện môi, như thể hiện trên Hình 3.6. Điều này chứng tỏ hấp thụ xảy ra một phần trên lớp VO₂ và một phần trên lớp điện môi polyimide.



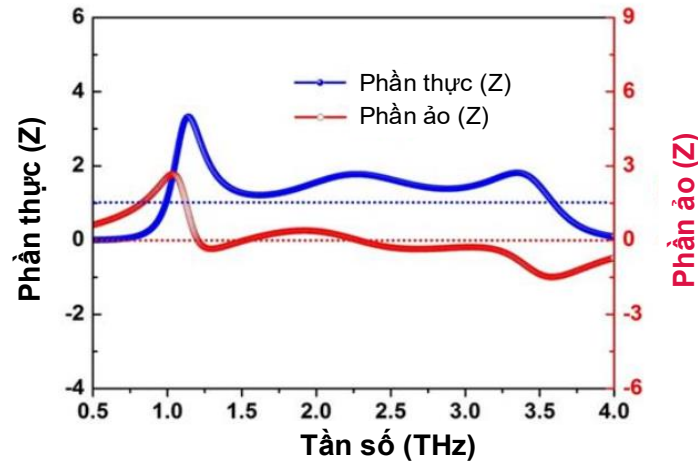
Hình 3.5. Phân bố điện trường mô phỏng tại các tần số cộng hưởng 1,56 THz và 2,95 THz với độ dẫn khác nhau của VO_2



Hình 3.6. Phân bố điện trường mô phỏng trong ô đơn vị đối với sóng tới phân cực y ở tần số cộng hưởng khi VO_2 có độ dẫn 2×10^5 S/m trong (a) mặt phẳng xz và (b) mặt phẳng yz được xác định tại vị trí điện trường tập trung.

Ngoài ra, cơ chế vật lý của đặc tính hấp thụ gần tuyệt đối sóng điện từ của cấu trúc đề xuất có thể được giải thích rõ hơn dựa trên lý thuyết phối hợp trở kháng. Trong cấu trúc, sóng điện từ truyền qua bị chặn hoàn toàn bởi lớp kim loại liên tục ở phía dưới. Vì vậy, hấp thụ gần tuyệt đối có thể đạt được bằng cách tối thiểu hóa hệ số phản xạ. Theo lý thuyết phối hợp trở kháng, hệ số phản xạ thấp nhất khi có sự phối hợp trở kháng giữa trở kháng vào của cấu trúc và trở kháng của môi trường truyền.

Từ kết quả mô phỏng hệ số phản xạ S_{11} phần thực và phần ảo của trở kháng vào được tính toán và thể hiện trên Hình 3.7. Kết quả cho thấy, phần thực của trở kháng vào gần bằng 1 trong dải tần từ 1,25 đến 3,5 THz trong khi phần ảo gần bằng 0 trong cùng dải tần này. Kết quả này chỉ ra rằng trở kháng đặc tính của cấu trúc đã được phối hợp tốt với trở kháng của không gian tự do trong dải tần này.



Hình 3.7. Kết quả tính toán trở kháng vào của MA với VO_2 ở pha kim loại

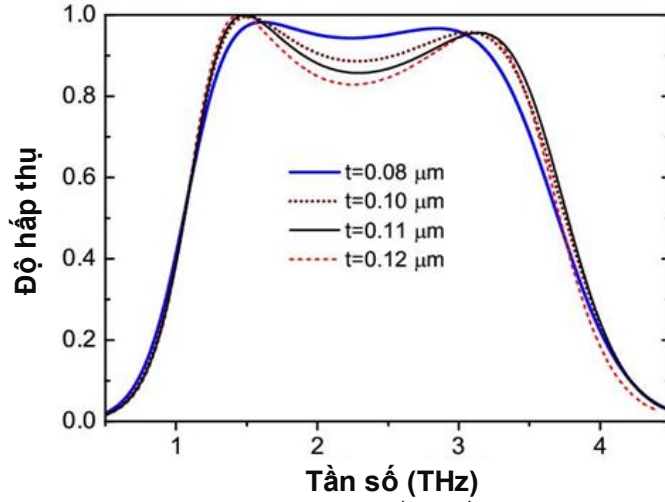
Hơn nữa, các kết quả này hoàn toàn phù hợp với phân bố điện trường bề mặt được trình bày trên Hình 3.5, xác nhận rằng sự phối hợp trở kháng tốt giữa môi trường truyền và cấu trúc vật liệu là yếu tố chính dẫn đến hiệu suất hấp thụ cao. Cơ chế này không chỉ giải thích đặc tính hấp thụ gần tuyệt đối của cấu trúc mà còn cung cấp cơ sở khoa học để tối ưu hóa thiết kế các vật liệu hấp thụ sóng điện từ trong các ứng dụng thực tế.

Từ các kết quả được phân tích ở trên cho thấy cấu trúc MA đạt hiệu suất hấp thụ tối ưu ở ngưỡng nhiệt độ 68°C , và việc tăng nhiệt độ cao hơn không mang lại lợi ích đáng kể do độ dẫn của VO_2 không tăng hơn được nữa. Điều này giúp giảm nhu cầu năng lượng trong các ứng dụng thực tế, đồng thời khẳng định tính hiệu quả của cấu trúc trong việc điều chỉnh và tối ưu hóa chức năng bằng cách kiểm soát trạng thái pha của VO_2 .

3.1.3. Ảnh hưởng của độ dày lớp cộng hưởng đến hiệu suất hấp thụ của MA

Để khảo sát ảnh hưởng của độ dày lớp vật liệu làm bề mặt cộng hưởng đến các đặc trưng của MA, chúng tôi đã tiến hành thay đổi độ dày t của lớp vật liệu VO_2 khi VO_2 ở pha kim loại (tương ứng với độ dẫn $2 \times 10^5 \text{ S/m}$) trong khi cố định giá trị kích thước các thông số còn lại của cấu trúc và tiến hành các phép đo để khảo sát các hệ số phản xạ và hệ số truyền qua tương ứng. Từ các kết quả này, chúng tôi đã tính toán được độ hấp thụ của MA ứng với các giá trị khác nhau của độ dày lớp VO_2 .

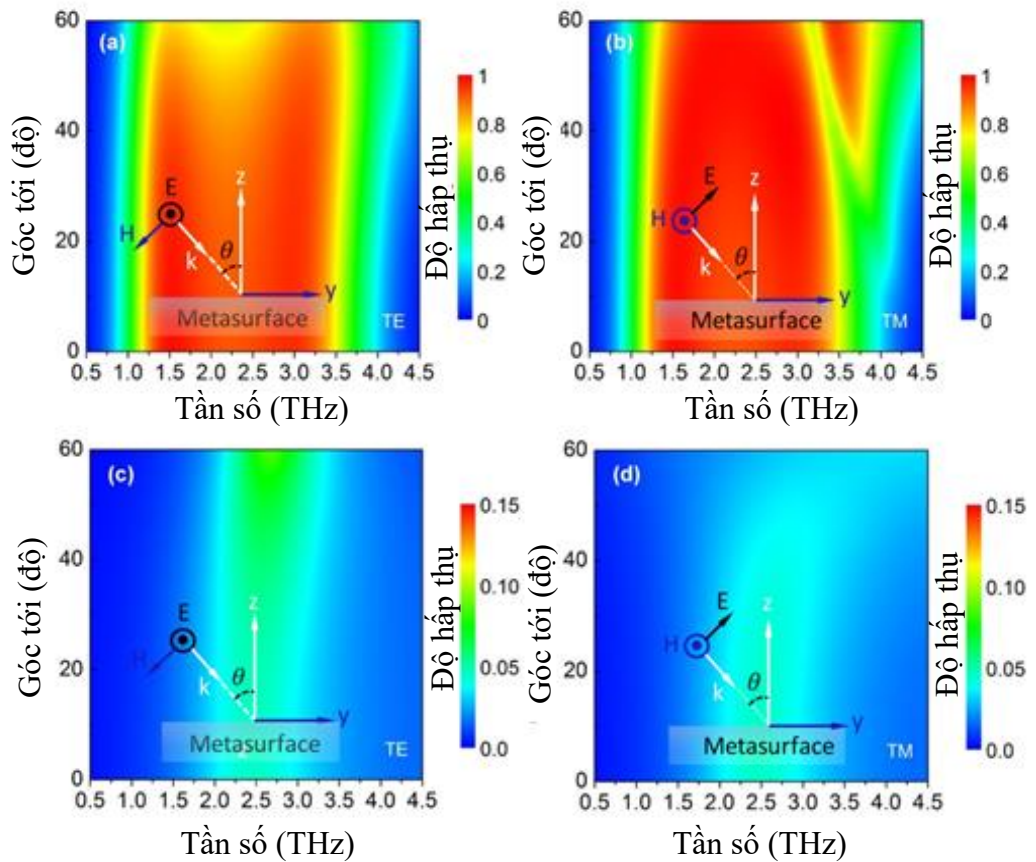
Kết quả độ hấp thụ được hiển thị trên Hình 3.8 cho thấy khi tăng độ dày t của lớp VO_2 , độ hấp thụ của MA giảm tuy nhiên bằng thông hấp thụ có xu hướng tăng nhẹ. Điều này có thể được giải thích là do khi độ dày lớp VO_2 tăng lên, khả năng tạo ra sự cộng hưởng mạnh mẽ tại các tần số cụ thể giảm do trở kháng vào của cấu trúc bị thay đổi, dẫn đến hiệu suất hấp thụ giảm. Tuy nhiên, sự tương tác giữa sóng điện từ và lớp VO_2 cũng thay đổi, tạo ra nhiều tần số cộng hưởng trong một dải tần rộng hơn, từ đó làm tăng nhẹ bằng thông hấp thụ. Giá trị độ dày lớp VO_2 được tối ưu là $0,08 \mu\text{m}$.



Hình 3.8. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của độ dày lớp VO_2 đến hiệu suất hấp thụ

3.1.4. Ảnh hưởng của góc tới đến hiệu suất hấp thụ của MA

Bên cạnh đó, chúng tôi tiến hành khảo sát độ hấp thụ của cấu trúc MA đề xuất khi VO_2 ở pha kim loại trong cả hai chế độ TE và TM với các góc tới thay đổi từ 0° đến 60° và góc phân cực thay đổi từ 0 đến 90° . Kết quả khảo sát được thể hiện trên Hình 3.9 và 3.10.

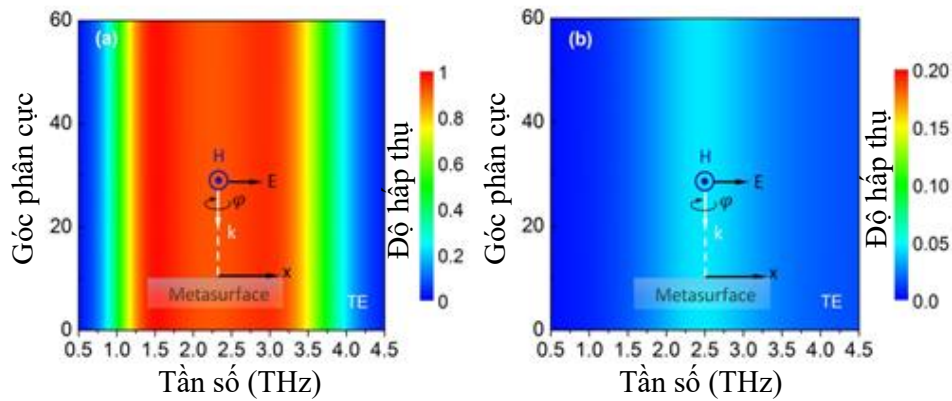


Hình 3.9. Phổ hấp thụ mô phỏng của MA đề xuất với sự thay đổi góc tới cho phân cực TE và TM với: (a), (b) pha kim loại và (c), (d) pha điện môi

Khi VO_2 ở pha kim loại, kết quả được thể hiện trên Hình 3.9(a) (b) cho thấy, ở phân cực TE, cấu trúc hoạt động hiệu quả với các góc tới lên đến 60° . Khi góc tới tăng, độ hấp thụ vẫn ổn định, tuy nhiên, dải tần hấp thụ có xu hướng dịch chuyển lên dải tần cao hơn. Ở phân cực TM, độ hấp thụ vẫn ổn định, nhưng băng thông hấp thụ có sự thu hẹp khi góc tới tăng và phổ hấp thụ phân chia thành hai dải tần riêng biệt. Tuy nhiên, có thể quan sát thấy độ hấp thụ mạnh hơn khi góc tới lớn hơn 40° . Điều này cho thấy tần số cộng hưởng cao di chuyển đáng kể về phía dải tần số cao hơn, trong khi tần số cộng hưởng thấp không thay đổi nhiều khi tăng góc tới.

Khi VO_2 ở pha điện môi, kết quả hiển thị trên Hình 3.9(c),(d) cho thấy mức độ hấp thụ của MA rất thấp ở tất cả các góc phân cực và hầu hết các sóng điện từ tới đều bị phản xạ. Điều này chứng tỏ rằng MA hoạt động như một bộ phản xạ băng rộng.

Ngoài ra, chúng tôi cũng phân tích cấu trúc được đề xuất trong cả pha kim loại và pha điện môi của lớp VO_2 ở các giá trị khác nhau của góc phân cực (ϕ), như thể hiện trong Hình 3.10.



Hình 3.10. Phổ hấp thụ mô phỏng của MA đề xuất với sự thay đổi của góc phân cực với (a) pha kim loại và (b) pha điện môi của VO_2

Trong trường hợp này, sóng tới được chiếu vuông góc với bề mặt để nghiên cứu sự phụ thuộc của độ hấp thụ vào góc phân cực. Kết quả mô phỏng thể hiện trên Hình 3.10 (a) cho thấy, khi VO_2 ở pha kim loại, cấu trúc cho thấy tính chất hoàn toàn không phụ thuộc vào phân cực, với băng thông hấp thụ và độ hấp thụ hầu như không thay đổi trong dải góc phân cực từ 0° đến 90° . Kết quả này đạt được nhờ tính đối xứng của cấu trúc được đề xuất. Trong khi đó, kết quả thể hiện trên Hình 3.10 (b) cho thấy, khi VO_2 chuyển sang pha điện môi, độ hấp thụ của cấu trúc gần như bằng không ở tất cả các giá trị của góc phân cực trong khoảng từ 0° đến 90° . Trong trạng thái này, VO_2 hoạt động như một chất điện môi trong suốt, và cấu trúc đề xuất đóng vai trò như một bộ phản xạ sóng không nhạy cảm với phân cực, hoạt động hiệu quả trong vùng tần số THz.

Tính mới và hiệu suất hấp thụ của MA đề xuất được đánh giá thông qua so sánh

với một số nghiên cứu trước đây về các bộ hấp thụ THz có khả năng điều chỉnh/chuyển đổi chức năng sử dụng vật liệu VO₂, như được trình bày trong Bảng 3.2. Trong bảng này, các thông số so sánh bao gồm: băng tần hoạt động (trong vùng tần số THz), tỉ số băng thông tương đối (tính bằng %) là tỉ lệ của băng thông hấp thụ (đạt trên 90%) và tần số trung tâm của dải hấp thụ, góc không nhạy cảm là góc tới tối đa của sóng điện từ mà độ hấp thụ được duy trì trên 80% trong băng thông hấp thụ. Ngoài ra số lớp của cấu trúc cũng được đưa vào để đánh giá độ phức tạp trong quá trình chế tạo. Kết quả so sánh trong Bảng 3.3 cho thấy thiết kế đề xuất vượt trội với cấu trúc đơn giản, dễ chế tạo nhưng đạt được băng thông rộng nhất và không nhạy cảm với góc tới, mang lại hiệu suất vượt trội so với các công trình trước.

Bảng 3.3. So sánh hiệu suất của cấu trúc MA đề xuất
với các cấu trúc MA sử dụng VO₂ đã được công bố

TLTK	Dải tần hoạt động (THz)/ Băng thông tương đối (%)	Độ hấp thụ	Không nhạy với góc tới	Số lớp	Phương thức thay đổi độ dẫn của VO ₂
[123]	0,74 – 1,62 (75,0 %)	> 90%	55°	6	Nhiệt
[140]	1,85 – 4,30 (79,7 %)	> 90%	15°	3	Nhiệt
MA đề xuất	1,29 – 3,26 (86,6 %)	> 90%	60°	3	Nhiệt

3.2. Thiết kế cấu trúc và khảo sát tính chất của vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ

Trong nhiều hệ thống quang học, chuyển đổi phân cực của sóng điện từ là một tính năng quan trọng và đóng vai trò then chốt. Việc điều khiển phân cực của sóng điện từ có thể được thực hiện thông qua các bộ chuyển đổi phân cực, mang lại lợi ích lớn cho nhiều ứng dụng [141-144]. Gần đây, MMs được xem như một hướng đi tiềm năng để phát triển các bộ chuyển đổi phân cực mới, nhỏ gọn và hoạt động hiệu quả trên dải băng rộng. Các nghiên cứu MPC đang tập trung vào việc phát triển các cấu trúc vật liệu MPC có hiệu suất cao, băng thông rộng và hoạt động ổn định với góc tới rộng. Các vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực hiện tại thường chỉ hoạt động hiệu quả trong một dải tần hẹp và yêu cầu thiết kế phức tạp, khó chế tạo và tích hợp vào các hệ thống thực tế. Ngoài ra, hiệu suất chuyển đổi phân cực của các cấu trúc vật liệu này còn bị ảnh hưởng mạnh mẽ bởi các yếu tố như góc tới của sóng và tổn hao

điện từ, làm giảm hiệu quả hoạt động của hệ thống. Bên cạnh đó, các nghiên cứu sâu về bản chất và cơ chế chuyển đổi phân cực còn ít đề cập.

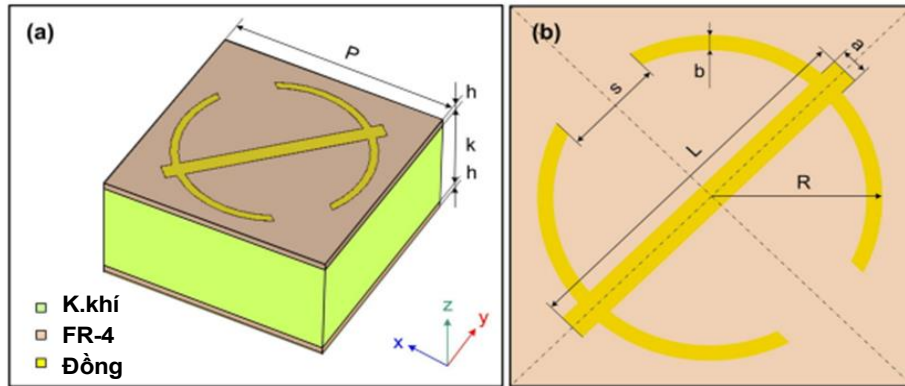
Trong nội dung này, luận án đề xuất một số cấu trúc MPC hoạt động vùng tần số GHz và THz. Các cấu trúc đề xuất được thiết kế có tính đối xứng và biến đổi lớp điện môi thành cấu trúc rỗng nhằm đạt được cấu trúc đơn giản, trọng lượng nhẹ, hiệu suất hoạt động cao, băng thông làm việc rộng và ít phụ thuộc vào góc sóng tới.

Để tối ưu hóa các thông số cấu trúc cũng như đánh giá hiệu suất chuyển đổi và khảo sát các đặc tính của bộ chuyển đổi phân cực được đề xuất, phần mềm mô phỏng CST với bộ giải miền tần số được sử dụng. Các điều kiện biên của ô đơn vị được gán theo hướng x và y , trong khi điều kiện mở được gán cho hướng z .

3.2.1. Thiết kế cấu trúc MPC cho ứng dụng băng tần S, C

3.2.1.1. Thiết kế cấu trúc

Hình 3.11 trình bày cấu trúc ô đơn vị của MPC được đề xuất cho các ứng dụng băng tần S (2 – 4 GHz) và băng tần C (4 – 8 GHz). Cấu trúc của MPC đề xuất bao gồm một mảng định kỳ các ô đơn vị có kích thước là P .



Hình 3.11. (a) Hình ảnh 3D và (b) Hình ảnh lớp trên ô đơn vị của MPC đề xuất

Như được hiển thị trong Hình 3.11(a), ô đơn vị của MPC bao gồm hai lớp chất nền FR-4 giống hệt nhau được phân cách bằng một khe hở không khí. Một lớp kim loại được khắc ở mặt trên của để đóng vai trò là bộ cộng hưởng. Trong khi đó, lớp dưới là một tấm kim loại liên tục đóng vai trò là mặt phẳng tiếp đất. Hằng số tổn hao và hằng số điện môi tương đối của chất nền FR-4 lần lượt là 0,025 và 4,3. Lớp kim loại đóng vai trò là bộ cộng hưởng bao gồm hai vòng cung đối diện được nối với nhau bằng một dải ở trung tâm thể hiện như trên Hình 3.11(b). Các lớp kim loại trên cùng và dưới cùng của ô đơn vị được làm bằng đồng, có độ dày 0,035 mm và độ dẫn điện là $5,96 \times 10^7$ S/m. Bên cạnh đó, lớp điện môi dày hơn góp phần làm giảm hệ số phẩm chất Q và do đó có thể nâng cao băng thông hoạt động [145]. Tuy nhiên, một ô đơn vị với lớp điện môi thực tế (vật liệu có tính rắn) dày thường nặng, do đó, lớp không

khí được giới thiệu ở đây như một giải pháp để đạt được đồng thời các đặc tính băng thông rộng và trọng lượng nhẹ. Để đạt được mục tiêu thiết kế, phương pháp mô phỏng được thực hiện để tối ưu các tham số của bộ chuyển đổi tương ứng với hiệu suất chuyển đổi phân cực lớn nhất trong dải tần số làm việc. Bảng 3.4 là kích thước hình học của các tham số sau khi đã được tối ưu.

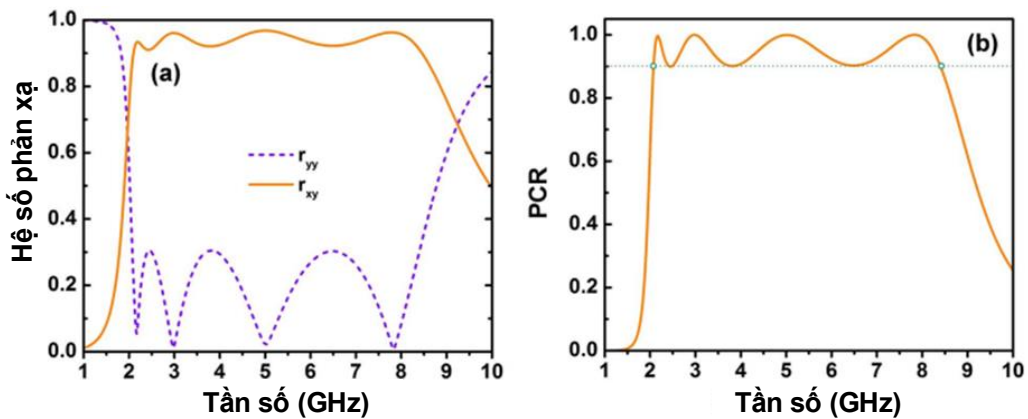
Bảng 3.4. Giá trị các tham số tối ưu ô đơn của MPC đề xuất.

Thông số	P	k	h	a	b	s	L	R
Giá trị (mm)	22,2	10	0,8	1,54	0,75	2,7	10,3	9,3

3.2.1.2. Khảo sát tính chất chuyển đổi phân cực sóng điện từ của MPC

MPC chuyển đổi phần lớn sóng tới thành sóng phản xạ với góc quay 90° theo phân cực (được gọi là phân cực chéo hoặc phân cực vuông góc). Tuy nhiên, vẫn tồn tại một lượng sóng phản xạ không thay đổi phân cực sau khi phản xạ (được gọi là đồng phân cực).

Hình 3.12(a) trình bày biên độ mô phỏng của hệ số phản xạ đồng phân cực (r_{yy}) và hệ số phản xạ vuông góc (r_{xy}) của MPC được đề xuất trong dải tần từ 1 đến 10 GHz ở chế độ điện trường TE. Kết quả cho thấy rằng trong dải tần từ 2 đến 8,45 GHz, giá trị của r_{xy} lớn hơn đáng kể so với r_{yy} . Điều này chứng tỏ hầu hết sóng tới trong dải tần này đã được chuyển đổi thành sóng phân cực chéo sau khi phản xạ.



Hình 3.12. (a) Biên độ mô phỏng của các hệ số phản xạ và (b) phổ PCR mô phỏng dưới tác động của sóng tới ở chế độ TE.

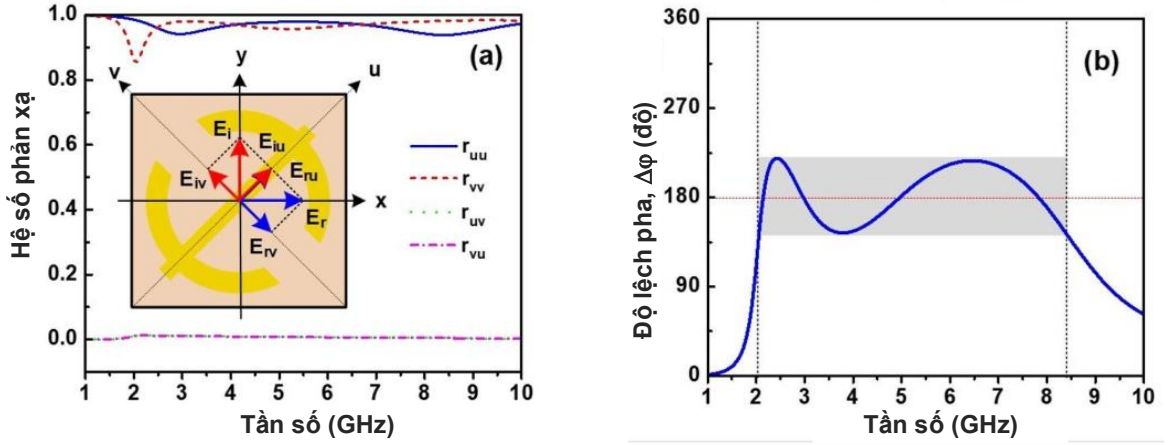
Hình 3.12(b) trình bày kết quả mô phỏng hiệu suất chuyển đổi phân cực của MPC đề xuất. Có thể quan sát thấy hiệu suất chuyển đổi phân cực đạt được lớn hơn 90% trong dải tần từ 2 GHz đến 8,45 GHz bao phủ đầy đủ cả hai dải băng tần S và C. Độ rộng băng thông tương đối (RBW - Relative Bandwidth) đạt 123,4% trong dải tần từ 2 GHz đến 8,45 GHz, chứng tỏ rằng MPC đề xuất là siêu băng rộng. RBW là thông

số quan trọng để đánh giá độ rộng băng thông của một MPC và được tính bằng biểu thức sau:

$$RBW = 2 \times \frac{f_U - f_L}{f_U + f_L}. \quad (3.3)$$

Trong đó f_U và f_L là tần số cao nhất và tần số thấp nhất của sóng điện từ có hiệu suất chuyển đổi phân cực trên 90%.

Để hiểu rõ nguyên lý hoạt động của MPC được đề xuất, biên độ mô phỏng và độ lệch pha của các hệ số phản xạ được khảo sát và kết quả được trình bày trong Hình 3.13. Giả sử sóng tới có phân cực dọc theo trục y và truyền vuông góc với lớp trên cùng của MPC dọc theo hướng z . Lúc này, điện trường tới (E_i) và điện trường phản xạ (E_r) của sóng điện từ có thể được phân tích thành hai thành phần vuông góc nhau trong hệ tọa độ uv như trong Hình 3.13(a).



Hình 3.13. (a) Sơ đồ phân tích điện trường theo trục u, v và biên độ của các hệ số phản xạ theo trục u và v ; (b) Độ lệch pha của hệ số phản xạ theo hai thành phần uu và vv .

Sự phân tích này được thể hiện qua các biểu thức (3.4) và (3.5), tương ứng, như sau:

$$E_i = E_{iu} + E_{iv}, \quad (3.4)$$

$$E_r = E_{ru} + E_{rv} = r_{uu}E_{iu} + r_{vv}E_{iv}. \quad (3.5)$$

trong đó r_{uu} và r_{vv} là các hệ số phản xạ dọc theo trục u và trục v , có thể được định nghĩa là $r_{uu} = E_{ru} / E_{iu}$, và $r_{vv} = E_{rv} / E_{iv}$.

Phương pháp này cho phép phân tích chi tiết các đặc điểm phản xạ, đặc biệt là các thay đổi về biên độ và pha, giúp làm sáng tỏ cơ chế hoạt động của MPC.

Vì chất điện môi FR-4 có tổn thất thấp ($\tan \delta = 0,025$) được sử dụng cho MPC nên có thể bỏ qua tổn thất năng lượng của sóng điện từ tới. Do đó, biên độ của r_{uu} và r_{vv} có thể được coi là bằng 1 ($|r_{uu}| = |r_{vv}| = 1$). Ngoài ra, do MPC được đề xuất có cấu

trúc không đối xứng, nó có thể được coi là cấu trúc dị hướng dẫn đến sự lệch pha ($\Delta\varphi$) giữa r_{uu} và r_{vv} [146]. Khi đó, ta có quan hệ giữa r_{uu} và r_{vv} là: $r_{vv} = r_{uu}e^{-j\Delta\varphi}$.

Biểu thức (3.5) có thể được viết lại thành:

$$E_r = r_{uu}E_{iu} + r_{vv}E_{iv} = r_{uu}E_{iu} + r_{uu}e^{-j\Delta\varphi}E_{iv}. \quad (3.6)$$

Khi $|\Delta\varphi| = 180^\circ + 2k\pi$ (k là số nguyên), kết hợp các biểu thức (3.5) và (3.6) chúng ta có $E_{ru} = r_{uu}E_{iu}$ và $E_{rv} = -r_{uu}E_{iv}$. Điều đó có nghĩa là E_{ru} hoặc E_{rv} ngược với hướng tới tương ứng của chúng, dẫn đến điện trường phản xạ tổng hợp (E_r) được quay chính xác 90° so với sóng tới như được mô tả trong Hình 3.13(a).

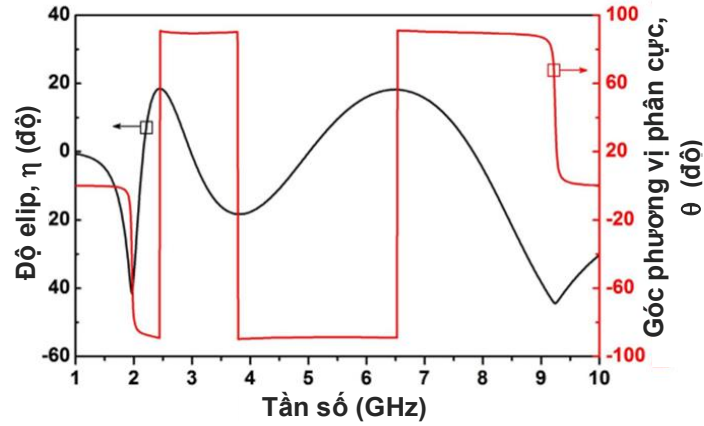
Để chứng tỏ sự phân tích ở trên, chúng tôi mô phỏng cường độ và độ lệch pha của các hệ số phản xạ theo hướng u và v của bộ chuyển đổi trong điều kiện sóng tới vuông góc với bề mặt vật liệu. Như được hiển thị trong Hình 3.13(a), biên độ hệ số phản xạ đồng phân cực r_{uu} và r_{vv} gần bằng 1 trong băng thông cực rộng từ 2 đến 8,45 GHz. Hơn nữa, biên độ hệ số phản xạ vuông góc r_{uv} và r_{vu} gần như bằng 0 trong dải tần từ 2 đến 8,45 GHz. Hình 3.13(b) cho thấy độ lệch pha $\Delta\varphi$ giữa r_{uu} và r_{vv} theo tần số có giá trị trong khoảng là $180^\circ - 40^\circ \leq \Delta\varphi \leq 180^\circ + 40^\circ$ từ 2 GHz đến 8,45 GHz. Độ lệch pha bằng 180° ở bốn tần số cộng hưởng 2,16 GHz, 2,98 GHz, 5,0 GHz và 7,83 GHz của MPC.

Ngoài ra, để đánh giá trạng thái phân cực của sóng điện từ, độ elip (η) và góc phương vị phân cực (θ) đối với phân cực y được nghiên cứu, η và θ được xác định bởi biểu thức 3.7 và 3.8 [147, 148].

$$\eta = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{2xp_r \times \sin(\Delta\varphi)}{1 + |p_r|^2} \right), \quad (3.7)$$

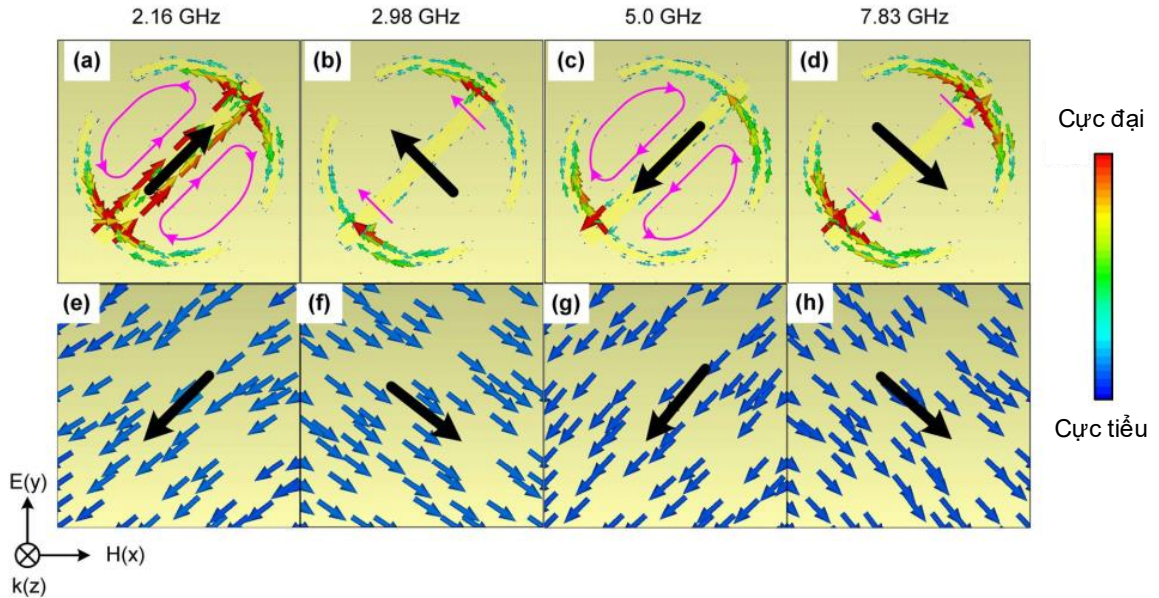
$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2xp_r \times \cos(\Delta\varphi)}{1 - |p_r|^2} \right). \quad (3.8)$$

ở đây $p_r = r_{xy}/r_{yy}$ và $\Delta\varphi$ là độ lệch pha giữa r_{xy} và r_{yy} . Theta là góc quay của điện trường sóng phản xạ đối với hướng điện trường của sóng tới, trong khi eta biểu thị trạng thái phân cực của sóng phản xạ. Khi $\eta = 0^\circ$, sóng phản xạ có sự phân cực tuyến tính. Kết quả là, sóng phân cực y có thể được chuyển đổi thành sóng phân cực x của nó nếu $\eta = 0^\circ$ và $\theta = \pm 90^\circ$. θ và η tính toán được minh họa trong Hình 3.14 cho thấy độ elip của sóng phân cực y tới nhỏ hơn 18° từ 2,0 đến 8,45 GHz ở toàn bộ dải tần trong khi góc phương vị phân cực giữ gần 90° hoặc -90° trong dải tần làm việc.



Hình 3.14. Kết quả mô phỏng độ elip và góc phương vị phản cực của sóng tới phân cực y

Ngoài ra, để hiểu rõ cơ chế vật lý của quá trình chuyển đổi phân cực băng rộng của bộ chuyển đổi được đề xuất, chúng tôi mô phỏng sự phân bố dòng điện bề mặt lớp trên và mặt phẳng nền (lớp dưới cùng) tại bốn tần số cộng hưởng, kết quả được thể hiện trong Hình 3.15.



Hình 3.15. Phân bố dòng điện mô phỏng tại bề mặt của lớp trên và lớp dưới tại bốn tần số cộng hưởng.

Tại tần số 2,16 GHz và 2,98 GHz như thể hiện trên Hình 3.15(a), (e) và Hình 3.15(b), (f), dòng điện bề mặt trên lớp trên cùng song song và ngược chiều với dòng điện trên lớp dưới cùng. Dòng điện song song nhưng ngược chiều này tạo thành dòng điện vòng trong lớp điện môi, hiện tượng này được coi là cộng hưởng từ [149]. Ngược lại, tại tần số 5,0 GHz và 7,83 GHz như thể hiện trên Hình 3.15(c), (g) và Hình 3.15(d), (h), dòng điện bề mặt trên lớp trên cùng song song và cùng chiều với dòng điện trên lớp dưới cùng. Các dòng điện song song cùng chiều này tạo ra một trường điện từ mạnh trong lớp chất nền, và được tạo ra do hiện tượng cộng hưởng điện [81].

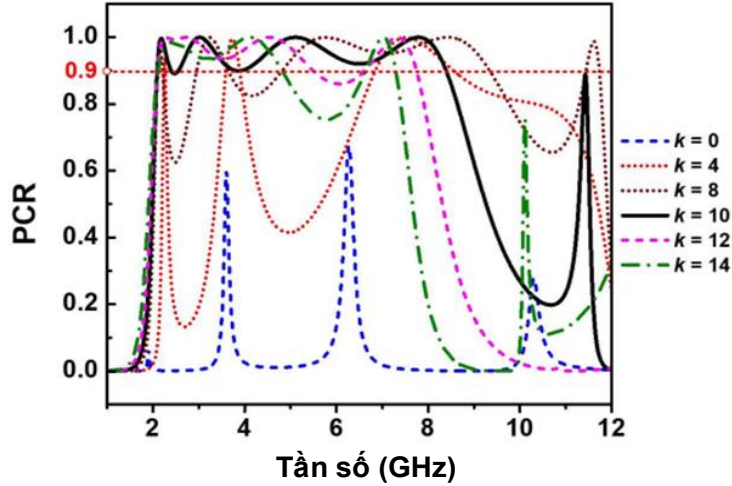
Do đó, hai cộng hưởng thấp hơn (2,16 GHz và 2,98 GHz) bắt nguồn từ cộng hưởng từ, trong khi hai cộng hưởng cao hơn (5,0 GHz và 7,83 GHz) là kết quả của cộng hưởng điện. Hiện tượng cộng hưởng này là yếu tố quyết định đến hiệu suất chuyển đổi phân cực băng rộng của bộ chuyển đổi được đề xuất. Một điểm đáng chú ý thêm về sự phân bố dòng điện trong Hình 3.15 luôn đối xứng qua các trục theo đường chéo. Cụ thể, dòng điện ở tần số 2,16 GHz, 5,0 GHz, 7,83 GHz đối xứng qua trục u và dòng điện ở tần số 2,98 GHz đối xứng qua trục v. Các kết quả này đã chứng minh thêm tính đối xứng qua đường chéo ô cơ sở của cấu trúc và chế độ chuyển đổi phân cực.

Ngoài ra, kết quả thể hiện trên Hình 3.15(a) cho thấy, hai vòng dòng điện được hình thành gồm vòng bên trái ngược chiều kim đồng hồ và vòng bên phải theo chiều kim đồng hồ. Trong khi đó, các vòng dòng điện ở Hình 3.15(c) có chiều ngược lại: vòng bên trái theo chiều kim đồng hồ và vòng bên phải ngược chiều kim đồng hồ. Hiện tượng này thường thể hiện tính năng cộng hưởng từ. Tuy nhiên, từ trường kích thích được tạo ra bởi các vòng dòng điện này là song song và ngược chiều, dẫn đến sự triệt tiêu lẫn nhau. Mặt khác, ở Hình 3.15(b), cả hai dòng điện trong hai nhánh của cung đều chảy về phía trên bên trái, trong khi ở Hình 3.15(d), chiều của các dòng điện lại ngược lại. Điều này biểu hiện đặc trưng của cộng hưởng điện. Tại tần số cộng hưởng 2,98 GHz, điện trường tổng hợp cùng hướng với điện trường tới, cho thấy rằng cộng hưởng từ đóng vai trò chủ đạo tại tần số này [150]. Ngược lại, tại tần số 7,83 GHz như thể hiện trên Hình 3.14(d), điện trường tổng hợp ngược hướng với điện trường tới, điều này chứng minh rằng cộng hưởng điện đã được hình thành ở tần số này [150].

Từ các kết quả trên, có thể kết luận rằng quá trình chuyển đổi phân cực băng rộng của bộ chuyển đổi được đề xuất là kết quả của sự tổng hợp từ bốn cơ chế cộng hưởng tại các tần số khác nhau (2,16 GHz, 2,98 GHz, 5,0 GHz và 7,83 GHz). Sự kết hợp này là yếu tố then chốt mang lại hiệu suất chuyển đổi vượt trội trong dải băng rộng.

Để nghiên cứu sâu hơn về vai trò của lớp không khí trong việc cải thiện hiệu suất chuyển đổi phân cực của bộ chuyển đổi được đề xuất, chúng tôi đã mô phỏng hiệu suất chuyển đổi phân cực ở các giá trị độ dày khác nhau của lớp không khí. Như thể hiện trong Hình 3.16, khi không có lớp không khí, MPC chỉ hiển thị bốn đỉnh hẹp, tách biệt trong dải tần từ 0 đến 12 GHz, với hiệu suất chuyển đổi phân cực thấp. Tuy nhiên, khi thêm lớp không khí, hiệu suất chuyển đổi phân cực của các đỉnh cộng hưởng được cải thiện đáng kể. Hơn nữa, cộng hưởng thấp nhất (gần 2 GHz) gần như không bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi độ dày lớp không khí từ 4 đến 14 mm. Ngược lại, các đỉnh cộng hưởng cao hơn dịch chuyển về phía tần số thấp khi độ dày của lớp

không khí tăng. Sự dịch chuyển này giúp các cộng hưởng chồng lấn lên nhau, tạo ra phổ PCR siêu băng rộng với hiệu suất cao. Kết quả này cho thấy rằng lớp không khí đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa hiệu suất chuyển đổi phân cực, đồng thời giúp mở rộng băng thông hoạt động của MPC được đề xuất.



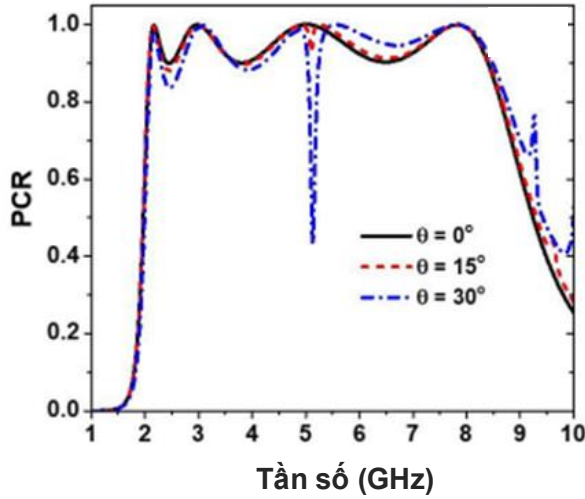
Hình 3.16. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của độ dày lớp không khí đến hiệu suất chuyển đổi phân cực của MPC đề xuất ở chế độ TE.

Sự tiếp nhận của lớp cộng hưởng kim loại, các tấm điện môi FR-4 và khe hở không khí được kết nối song song để tạo thành sự tiếp nhận đầu vào của cấu trúc. Khi phản ảo của công suất đầu vào bằng 0, cộng hưởng có thể được tạo ra. Kích thước và hình dạng của lớp cộng hưởng được tối ưu hóa để cố định độ dẫn của nó, trong khi độ dày của chất nền FR-4 được cố định ở mức 0,8 mm để đáp ứng yêu cầu về trọng lượng nhẹ. Do đó, các tần số cộng hưởng có thể được điều chỉnh bằng cách thay đổi độ dày của khe hở không khí [151]. Sự tiếp nhận của lớp cộng hưởng kim loại và sự tiếp nhận của các tấm điện môi FR-4 và khe hở không khí được kết nối song song để tạo thành sự tiếp nhận đầu vào của cấu trúc được đề xuất. Khi phản ảo của công suất đầu vào bằng 0, cộng hưởng có thể được tạo ra [152]. Kích thước và hình dạng của lớp cộng hưởng cũng được tối ưu hóa và cố định độ dẫn của nó. Để đáp ứng yêu cầu về trọng lượng nhẹ, độ dày của chất nền FR-4 được cố định ở mức 0,8 mm. Kết quả là, các tần số cộng hưởng có thể được điều chỉnh bằng cách sử dụng độ dày của khe hở khí [151]. Đặc biệt, độ dày khe hở không khí tối ưu là yếu tố quan trọng để tạo ra các cộng hưởng mang lại sự phù hợp trở kháng lớn nhất và mở rộng băng thông rộng nhất. Độ dày khe hở khí tối ưu cho cấu trúc được thiết kế là $k = 10$ mm, giúp đạt được hiệu suất chuyển đổi phân cực tốt nhất.

3.2.1.3. Ảnh hưởng của góc tới sóng điện từ đến tính chất chuyển đổi phân cực của MPC

Trong các ứng dụng thực tế, một thách thức quan trọng đối với bộ chuyển đổi phân cực sóng điện từ là đảm bảo sự ổn định của sóng điện từ trong môi trường thực

tế. Do đó, cần phải phân tích ảnh hưởng của góc tới đến hiệu suất chuyển đổi của cấu trúc được đề xuất. Để làm điều này, chúng tôi đã mô phỏng hiệu suất chuyển đổi của MPC trong phạm vi góc tới thay đổi từ 0° đến 50° ở cả hai chế độ TE và TM. Kết quả mô phỏng hiệu suất chuyển đổi phân cực của MPC được đề xuất với các giá trị khác nhau của góc tới được thể hiện trong Hình 3.17. Kết quả này được tính toán trong điều kiện sóng tới có điện trường song song với trục y (sóng tới phân cực y).



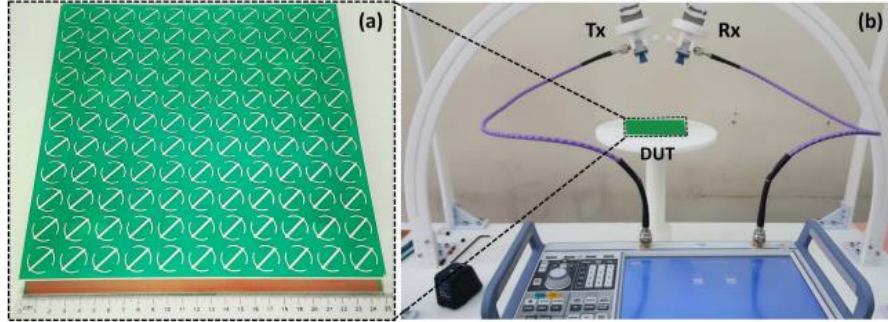
Hình 3.17. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của góc sóng tới đến hiệu suất của MPC

Kết quả thể hiện trên Hình 3.17 cho thấy, hiệu suất chuyển đổi phân cực của MPC giảm nhẹ khi góc tới thay đổi từ 0° đến 30° và duy trì trên 85% trong dải băng tần rộng, ngoại trừ dải tần rất hẹp xung quanh tần số 5 GHz. Có thể thấy rằng ở xung quanh tần số 5 GHz, hiệu suất chuyển đổi phân cực có sự sụt giảm rõ rệt, điều này cho thấy sóng tới bị hấp thụ mạnh trong vùng tần số này [153, 154]. Hiện tượng này có thể được giải thích do có cộng hưởng xảy ra giữa lớp kim loại dưới cùng và bề mặt vật liệu [155], dẫn đến sự sụt giảm hiệu suất chuyển đổi ở vùng tần số này.

3.2.1.4. Chế tạo và đo đặc trưng của mẫu MPC

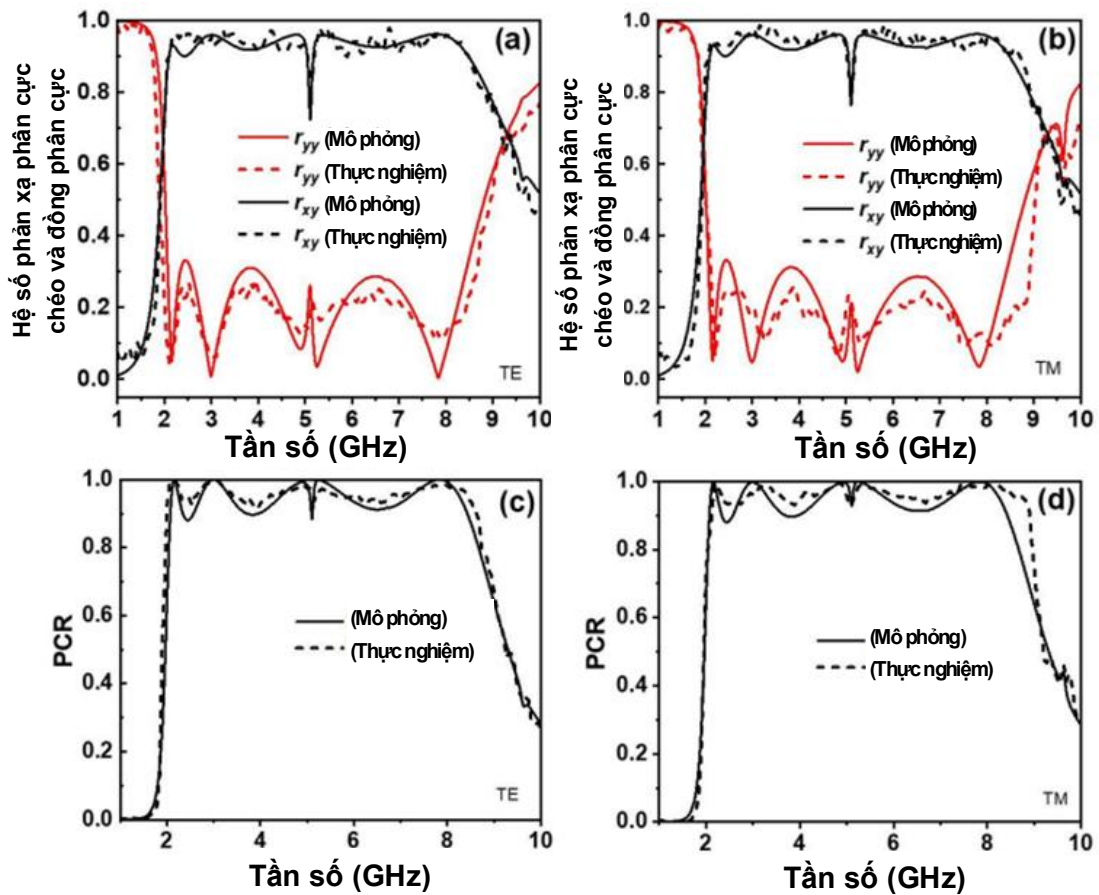
Để đánh giá các kết quả mô phỏng, mẫu MPC được chế tạo bằng phương pháp quang khắc và khảo sát các đặc trưng của mẫu bằng phương pháp đo đạc. Các thông số cấu trúc mẫu MPC được xác định theo thông số tối ưu của mô phỏng. Mẫu chế tạo sử dụng tấm mạch in PCB đã được phủ kim loại đồng (Cu) có kích thước $244,2 \times 244,2$ mm bao gồm 11×11 ô đơn vị. Kích thước này được lựa chọn nhằm để mẫu thu nhận được đầy đủ búp sóng chính từ ăng-ten phát. Tấm PCB bao gồm hai lớp kim loại Cu có độ dày khoảng 0,036 mm được ngăn cách bởi một lớp điện môi có hằng số điện môi là 4,3 và độ dày 0,8 mm. Hình ảnh mẫu vật liệu sau khi chế tạo được thể hiện trên Hình 3.18(a), thiết lập phép đo hệ số phản xạ của mẫu được mô tả trên Hình 3.18(b). Phép đo được thực hiện bằng máy phân tích mạng Rohde và Schwarz ZNB20 kết hợp với hai ăng-ten có độ lợi tiêu chuẩn là máy phát (T_x) và máy thu (R_x) để xác

định các hệ số phản xạ. Mẫu được đặt cách ăng-ten 0,5 m để đáp ứng điều kiện trường xa. Do các phép đo được thực hiện trong không gian trống, hệ thống đo lường được hiệu chuẩn với điều kiện này để tính đến ảnh hưởng của môi trường. Hiệu suất chuyển đổi phân cực đo được của mẫu vật liệu được xác định từ các hệ số phản xạ đồng phân cực và phản xạ vuông góc. Các phép đo được thực hiện trong dải tần từ 1 đến 10 GHz.



Hình 3.18. (a) Hình ảnh MPC được chế tạo; (b) Thiết lập phép đo các đặc trưng của mẫu.

Hình 3.19 hiển thị kết quả mô phỏng và kết quả đo đạc thực nghiệm các hệ số phản xạ ứng với góc tới của sóng điện từ là 10° .



Hình 3.19. Kết quả mô phỏng, kết quả đo đạc bằng thực nghiệm hệ số phản xạ và hiệu suất chuyển đổi phân cực của MPC được đề xuất ở chế độ (a), (c) điện trường TE và (b), (d) từ trường TM

Như kết quả thể hiện trong Hình 3.19(a) (b), cường độ đo được của các hệ số phản xạ đồng phân cực và phản xạ vuông góc là dưới 0,3 và trên 0,9 tương ứng trong dải tần số rất rộng từ 2 GHz đến 8,45 GHz. Kết quả này tương ứng với kết quả hiệu suất chuyển đổi phân cực mô phỏng được ở chế độ điện trường (TE) và từ trường (TM) đều cao hơn 90% trong dải tần 2 GHz đến 8,45 GHz.

Có thể thấy rằng, kết quả mô phỏng và kết quả đo đạc bằng thực nghiệm có sự tương đồng tốt với một chút sai lệch nhỏ. Nguyên nhân có thể là do sai số trong quá trình chế tạo và khẩu độ của hai ăng ten trong quá trình đo làm ảnh hưởng giá trị của góc tới. Phép đo bằng thực nghiệm xác nhận rằng MPC được đề xuất là một MPC tuyến tính hiệu quả cao.

Bảng 3.5 đưa ra kết quả so sánh hiệu suất hoạt động để xác nhận những lợi thế của thiết kế được đề xuất so với các MPC băng thông rộng hiện có đã được báo cáo gần đây. Việc so sánh được thực hiện về băng thông hoạt động với hiệu suất trên 90%, băng thông tương đối, hiệu suất chuyển đổi, tổng độ dày của các phần vật liệu rắn và kích thước của ô đơn vị.

Bảng 3.5. So sánh hiệu suất của MPC hoạt động vùng tần số GHz đề xuất với các MPC hoạt động vùng tần số GHz công bố gần đây

Tài liệu	BW (GHz)	RBW (%)	Độ dày	Kích thước ô đơn vị	Chỉ số trọng lượng
[146]	7 – 19,5	94,3	$0,15\lambda_c$	$0,40\lambda_c$	5,2
[156]	8,45 – 24,96	98,9	$0,17\lambda_c$	$0,36\lambda_c$	4,8
[157]	14,3 – 43,2	100,5	$0,15\lambda_c$	$0,60\lambda_c$	11,7
[158]	6,67 – 17,1	87,8	$0,14\lambda_c$	$0,48\lambda_c$	7,0
[159]	8,85 – 18,85	72,2	$0,12\lambda_c$	$0,32\lambda_c$	2,7
[160]	490 – 1880	117,3	$0,18\lambda_c$	$0,4\lambda_c$	6,3
Thiết kế đề xuất	2 – 8,45	123,4	$0,03\lambda_c$	$0,39\lambda_c$	1,0

Ngoài ra, để đánh giá đặc tính trọng lượng nhẹ của các thiết kế bộ chuyển đổi, chúng tôi đưa ra hệ số trọng lượng (w) tỷ lệ thuận với độ dày khe hở không khí (t_{solid}) và chu kì của ô đơn vị (P) theo biểu thức: $w = t_{solid} P^2 / f_c^2$ (trong đó $f_c = (f_U - f_L)/2$ là tần số trung tâm của băng tần hoạt động). Đối với vật liệu rắn, chúng tôi chỉ xem xét

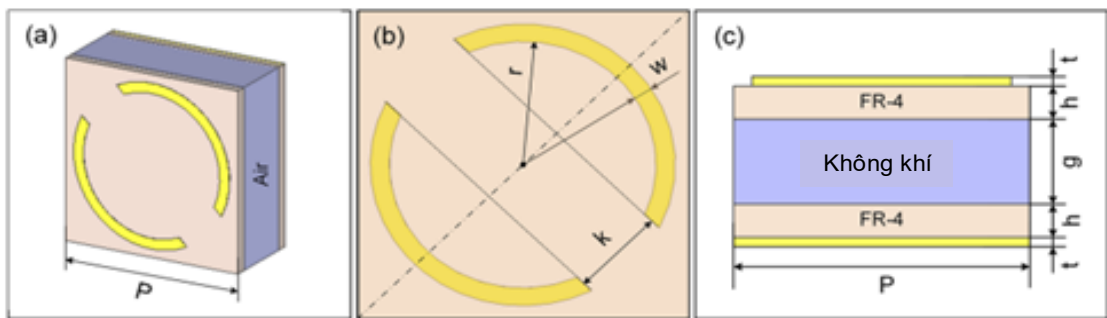
độ dày của chất nền vì lớp kim loại rất mỏng so với lớp chất nền. Hệ số trọng lượng của thiết kế đề xuất được xác định theo tiêu chuẩn là 1, do đó, giá trị của hệ số trọng lượng dưới hoặc trên 1 sẽ cho biết thiết kế tương ứng nhẹ hơn hoặc nặng hơn bao nhiêu so với MPC được đề xuất. Như đã thể hiện trong Bảng 3.5, MPC được đề xuất hoạt động trong dải tần số thấp nhất với băng thông rộng nhất và có thiết kế nhẹ nhất trong tất cả các bộ chuyển đổi so sánh.

3.2.2. Thiết kế cấu trúc MPC cho ứng dụng băng tần C, X và Ku

3.2.2.1. Thiết kế cấu trúc

Dựa trên cấu trúc của MPC đã đề xuất cho các ứng dụng băng tần S, C chúng tôi đã nghiên cứu và đề xuất cấu trúc MPC cho ứng dụng băng C, băng X (8 GHz – 12GHz) và băng Ku (12 GHz – 18 GHz) (Hình 3.19) [161].

Ô đơn vị của cấu trúc được thể hiện trên Hình 3.19(a) bao gồm hai lớp nền FR-4, đặt giữa là khe hở không khí. Một mẫu bộ cộng hưởng hai vòng cung đối diện nhau làm từ kim loại đồng được khắc trên đế điện môi FR-4 như thể hiện trên Hình 3.20(b), một lớp kim loại đồng liên tục đóng vai trò là mặt phẳng nối đất để đảm bảo hầu hết các sóng tới được phản xạ trở lại thể hiện như trên Hình 3.20(c). Lớp trên cùng và dưới cùng có độ dẫn điện là $5,96 \times 10^7$ S/m và độ dày $t = 0,035$ mm. Chất nền điện môi có hằng số điện môi tương đối là 4,3, hệ số tổn thất là 0,025 và độ dày $h = 0,8$ mm. Để có được chuyển đổi phân cực trong băng tần rộng ở dải tần số thấp, chẳng hạn như băng C, các tham số hình học được tối ưu hóa của MPC dựa trên phương pháp mô phỏng. Sau khi khảo sát, các kích thước tối ưu là $P = 14$ mm, $g = 5$ mm, $w = 0,8$ mm, $k = 4$ mm và $r = 5,55$ mm.



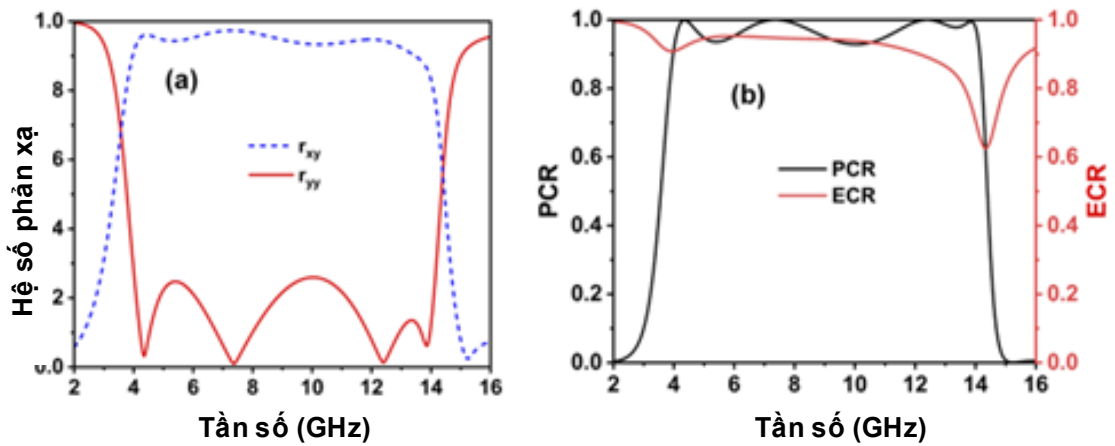
Hình 3.20. Sơ đồ của MPC được đề xuất: (a) hình 3D, (b) mặt trước và (c) mặt cắt ngang của ô đơn vị

3.2.2.2. Khảo sát tính chất chuyển đổi phân cực sóng điện từ

Hình 3.21(a) là kết quả mô phỏng thu được đối với hệ số phản xạ đồng phân cực r_{yy} , hệ số phản xạ vuông góc r_{xy} và Hình 3.21(b) là hiệu suất chuyển đổi phân cực trong dải tần từ 2,0 đến 16 GHz của MPC đề xuất.

Như được mô tả trong Hình 3.21(a), trong dải tần số từ 4 – 14 GHz, hệ số phản

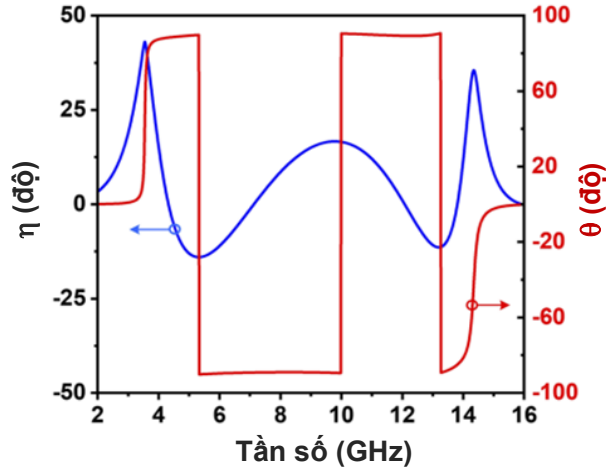
xạ vuông góc có giá trị xấp xỉ gần bằng 1 và tại 4 đỉnh cộng hưởng 4,35 GHz, 7,42 GHz, 12,39 GHz và 13,87 GHz, biên độ của các hệ số phản xạ lần lượt là 0,96, 0,98, 0,95 và 0,9. Trong khi đó biên độ của các hệ số đồng phân cực lần lượt là 0,02, 0,005, 0,008, 0,07. Bên cạnh đó, thành phần phản xạ đồng phân cực r_{yy} nhỏ hơn 0,25 và thành phần phản xạ vuông góc r_{xy} lớn hơn 0,8 trong dải tần từ 4,0 đến 14 GHz. Điều đó chứng tỏ rằng sóng phân cực y đã được chuyển đổi thành sóng phân cực x với hiệu suất chuyển đổi cao trong dải tần số từ 4,0 – 14 GHz bao phủ toàn bộ băng tần C, X và một phần của băng tần Ku.



Hình 3.21. (a) Biên độ mô phỏng của các hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực vuông góc dưới sóng tới phân cực y . (b) phổ PCR và ECR của MPC đề xuất

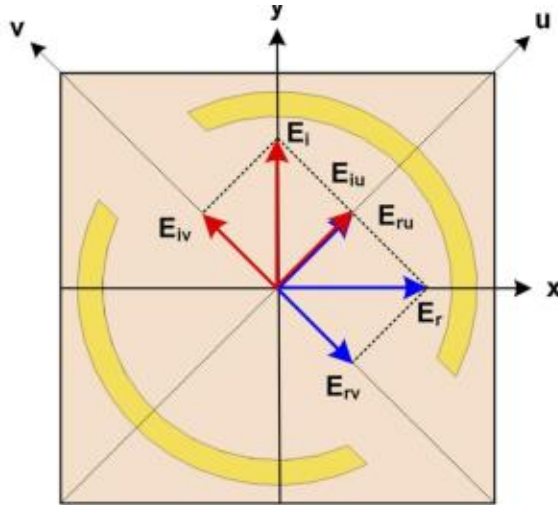
Bộ chuyển đổi phân cực được đề xuất đạt hiệu suất chuyển đổi phân cực trên 93% trong dải tần từ 4,0 đến 14 GHz như thể hiện trên Hình 3.21(b). Tỷ số băng thông RBW có thể đạt tới 111,1%, điều này chứng tỏ MPC đề xuất là siêu băng rộng. Hơn nữa, có thể quan sát thấy tại bốn tần số cộng hưởng 4,35, 7,42, 12,39 và 13,87 GHz, hiệu suất chuyển đổi phân cực đạt 100%. Điều đó chứng tỏ rằng, MPC đề xuất đạt được băng tần siêu rộng nhờ vào sự kết hợp của các cộng hưởng này. Ngoài ra, tỉ lệ chuyển đổi năng lượng ECR đạt được ở mức 90% trong dải tần hoạt động, chứng tỏ rằng năng lượng điện từ của sóng tới phân cực y gần như được chuyển hoàn toàn thành sóng phản xạ phân cực x . Tại đây, một phần năng lượng bị mất đi do sự phân tán sóng của chất nền điện môi.

Khảo sát góc elip (η) và góc phương vị phân cực (θ) cho sóng tới phân cực y có thể được tính từ các hệ số phản xạ. Kết quả tính toán θ và η được hiển thị trong Hình 3.22 cho thấy độ elip của sóng tới phân cực y là dưới 15° trong dải tần từ 4,0 đến 14 GHz và góc phương vị phân cực giữ gần 90° hoặc -90° trong dải tần hoạt động. Điều đó xác nhận rằng MPC được đề xuất với góc quay phân cực 90° trong băng tần rộng 4,0 – 14 GHz.



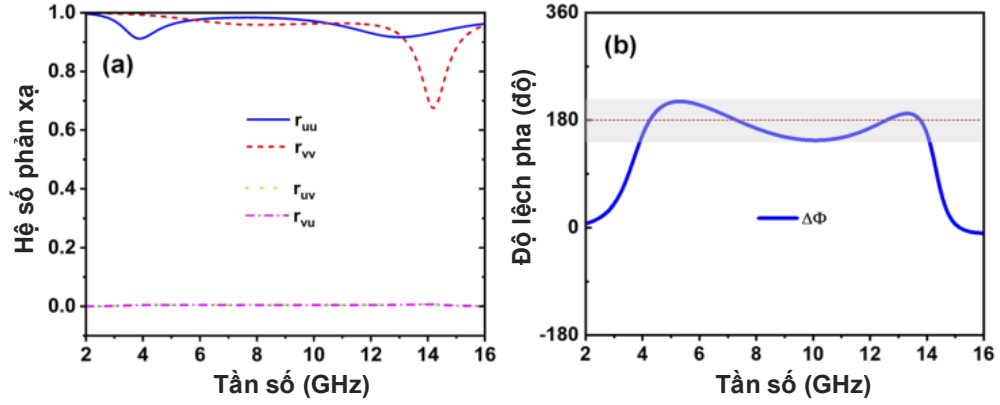
Hình 3.22. Góc elip (η) và góc phương vị phân cực (θ) đối với sóng tới phân cực y

Nguyên lý hoạt động của bộ chuyển đổi đề xuất được minh họa trong Hình 3.23. Sóng điện từ tới phân cực y được phân tách thành hai thành phần E_i và E_r . Để đạt được sóng phân cực tuyến tính, điện trường tổng hợp của E_{ru} và E_{rv} sẽ dọc theo trục x như minh họa trong Hình 3.23, với các điều kiện như: $r_{uu} = r_{vv} \approx 1$, $r_{uv} = r_{vu} \approx 0$ và $\Delta\phi = \phi_{uu} - \phi_{vv} = 180 \pm 2n\pi$ (n là số nguyên).



Hình 3.23. Sơ đồ phân tách điện trường theo hướng trục u và v

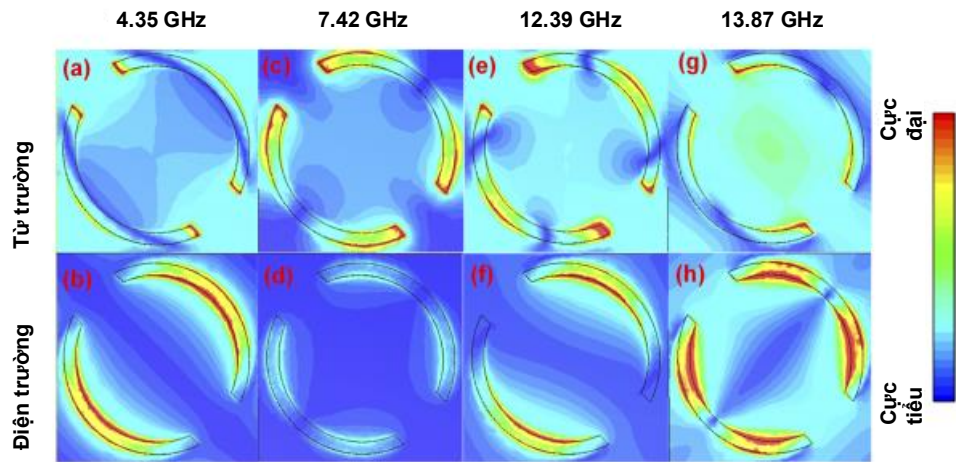
Theo nguyên lý phân tích như trên Hình 3.23, tiến hành mô phỏng cho sóng điện từ tới dọc theo phân cực u và v , kết quả biên độ và pha phản xạ của chúng được thể hiện như trên Hình 3.24. Kết quả trên Hình 3.24(a) cho thấy độ khuếch đại của các hệ số phản xạ đồng phân cực và phản xạ vuông góc lần lượt gần bằng 1 và 0. Ngoài ra, độ lệch pha ($\Delta\phi$), giữa các trường phản xạ dọc theo hướng phân cực u và v , tiến gần đến 180° từ 4,0 đến 14 GHz, như thể hiện trên Hình 3.24(b).



Hình 3.24. Kết quả mô phỏng: (a) biên độ của các hệ số phản xạ và (b) độ lệch pha của các hệ số phản xạ theo hướng trục u và v

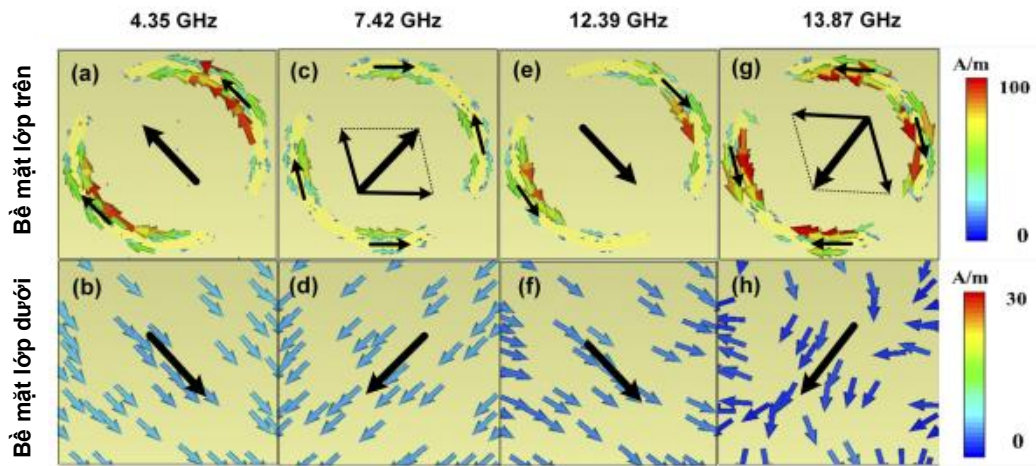
Những kết quả này đã chứng minh rằng hướng phân cực của sóng điện từ có thể xoay một góc 90° . Những kết quả này chứng minh rằng MPC được đề xuất có khả năng xoay hướng phân cực của sóng điện từ một góc 90° . Điều này có nghĩa là sóng điện từ tới phân cực y được phản xạ thành sóng phân cực x và sóng phản xạ được quay pha một góc 90° so với sóng tới.

Để hiểu rõ hơn cơ chế vật lý của MPC được đề xuất, sự phân bố của điện trường, từ trường và dòng điện trên bề mặt lớp cộng hưởng kim loại tại bốn tần số cộng hưởng 4,35 GHz, 7,42 GHz, 12,39 GHz và 13,87 GHz được nghiên cứu. Kết quả thể hiện ở Hình 3.25 cho thấy ở một tần số xác định, điện trường và từ trường được tích lũy trong một phần cụ thể của cấu trúc MPC. Điện trường được hình thành ở rìa của các khoảng trống của bộ cộng hưởng kim loại, trong khi từ trường chủ yếu tập trung vào tâm của lớp kim loại.



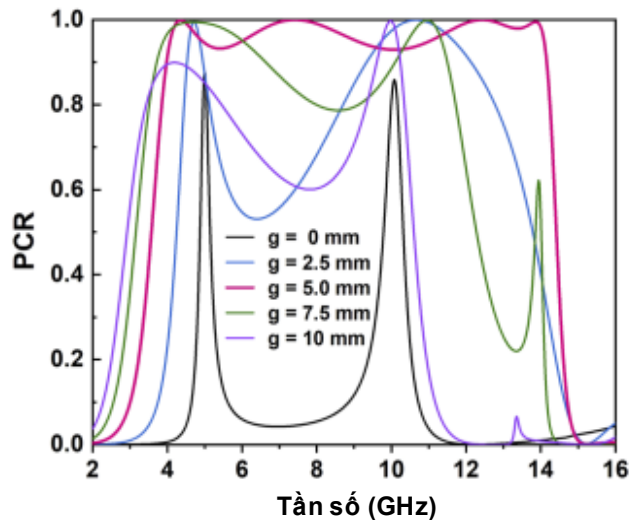
Hình 3.25. Kết quả mô phỏng cho (a), (c), (e), và (g) điện trường và (b), (d), (f), và (h) từ trường của bộ chuyển đổi được đề xuất ở các tần số cộng hưởng lần lượt là 4,35, 7,42, 12,39 và 13,87 GHz

Theo kết quả thể hiện trên Hình 3.26, tại các tần số cộng hưởng thấp hơn là 4,35 GHz và 7,42 GHz, dòng điện trên bề mặt của lớp cộng hưởng phía trên song song và ngược chiều với dòng điện trên bề mặt của lớp kim loại dưới cùng, điều đó cho thấy rằng các tần số cộng hưởng này bắt nguồn từ cộng hưởng từ. Ngược lại, tại các tần số cộng hưởng cao hơn là 12,39 GHz và 13,87 GHz được hình thành do cộng hưởng điện. Điều đáng chú ý là cộng hưởng từ và điện trên chịu trách nhiệm chính cho việc mở rộng băng thông của phân cực chéo. Do có nhiều điểm cộng hưởng, cấu trúc của chúng tôi đề xuất có hiệu suất chuyển đổi cao trong một dải băng tần rộng bằng cách tối ưu hóa hợp lý các tham số hình học của nó.



Hình 3.26. Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt lớp trên (a), (c), (e), và (g) lớp trên cùng và (b), (d), (f), và (h) lớp dưới cùng của MPC được đề xuất ở các tần số cộng hưởng lần lượt là 4,35, 7,42, 12,39 và 13,87 GHz

Ngoài ra, ảnh hưởng của độ dày khe hở không khí đến đặc tính băng thông rộng của MPC cũng được chúng tôi nghiên cứu trong cấu trúc đề xuất này.

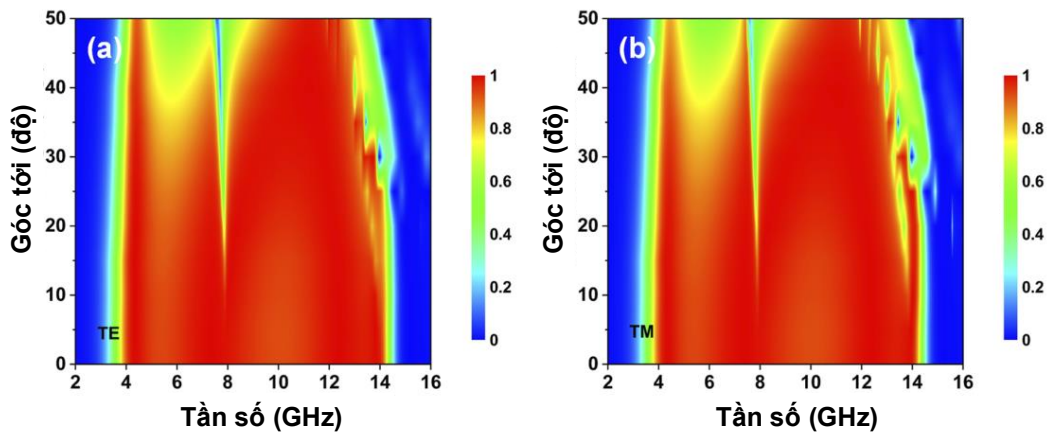


Hình 3.27. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của độ dày khe hở không khí đến hiệu suất chuyển đổi phân cực của MPC được đề xuất

Như được hiển thị trong Hình 3.27, MPC không có khe hở không khí thể hiện hai đỉnh cộng hưởng với băng thông hẹp và cường độ thấp trong dải tần từ 2 đến 16 GHz. Bằng cách thêm khoảng cách không khí, các đỉnh này được cải thiện đáng kể về cả cường độ và băng thông. Ngoài ra, với việc tăng độ dày của khe hở không khí từ 0 lên 5 mm, các đỉnh cộng hưởng khác được hình thành và kết hợp với nhau để tạo ra phổ hiệu suất chuyển đổi phân cực băng rộng. Tuy nhiên, với việc tăng thêm độ dày khe hở không khí trên 5 mm, cộng hưởng cao hơn sẽ giảm và do đó, băng thông hiệu suất chuyển đổi phân cực của MPC được đề xuất bị thu hẹp như trong Hình 3.26. Do đó, độ dày của khe hở không khí được tối ưu hóa ở mức 5 mm để đạt được hiệu suất chuyển đổi phân cực tốt nhất.

3.2.2.3. Khảo sát ảnh hưởng của góc tới sóng điện từ đến đặc trưng chuyển đổi phân cực của MPC

Hình 3.28 chỉ ra ảnh hưởng của góc tới đối với hiệu suất của MPC được đề xuất. Khi góc tới thay đổi từ 0° đến 50° , hiệu suất chuyển đổi phân cực vẫn duy trì trên 90% trong khoảng góc tới từ 0° đến 10° và giữ được trên 80% khi góc tới nhỏ hơn 30° . Tuy nhiên, có một sự giảm rõ rệt ở khoảng 7,8 GHz đối với cả hai chế độ TE và TM, điều này được giải thích là do sự hấp thụ mạnh tại tần số này. Dù có sự giảm sút tại tần số này, thiết kế của MPC vẫn duy trì hiệu suất chuyển đổi cao trong các dải tần từ 4,0 đến 7,8 GHz và từ 8,0 đến 14 GHz. Điều này cho thấy MPC đề xuất không quá nhạy cảm với sự thay đổi góc tới, điều này là rất hữu ích cho các ứng dụng kỹ thuật thực tế, nơi mà các sóng tới có thể đến với các góc khác nhau.



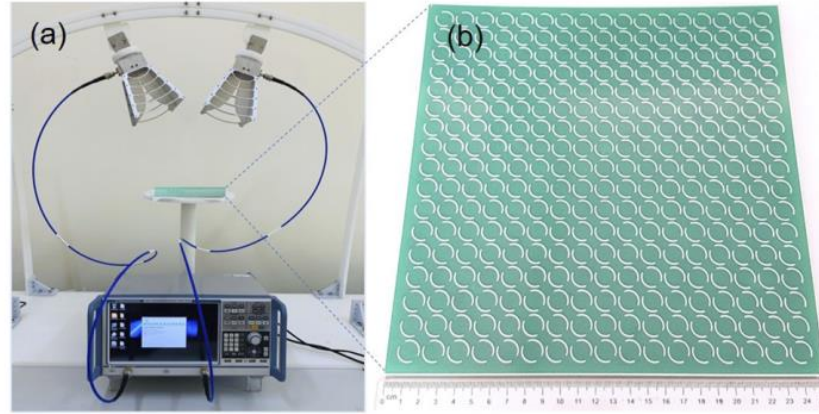
Hình 3.28. Phổ PCR mô phỏng của MPC đề xuất đối với các góc tới khác nhau cho phân cực (a) TE và (b) TM

3.2.2.4. Chế tạo và đo đặc trưng của mẫu MPC

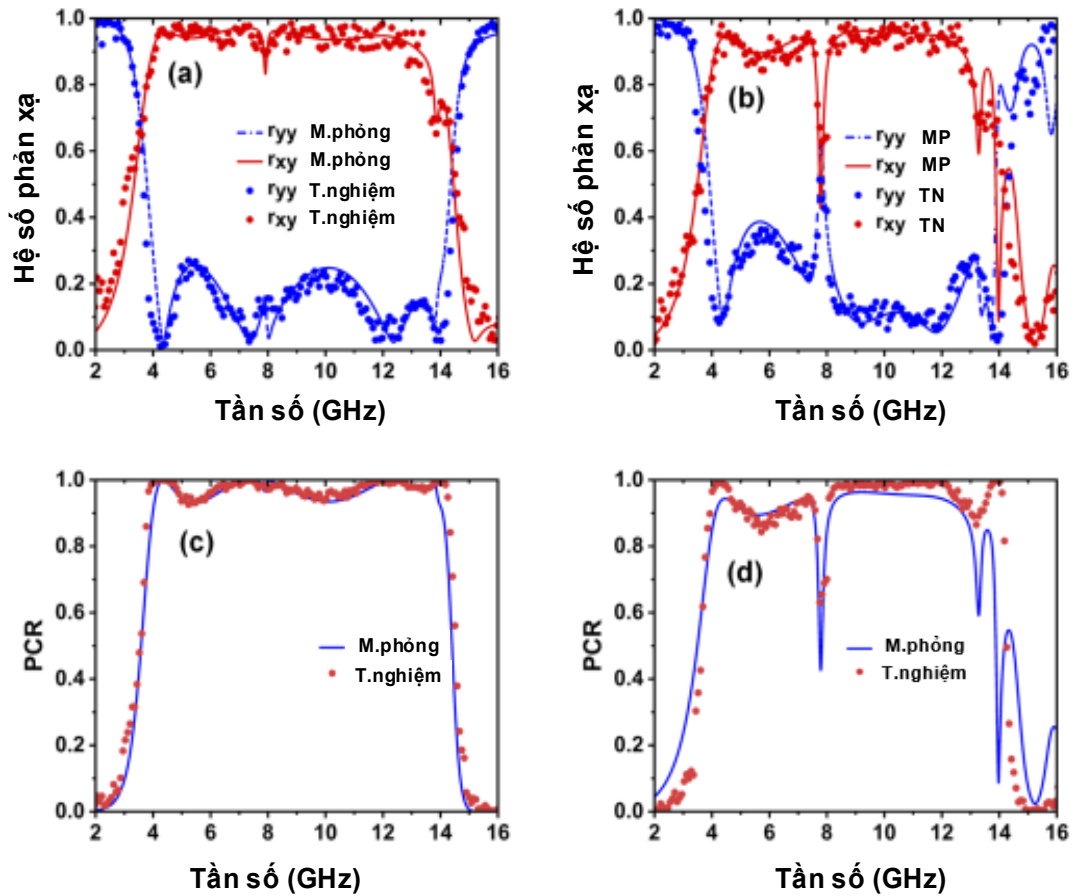
Bên cạnh đó, chúng tôi tiến hành chế tạo mẫu MPC hoạt động băng tần C, X và K_u với các tham số ô đơn vị là $P = 14$ mm, $g = 5$ mm, $w = 0,8$ mm, $k = 4$ mm và $r = 5,55$ mm. Vật liệu ban đầu dùng để chế tạo là các tấm mạch in PCB đã được phủ kim loại đồng (Cu) có kích thước 25×25 cm. Tấm PCB bao gồm hai lớp kim loại Cu

được ngăn cách bởi một lớp điện môi có hằng số điện môi $\varepsilon = 4,3$ và độ dày 0,8 mm, hai lớp kim loại đồng có độ dày là 0,036 mm.

Quá trình chế tạo mẫu vật liệu được tiến hành bằng phương pháp quang khắc. Sau khi chế tạo, mẫu MPC được đo đạc và khảo sát các đặc trưng điện từ bằng máy phân tích mạng Rohde và Schwarz ZNB20 với dải tần quan sát từ 1 đến 16 GHz. Hình 3.29 là hình ảnh thiết lập phép đo cho mẫu MPC sau khi chế tạo.



Hình 3.29. Thiết lập phép đo cho mẫu MPC sau khi được chế tạo



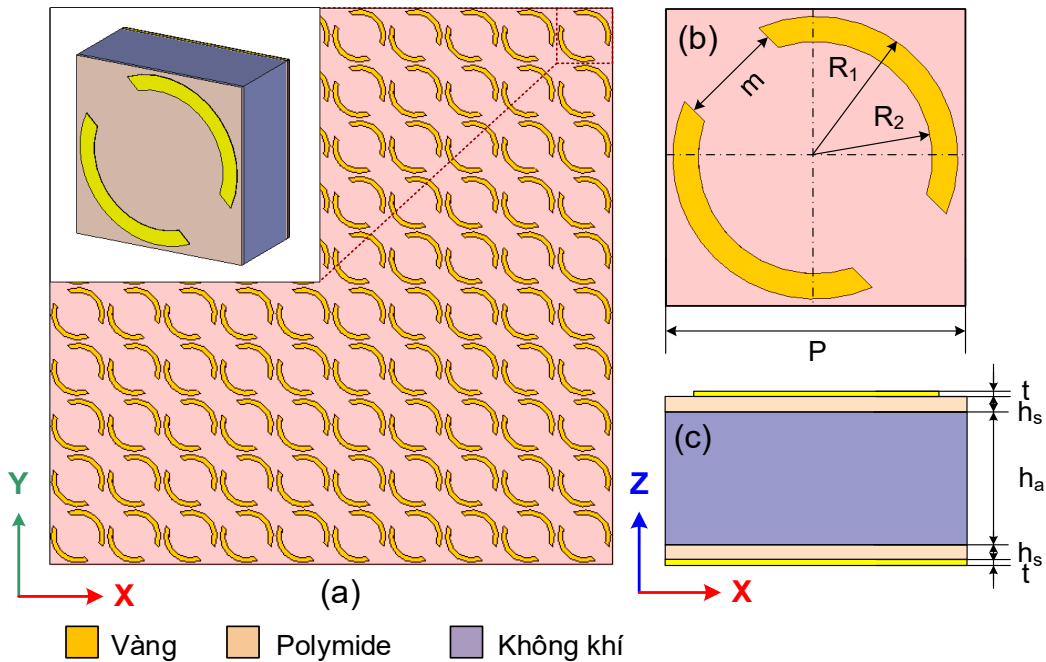
Hình 3.30. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm của các hệ số phản xạ và hiệu suất chuyển đổi phân cực của chúng đối với góc tới (a) và (c) 10° và 30° (b) và (d)

Hình 3.30 hiển thị kết quả so sánh các hệ số chuyển đổi đồng phân cực r_{yy} , hệ số chuyển đổi phân cực vuông góc r_{xy} và hiệu suất chuyển đổi phân cực thu được từ thực nghiệm với các kết quả mô phỏng tương ứng với góc tới của sóng điện từ 10° , 30° . Như thể hiện trong Hình 3.30(a) và (b), cường độ đo được của các hệ số phản xạ đồng phân cực, hệ số phản xạ vuông góc và hiệu suất chuyển đổi của mẫu thực nghiệm phù hợp tốt với mô phỏng. Phép đo và kết quả so sánh một lần nữa chứng minh rằng cấu trúc đề xuất là một MPC tuyến tính hiệu quả cao trong dải tần rộng từ 4 - 14 GHz (bao phủ toàn bộ băng tần C, X và một phần băng Ku) và các kết quả nghiên cứu bằng phương pháp mô phỏng là đáng tin cậy.

3.2.3. Thiết kế cấu trúc MPC hoạt động vùng tần số THz

3.2.3.1. Thiết kế cấu trúc

Trong nghiên cứu này, từ cấu trúc MPC đã được thiết kế hoạt động trong vùng tần số GHz cho các ứng dụng băng tần C, X, Ku đã được báo cáo trong mục 3.2.2, chúng tôi đã cải tiến cấu trúc đề xuất thành một cấu trúc mới hoạt động vùng tần số THz nhằm mở rộng khả năng ứng dụng của vật liệu và đáp ứng các yêu cầu hoạt động trong vùng tần số THz. Quá trình cải tiến bao gồm hai bước chính: (1) Thay đổi vật liệu cấu thành để đảm bảo các tính chất điện từ phù hợp với dải tần số THz, cụ thể: lớp kim loại đồng được thay bởi kim loại vàng, lớp điện môi FR4 được thay bởi lớp điện môi polymide. (2) Tối ưu hóa kích thước cấu trúc nhằm duy trì hiệu suất hoạt động trong vùng THz. Cấu trúc MPC sau khi cải tiến hoạt động vùng tần số THz được thể hiện như trên Hình 3.31.



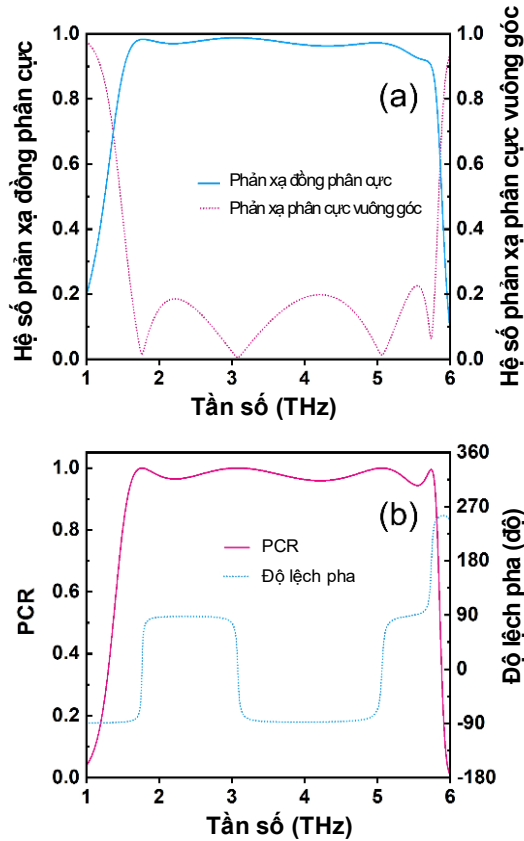
Hình 3.31. Hình ảnh cấu trúc ô cơ sở của MPC hoạt động vùng tần số THz (a) 3D, (b) mặt trên và (c) mặt bên

Các thông số của cấu trúc đã được tối ưu bằng phương pháp mô phỏng, với các giá trị sau: $P = 40 \mu m$, $R = 19 \mu m$, $r = 15,6 \mu m$, $t = 0,2 \mu m$, $h_s = 0,8 \mu m$, $h_a = 18,2 \mu m$, $m = 14 \mu m$.

3.2.3.2. Khảo sát tính chất chuyển đổi phân cực sóng điện từ

Hình 3.32 là kết quả mô phỏng của hệ số phản xạ đồng phân cực, hệ số phản xạ vuông góc, độ lệch pha giữa chúng và hiệu suất của quá trình chuyển đổi.

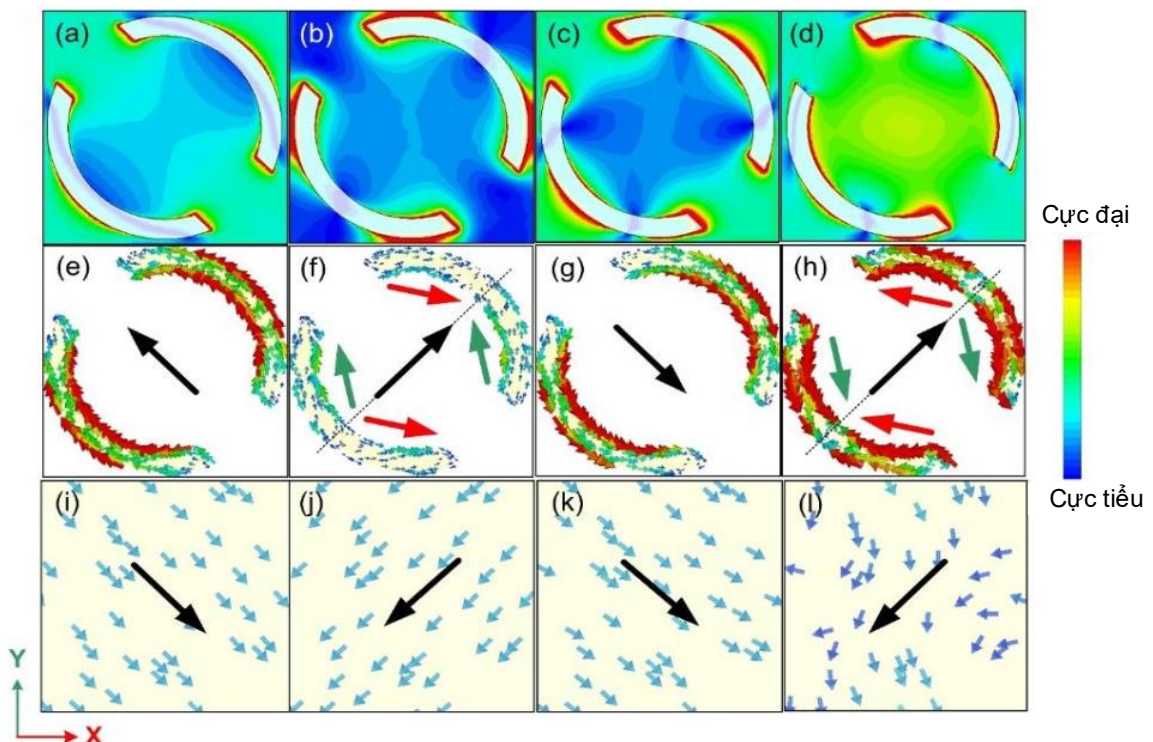
Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng tại bốn tần số cộng hưởng 1,74 THz, 3,13 THz, 5,1 THz và 5,7 THz, biên độ của các hệ số phản xạ đồng phân cực là 0,014, 0,005, 0,012, và 0,052 và biên độ của các hệ số phản xạ vuông góc là 0,982, 0,987, 0,969, và 0,914. Ngoài ra hệ số phản xạ vuông góc lớn hơn 0,9 và hệ số phản xạ đồng phân cực bé hơn 0,203 trong dải tần từ 1,6 THz đến 5,8 THz. Kết quả thể hiện trên Hình 3.32 (b) cho thấy hiệu suất chuyển đổi phân cực đạt gần 100% tại các tần số cộng hưởng và lớn hơn 93% trong dải tần từ 1,6 THz đến 5,8 THz với tỉ số băng thông RBW là 113,5%. Độ lệch pha giữa hệ số phản xạ vuông góc và phản xạ đồng phân cực được minh họa trong Hình 3.32(b), có giá trị là $\pm 90^\circ$ trong toàn bộ dải tần hoạt động. Kết quả này cho thấy rằng MPC đề xuất có thể hoạt động như một MPC tuyến tính băng rộng hiệu quả trong vùng tần số THz, với hiệu suất cao và khả năng duy trì đặc tính chuyển đổi phân cực ổn định trong dải tần rộng.



Hình 3.32. Kết quả mô phỏng (a) Biên độ của hệ số phản xạ đồng phân cực và phản xạ vuông góc (b) Hiệu suất chuyển đổi và độ lệch pha của các hệ số phản xạ

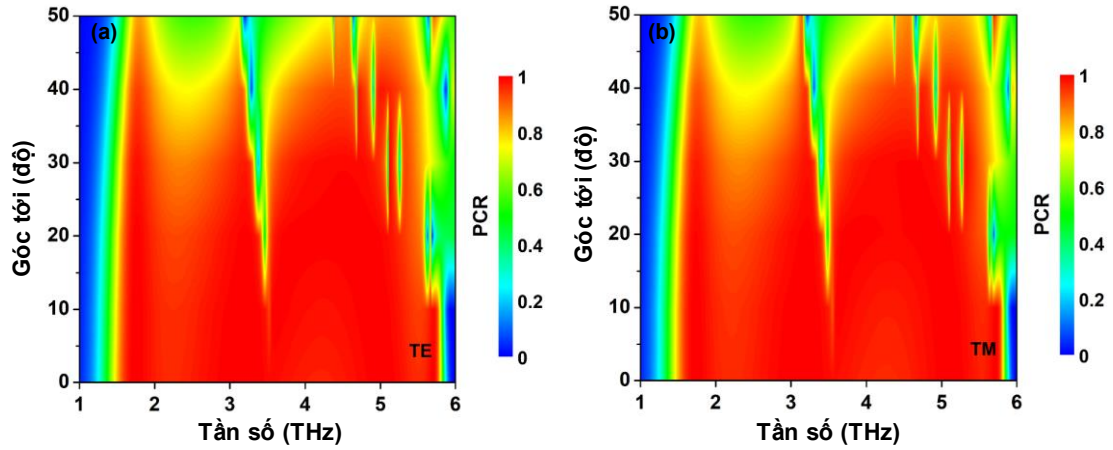
Để làm rõ cơ chế vật lý của bộ chuyển đổi được đề xuất, sự phân bố điện trường và dòng điện trên bề mặt lớp cộng hưởng và lớp dưới cùng được chúng tôi nghiên cứu. Từ kết quả thể hiện trên Hình 3.33 (a), (b), (c), (d) cho thấy rằng ở một tần số xác định, điện trường được tích lũy ở một số vùng cụ thể của cấu trúc. Điện trường được hình thành tập trung ở rìa và mặt ngoài của bộ cộng hưởng kim loại.

Ngoài ra, chúng tôi cũng tiến hành khảo sát phân bố dòng điện bề mặt tại bốn tần số cộng hưởng. Như thể hiện trên hình 3.33(e), (i), (f), (j) và hình 3.33(h), (l), dòng điện phân bố trên bề mặt của lớp trên cùng song song và ngược chiều với phân bố dòng điện ở lớp dưới. Điều này chứng tỏ rằng các tần số cộng hưởng này được tạo bởi hiện tượng cộng hưởng từ [73, 162]. Ngược lại tại tần số 5,1 THz, dòng điện phân bố trên bề mặt của lớp trên cùng song song và cùng chiều với phân bố dòng điện ở lớp dưới. Điều này chứng tỏ rằng các tần số cộng hưởng này được tạo bởi hiện tượng cộng hưởng điện [73, 162]. Những cộng hưởng này đóng vai trò quyết định trong việc đạt được hiệu suất chuyển đổi phân cực cao trong dải tần số rộng, vì chúng đảm bảo rằng các tần số cộng hưởng được tận dụng để tối ưu hóa quá trình chuyển đổi phân cực của sóng điện từ.



Hình 3.33. Kết quả mô phỏng phân bố điện trường và dòng điện tại các tần số cộng hưởng

Sự phụ thuộc của hiệu suất chuyển đổi phân cực vào sự thay đổi của góc tới được chúng tôi khảo sát và cho kết quả thể hiện trên Hình 3.43.



Hình 3.34. Hiệu suất mô phỏng của MPC ở chế độ (a) TE và (b) TM

Kết quả mô phỏng cho thấy, hiệu suất chuyển đổi phân cực được duy trì lớn hơn 93% khi góc tới thay đổi từ 0° đến 10° trên toàn dải tần từ 1,6 THz đến 5,8 THz. Ngoài ra hiệu suất chuyển đổi phân cực vẫn duy trì lớn hơn 80% khi góc tới nhỏ hơn 30° . Một điểm đáng chú ý là hiệu suất chuyển đổi phân cực giảm mạnh tại tần số 3,5 THz đối với cả chế độ TE và TM, điều này được cho là có sự hấp thụ mạnh ở tần số đó. Tuy nhiên thiết kế của chúng tôi vẫn có hiệu suất chuyển đổi phân cực cao (lớn hơn 80%) khi góc tới thay đổi từ 0° đến 30° ở các dải tần 1,6 THz đến 3,3 THz và 3,5 THz đến 4,7 THz.

3.3. Kết luận chương 3

Trong chương 3, luận án đã trình bày thiết kế một MA tích hợp vật liệu chuyển pha VO₂ hoạt động vùng tần số THz với cấu trúc đơn giản. MA đề xuất có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và phản xạ tương ứng với khi VO₂ ở pha kim loại và khi VO₂ ở pha điện môi. Khi VO₂ ở pha điện môi, MA thực hiện phản xạ sóng điện từ. Khi VO₂ ở pha kim loại, MA thực hiện hấp thụ sóng điện từ với độ hấp thụ đạt trên 90% trong băng thông rộng từ 1,29 - 3,26 THz. Ngoài ra, độ hấp thụ của MA có thể thay đổi được bằng cách thay đổi độ dẫn của VO₂.

Tiếp theo, luận án đề xuất thiết kế các MPC cho những ứng dụng hoạt động trong các dải băng tần S, C, X, Ku và THz. Với thiết kế lớp điện môi được điều chỉnh thành cấu trúc rỗng từ đó giúp các cấu trúc đề xuất có trọng lượng nhẹ và băng thông hoạt động rộng. Các cấu trúc MPC đề xuất được tối ưu hóa các thông số nhằm đạt mục tiêu đề ra thông qua phương pháp mô phỏng. Cụ thể, cấu trúc MPC hoạt động ở băng tần S, C có hiệu suất chuyển đổi phân cực trên 90% trong dải tần từ 2 – 8,45 GHz, độ rộng băng thông tương đối đạt 123,4%; cấu trúc MPC hoạt động băng tần C, X, Ku có hiệu suất chuyển đổi trên 93% trong dải tần từ 4,0 đến 14 GHz, tỉ số băng thông có thể đạt tới 111,1%; cấu trúc MPC hoạt động ở dải tần THz có hiệu suất chuyển đổi trên 93% trong dải tần từ 1,6 THz đến 5,8 THz với tỉ số băng thông là

113,5%. Ngoài ra, MPC hoạt động băng tần S, C và MPC hoạt động băng tần C, X, Ku được lựa chọn chế tạo thử nghiệm. Các đặc trưng điện từ của mẫu sau khi chế tạo được khảo sát, phân tích và so sánh với các kết quả mô phỏng. Kết quả cho thấy mẫu chế tạo tương đồng tốt với kết quả mô phỏng, chứng tỏ phương pháp nghiên cứu bằng mô phỏng hoàn toàn đáng tin cậy. Các kết quả nghiên cứu trong Chương 3 là tiền đề để NCS thực hiện nghiên cứu MMF hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ và được NCS báo cáo trong Chương 4 của luận án. Các kết quả báo cáo trong Chương 3 được đăng tải ở 02 bài báo trên tạp chí SCIE, 02 bài báo đăng tải trên tạp chí trong nước trong danh mục được tính điểm của HĐGSNN. Cụ thể là các công trình 1, 2, 4, 5 trong Danh mục các công trình công bố của luận án.

CHƯƠNG 4. THIẾT KẾ VÀ TỐI ƯU CẤU TRÚC VẬT LIỆU BIẾN HOÁ ĐA CHỨC NĂNG HẤP THỤ VÀ CHUYỂN ĐỔI PHÂN CỰC SÓNG ĐIỆN TỪ

Trong Chương 3, cấu trúc MA tích hợp VO₂ cấu trúc vòng cộng hưởng đĩa tròn khoét lỗ hình vuông và các cấu trúc MPC dựa trên vòng cộng hưởng có rãnh đã được nghiên cứu. Việc tích hợp VO₂ đã cho thấy khả năng điều chỉnh tính chất điện từ của vật liệu, giúp cấu trúc có thể thay đổi giữa hai trạng thái hấp thụ mạnh và phản xạ cao. Đồng thời, các cấu trúc chuyển đổi phân cực đã chứng minh được hiệu suất cao trong việc kiểm soát phân cực của sóng tới thông qua thiết kế cộng hưởng phù hợp. Những kết quả này cung cấp tiền đề quan trọng để mở rộng nghiên cứu sang các vật liệu biến hóa đa chức năng, có khả năng kết hợp cả hai đặc tính: hấp thụ sóng điện từ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ. Cụ thể, trong chương này, luận án sẽ trình bày hai cấu trúc vật liệu biến hóa đa chức năng mới: cấu trúc vật liệu đa chức năng tích hợp nước, trong đó lớp cộng hưởng đảm nhiệm chức năng chuyển đổi phân cực được thiết kế dựa trên nguyên lý của cấu trúc chuyển đổi phân cực sử dụng vòng cộng hưởng có rãnh được biến đổi thành vòng vuông cộng hưởng có rãnh. Cấu trúc vật liệu đa chức năng tích hợp VO₂, được đề xuất dựa trên kết quả nghiên cứu về cấu trúc hấp thụ tích hợp VO₂ với lớp cộng hưởng dạng vòng. Cấu trúc này không chỉ giữ lại khả năng hấp thụ điện từ có thể điều chỉnh mà còn được thiết kế để tích hợp thêm chức năng chuyển đổi phân cực, tạo ra một cấu trúc linh hoạt có thể thích ứng trong nhiều điều kiện hoạt động khác nhau.

4.1. Thiết kế và tối ưu cấu trúc MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực hoạt động vùng tần số GHz

4.1.1. Thiết kế cấu trúc MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực tích hợp nước

Nước là vật liệu tồn tại rất nhiều trong tự nhiên, có khả năng hấp thụ mạnh trong dải tần số vi ba và là vật liệu lí tưởng cho việc hấp thụ hoàn hảo sóng vi ba băng tần rộng. Tính chất nước tinh khiết được định nghĩa bởi mô hình Debye như sau [163]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty}(T) + \frac{\varepsilon_s(T) - \varepsilon_{\infty}(T)}{1 - j\omega\tau(T)} \quad (4.1)$$

trong đó:

$\varepsilon_s(T)$ là hằng số điện môi tĩnh;

$\varepsilon_{\infty}(T)$ là hằng số điện môi quang học;

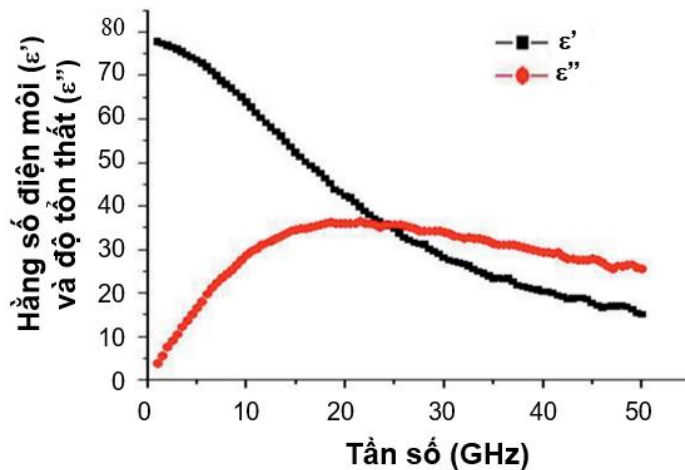
τ là hằng số thời gian phục hồi;

T là nhiệt độ của nước.

Ở nhiệt độ 25 °C, $\varepsilon_{\infty}(T) = 3,1$, $\varepsilon_s(T) = 78,4$ và thời gian giãn nở là $8,27 \times 10^{12}$ giây.

Trong dải tần số vi ba và băng tần rộng, tính chất hấp thụ của nước được đặc trưng bởi sự tương tác mạnh với sóng điện từ, dẫn đến sự hấp thụ mạnh trong những dải tần này. Mô hình Debye giúp giải thích tại sao nước có thể hấp thụ sóng vi ba một cách hiệu quả, đặc biệt là trong những ứng dụng liên quan đến hấp thụ sóng điện từ trong các băng tần rộng, chẳng hạn như trong các hệ thống truyền thông không dây hoặc ứng dụng radar.

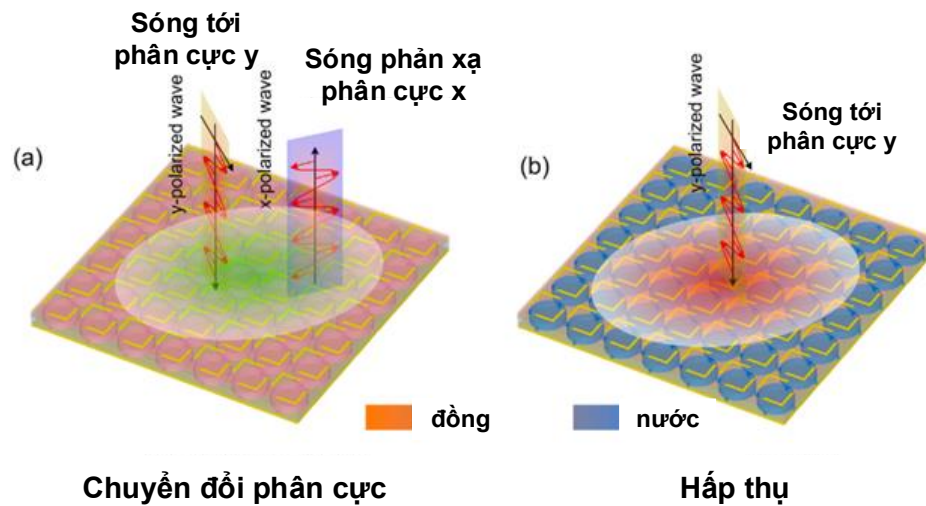
Sự thay đổi của hằng số điện môi (ε') và hệ số tổn hao (ε'') theo tần số ở nhiệt độ phòng 20 °C được biểu diễn trên Hình 4.1 [164]. Từ Hình 4.1 cho thấy trong dải tần 10 - 30 GHz, tổn hao của nước là lớn nhất và có thể hấp thụ mạnh sóng điện từ trong dải này.



Hình 4.1. Sự thay đổi của hằng số điện môi (ε') và hệ số tổn hao (ε'') theo tần số ở nhiệt độ phòng 20 °C

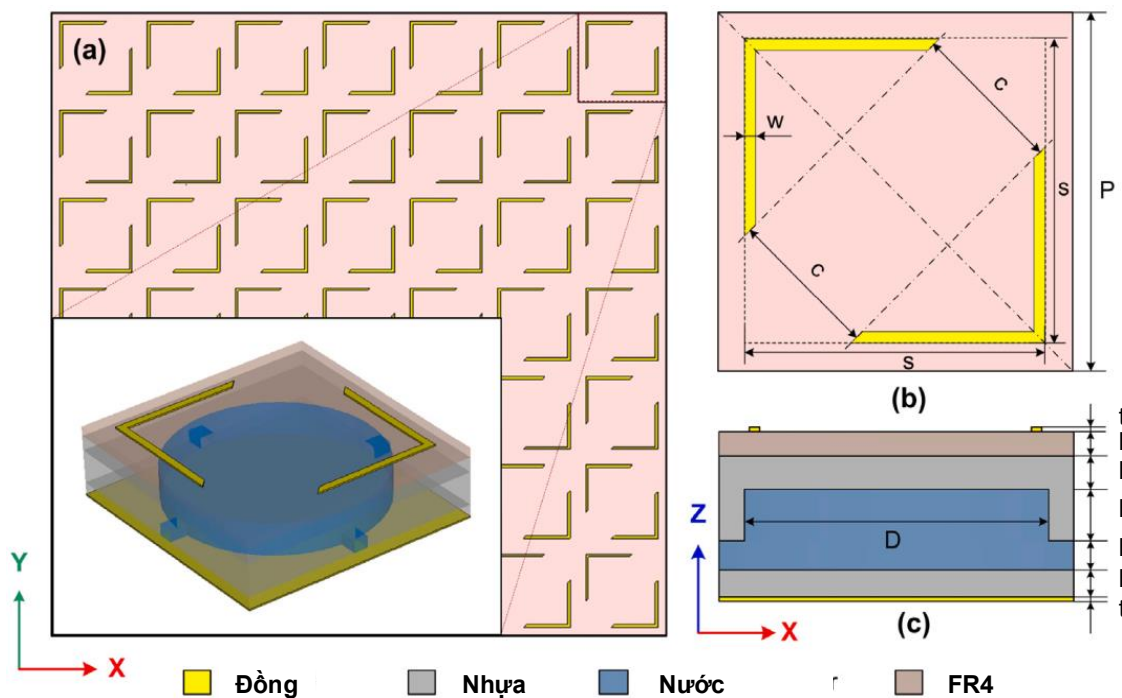
Để thiết kế MFM tích hợp hai chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động trên các dải tần khác nhau vùng tần số GHz, chúng tôi đề xuất cấu trúc MFM bằng cách tích hợp bộ cộng hưởng nước trong cấu trúc kim loại - điện môi - kim loại. Thông qua chuyển MFM từ trạng thái không tích hợp nước sang trạng thái tích hợp nước, MFM đề xuất có thể chuyển đổi chức năng của nó từ phân cực chéo sang chức năng hấp thụ với băng thông rộng và hiệu suất cao.

Hình 4.2 minh họa cấu trúc MFM khi hoạt động ở chế độ hấp thụ và khi hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực sóng điện từ.



Hình 4.2. Minh họa MMIs đa chức năng (a) chuyển đổi phân cực và (b) hấp thụ gần tuyệt đối bằng cách tích hợp nước tinh khiết

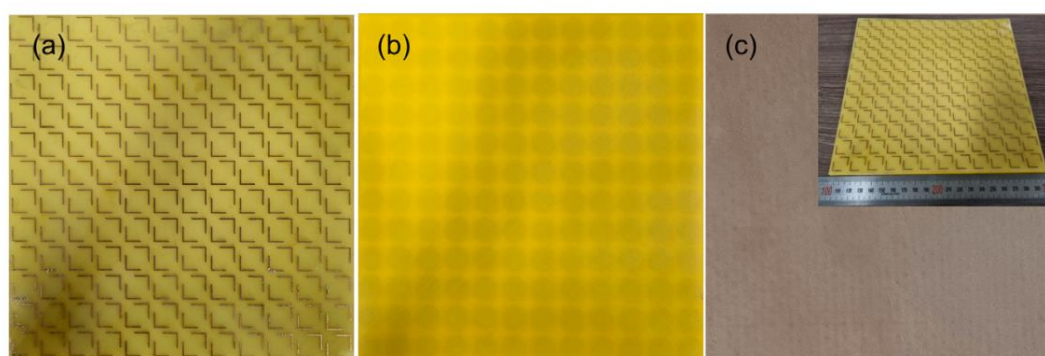
Hình 4.3. trình bày cấu trúc ô cơ sở của MFM tích hợp nước đề xuất hoạt động vùng tần số GHz.



Hình 4.3. Hình ảnh ô đơn vị của MFM đề xuất: (a) hình ảnh 3D, (b) hình ảnh nhìn từ trên xuống, (c) hình ảnh mặt cắt ngang của ô đơn vị

Cấu trúc được thiết kế theo mô hình kim loại - điện môi - nước - kim loại. Lớp trên cùng là hai vòng vuông kim loại đối xứng nhau qua đường chéo của ô cơ sở, đóng vai trò bộ cộng hưởng điện từ. Lớp giữa là điện môi FR-4 và một bình chứa nước, lớp dưới cùng là kim loại đóng vai trò là mặt phẳng đất. Chất điện môi FR-4 có hằng số điện môi là 4,3 và hệ số tổn thất là 0,025. Các lớp kim loại được làm bằng

đồng có độ dẫn điện là $4,56 \times 10^7$ S/m và độ dày là 0,035 mm. Bình chứa nước được làm bằng vật liệu nhựa Poly-lactic Acid (PLA) có hằng số điện môi là 2,6 và độ tổn thất là 0,03. Bằng cách thiết lập cấu trúc MFM ở trạng thái có nước, chức năng hấp thụ sóng điện từ của MFM có thể được kích hoạt. Phương pháp này tạo ra một cấu trúc linh hoạt có thể chuyển đổi giữa chế độ hấp thụ và chế độ chuyển đổi phân cực. Để kết nối các ô đơn vị và tạo điều kiện cho nước lưu thông, kênh nước hình vuông có kích thước 1 mm x 1mm được sử dụng. Kênh này đảm bảo cho việc phân phối nước đồng đều trong cấu trúc và giúp điều chỉnh các chức năng của MFM. Hình 4.4 là sản phẩm mẫu của MFM tích hợp nước đề xuất sau khi chế tạo bằng phương pháp quang khắc kết hợp phương pháp in 3D.



Hình 4.4. Ảnh chụp mẫu chế tạo: (a) nhìn từ trên xuống của lớp kim loại ở chế độ chuyển đổi phân cực, (b) nhìn từ trên xuống của bình chứa nước ở chế độ hấp thụ và (c) lớp đất và hình ảnh 3D của mẫu chế tạo.

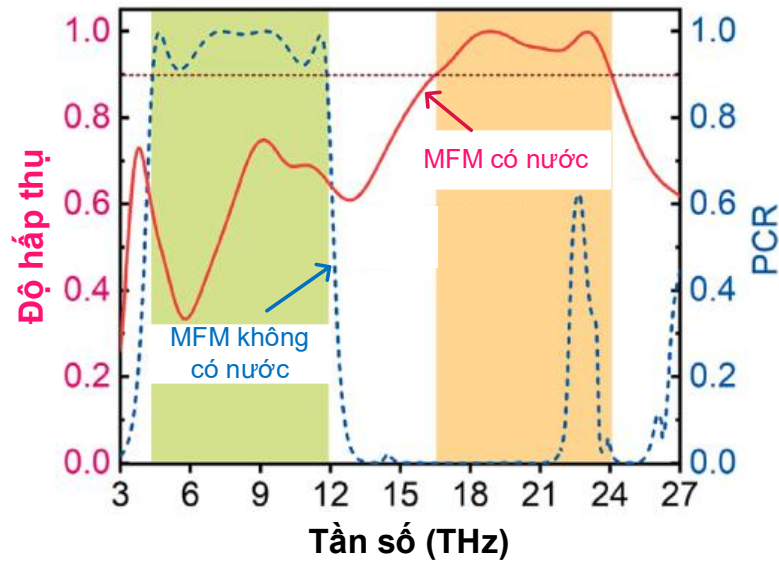
Trong nghiên cứu này, để tối ưu cấu trúc thiết kế, luận án sử dụng phần mềm CST Microwave Studio, các điều kiện biên ô đơn vị được gán cho trục x và trục y , điều kiện biên mở được gán cho trục z .

Bảng 4.1 là giá trị kích thước các tham số hình học của ô đơn vị đã được tối ưu hóa dựa trên các kết quả mô phỏng. Những tham số này bao gồm kích thước ô đơn vị, kích thước, độ dày của các lớp vật liệu, khoảng cách giữa các thành phần, chiều rộng của kênh nước, và các tham số quan trọng khác liên quan đến hiệu suất của MFM hoạt động trong dải tần GHz. Các tham số tối ưu này có thể được điều chỉnh để đạt được hiệu suất tốt nhất trong việc chuyển đổi phân cực và hấp thụ sóng điện từ.

Bảng 4.1. Kích thước tối ưu ô đơn vị của MFM đề xuất

Tham số	P	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	S	w	c	D
Giá trị (mm)	16,4	1	1	1,75	1,25	0,8	6,75	0,5	6,75	14

Kết quả mô phỏng trong Hình 4.5 cho thấy sự khác biệt rõ rệt về hiệu suất của MFM tùy thuộc vào trường hợp MFM có tích hợp nước hay không. Kết quả cho thấy, khi MFM không có nước, cấu trúc đề xuất thực hiện chức năng chuyển đổi phân cực chéo với hiệu suất chuyển đổi phân cực đạt trên 90% trong băng tần rộng từ 4,38 – 11,9 GHz và tỉ số băng thông RBW đạt tới 92,4%. Khi MFM được tích hợp nước, cấu trúc đề xuất thực hiện chức năng hấp thụ với độ hấp thụ cao hơn 90% trong vùng tần số 16,4 - 24 GHz, tỉ số băng thông RBW đạt 38%.



Hình 4.5. Hiệu suất hấp thụ (đường nét liền) và chuyển đổi phân cực (đường nét đứt) tương ứng với khi MFM có tích hợp nước và không tích hợp nước

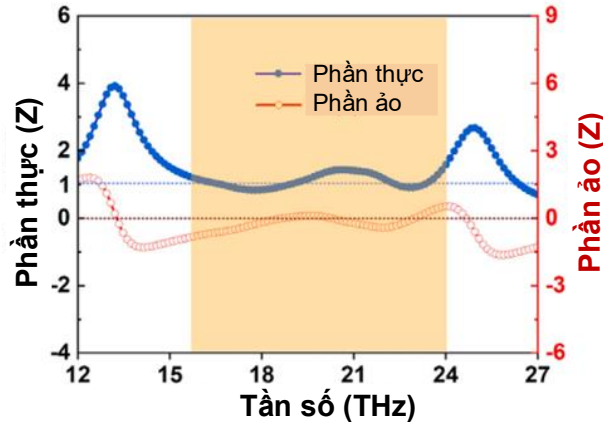
4.1.2. Khảo sát tính chất của MFM ở chế độ hấp thụ

Ở trạng thái MFM được tích hợp nước, điều kiện phối hợp trở kháng được đáp ứng và MFM hoạt động ở chế độ hấp thụ với phổ hấp thụ được thể hiện là đường nét đứt trên Hình 4.5. Có thể quan sát thấy, trong dải tần số từ 3 - 27 GHz có 4 đỉnh hấp thụ tại các tần số 3,8 GHz, 9 GHz, 18,82 GHz và 23,15 GHz tương ứng với độ hấp thụ lần lượt là 73%, 75%, 70%, 100% và 100%, trong dải tần số từ 16,5 – 24 GHz, MFM đạt hiệu suất hấp thụ trên 90%.

Để giải thích cơ chế hấp thụ của vật liệu, trở kháng hiệu dụng $Z(\omega)$ của MFM được tính toán dựa trên lý thuyết giao thoa môi trường hiệu dụng. Khi có sự phối hợp trở kháng tốt giữa môi trường truyền và trở kháng vào của vật liệu, hệ số phản xạ sẽ bằng 0, dẫn đến sự hấp thụ hoàn toàn của sóng điện từ mà không có sự phản xạ.

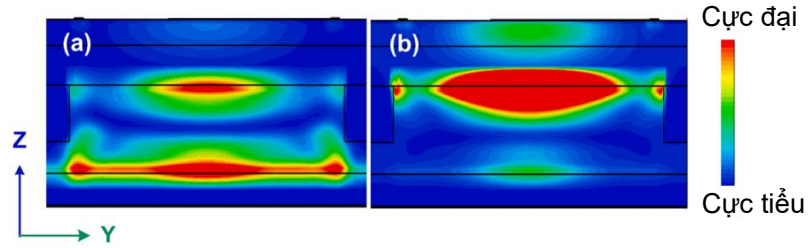
Kết quả tính toán cho trở kháng vào $Z(\omega)$ được thể hiện trên Hình 4.6 cho thấy trong dải tần từ 16,5 - 24 GHz, phần thực và phần ảo của $Z(\omega)$ có giá trị gần bằng 1

và 0 tương ứng. Điều này khẳng định rằng đã có sự phối hợp trở kháng tốt giữa cấu trúc MFM đề xuất và môi trường truyền trong băng tần rộng, dẫn đến sự hấp thụ trong băng tần rộng gần như hoàn hảo như đã thể hiện trên Hình 4.5.



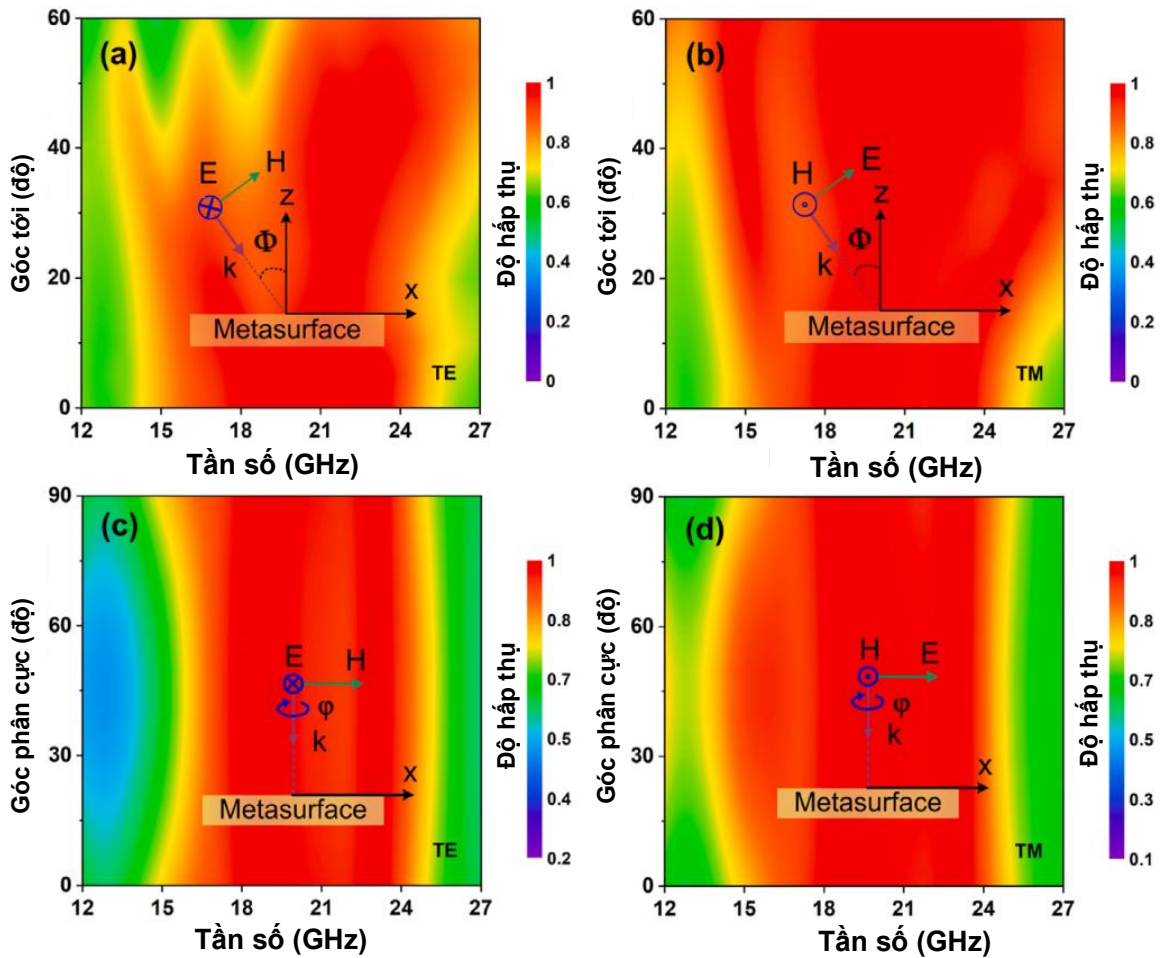
Hình 4.6. Kết quả tính toán phần thực và phần ảo trở kháng vào của MFM

Để khảo sát tác động của nước đến tổn hao công suất, độ tổn thất công suất ở hai tần số cộng hưởng 18,82 GHz và 23,15 GHz được khảo sát và trình bày trong Hình 4.7. Kết quả cho thấy, công suất của sóng tới chủ yếu được hấp thụ bởi bộ cộng hưởng nước tại hai tần số là 18,82 GHz và 23,15 GHz. Ở tần số 18,82 GHz, tổn hao công suất xảy ra ở cả bề mặt trên và dưới của lớp nước hình trụ. Tại tần số 23,15 GHz, tổn hao công suất chủ yếu xảy ra tại giao diện giữa bề mặt trên của lớp nước và bình chứa. Hiện tượng này được giải thích bằng chế độ cộng hưởng điện môi – một cơ chế trong đó vật liệu có hằng số điện môi cao (như nước) hoạt động như một bộ cộng hưởng khi bị kích thích bởi sóng điện từ. Trong cấu trúc cố định, tần số cộng hưởng của một chế độ xác định phụ thuộc vào kích thước điện của bộ cộng hưởng, với quan hệ gần đúng theo công thức: $f = \lambda / \sqrt{\epsilon}$, trong đó λ là bước sóng trong không gian tự do, và ϵ là hằng số điện môi của nước. Theo mô hình Debye, ϵ giảm dần theo tần số, nên kích thước điện của bộ cộng hưởng sẽ thay đổi nhẹ khi tần số thay đổi. Tuy nhiên, trong dải tần rộng, sự thay đổi ϵ là không lớn, nên chế độ cộng hưởng vẫn duy trì trong một băng tần rộng. Điều này lý giải vì sao nước có thể hấp thụ hiệu quả năng lượng trong dải tần rộng, và cũng cho phép duy trì cộng hưởng điện môi linh hoạt theo tần số. Kết quả là, tổn hao công suất trong nước tăng cường tại các vùng giao diện nơi mật độ điện trường đạt cực đại, và đặc tính cộng hưởng này giúp mở rộng băng thông hấp thụ, làm cho nước trở thành một thành phần hấp thụ và điều chỉnh quan trọng trong cấu trúc vật liệu biến hóa. Hiện tượng cộng hưởng điện môi cũng được tìm thấy trong các báo cáo [163, 165, 166].



Hình 4.7. Mật cắt ngang mật độ tổn hao công suất tại các tần số cộng hưởng
(a) 18,82 GHz và (b) 23,15 GHz

Ngoài ra, để đánh giá ảnh hưởng của góc tới sóng điện từ khi tương tác với bề mặt vật liệu, độ hấp thụ của MFM ứng với các góc tới khác nhau được khảo sát. Hình 4.8(a) và (b) trình bày hiệu suất hấp thụ của MFM trong trường hợp cấu trúc được tích hợp đầy nước với các góc tới thay đổi từ 0 - 60° cho các chế độ TE và TM tương ứng.

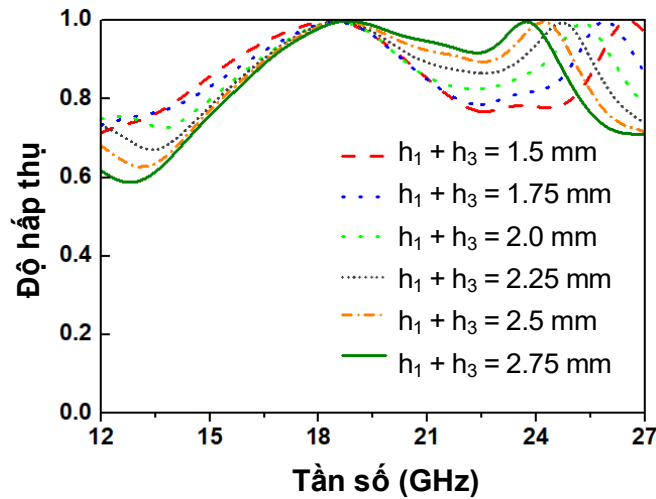


Hình 4.8. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của (a) (b) góc tới và (c) (d) góc phân cực đến hiệu suất hấp thụ ở chế độ TE và TM

Có thể thấy rằng, cấu trúc đề xuất đạt hiệu suất hấp thụ trên 80% ở cả hai chế độ TE và TM khi góc tới tăng đến 35°. Tuy nhiên, khi tiếp tục tăng góc tới trong chế độ TE, băng thông hoạt động giảm đáng kể, như thể hiện trong Hình 4.8(a). Trong

khi đó, cường độ hấp thụ không bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi của góc tới ở chế độ TM. Nó vẫn duy trì trên 85% trong dải tần 16,5 - 24 GHz như thể hiện trên Hình 4.8(b). Hiệu suất hấp thụ cao với các góc tới lớn ở chế độ TM được giải thích là do từ trường không thay đổi hướng khi góc tới tăng, nó tiếp tục kích thích các cộng hưởng từ trong cấu trúc, giúp duy trì hiệu suất hấp thụ cao [167]. Hơn nữa, cấu trúc đề xuất có thể hoạt động ổn định với các góc phân cực khác nhau được thể hiện trên Hình 4.8(c) và (d). Kết quả cho thấy cường độ hấp thụ giống hệt nhau ở nhiều góc phân cực ở chế độ TE và TM. Điều này chứng tỏ đặc tính không nhạy với góc phân cực cũng đạt được nhờ thiết kế đối xứng của hai vòng kim loại, đảm bảo hoạt động ổn định trong môi trường thực tế.

Cuối cùng ảnh hưởng của mức nước trong khối chứa nước đến hiệu suất hấp thụ của MFM được khảo sát. Kết quả thể hiện trên Hình 4.9 cho thấy khi mức nước tương ứng với chiều cao của khối nước ($h_2 + h_3$) được điều chỉnh từ 1,5 mm - 2,75 mm, phổ hấp thụ ở vùng tần số thấp thay đổi rất ít trong khi đó phổ hấp thụ thay đổi khá nhiều và có xu hướng mở rộng dải tần ở vùng tần số cao, tuy nhiên độ hấp thụ giảm khi mức nước trong khoang chứa nước giảm.

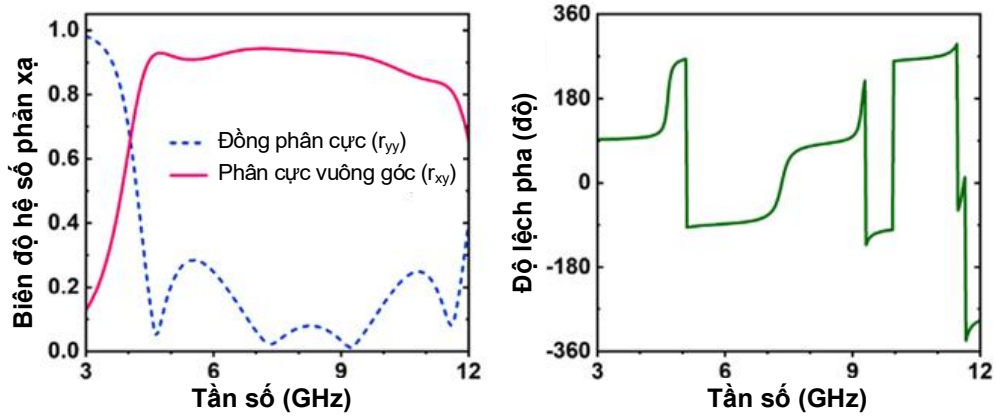


Hình 4.9. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của mức nước đến hiệu suất hấp thụ của MFM đề xuất

4.1.3. Khảo sát tính chất của MFM hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực

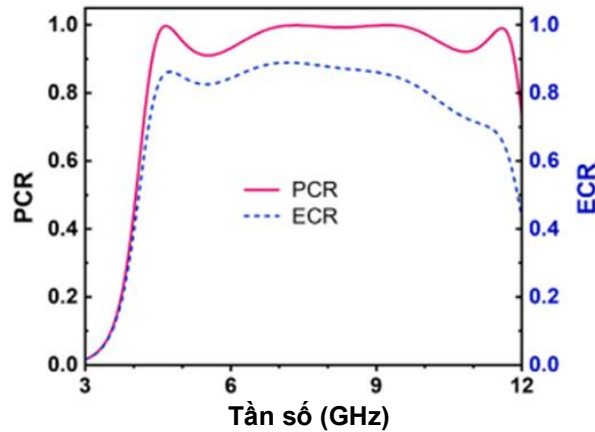
Hình 4.10. hiển thị biên độ của hệ số phản xạ đồng phân cực và hệ số phản xạ vuông góc. Kết quả cho thấy hệ số phản xạ vuông góc có giá trị lớn hơn 0,9 trong vùng tần số rộng từ 4,38 GHz – 11,9 GHz. Ngược lại, trong vùng tần số đó, hệ số phản xạ đồng phân cực thấp hơn 0,285. Đặc biệt, tại bốn đỉnh cộng hưởng 4,6 GHz, 7,3 GHz, 9,2 GHz và 11,8 GHz, hệ số phản xạ đồng phân cực lần lượt là 0,05, 0,02, 0,01 và 0,08. Điều này cho thấy cộng hưởng mạnh mẽ tại các tần số này đã đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra chuyển đổi phân cực chéo hiệu quả trên một dải tần số rộng. Độ lệch pha của hệ số chuyển đổi đồng phân cực và phân cực vuông góc là

$90^\circ \times n$ hoặc $-90^\circ \times n$ (n là số nguyên lẻ) trong dải tần làm việc 4,38 – 11,9 GHz. Điều này xác nhận rằng cấu trúc MFM đề xuất thể hiện chức năng chuyển đổi phân cực chéo trên một dải tần số rộng.



Hình 4.10. Biên độ mô phỏng của hệ số phản xạ đồng phân cực, hệ số phản xạ phân cực vuông góc và pha của chúng

Khảo sát tỉ lệ chuyển đổi năng lượng ECR của cấu trúc MFM hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực (với ECR được tính bởi biểu thức (1.8)), kết quả thể hiện ECR trên Hình 4.11 cho thấy, mặc dù ECR có giá trị thấp hơn giá trị của hiệu suất chuyển đổi phân cực PCR, nhưng ECR vẫn được giữ ở mức trên 80% trong dải tần từ 4,3 - 10 GHz. Điều này đã chứng tỏ rằng sóng tới được hấp thụ một phần trong cấu trúc MFM.

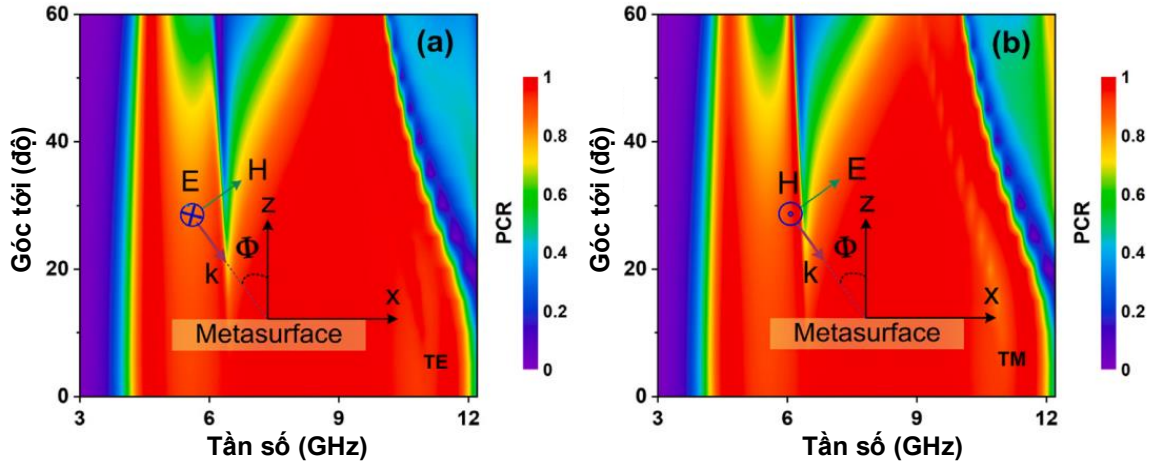


Hình 4.11. Hiệu suất chuyển đổi phân cực và hiệu suất chuyển đổi năng lượng mô phỏng của MFM đề xuất

Như vậy, với thiết kế hình học của cấu trúc cộng hưởng là hai vòng vuông kim loại đối xứng đã tạo điều kiện cho nhiều chế độ cộng hưởng cùng tồn tại và phân bố đều trong dải tần rộng, từ đó mở rộng băng thông và hiệu suất chuyển đổi hiệu quả.

Tương tự như phân tích ảnh hưởng của góc sóng tới đến hiệu suất hấp thụ khi MFM hoạt động ở chế độ hấp thụ, ảnh hưởng của góc tới đến hiệu suất chuyển đổi

phân cực của MFM khi hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực được khảo sát với các góc tới thay đổi từ 0 - 60°.

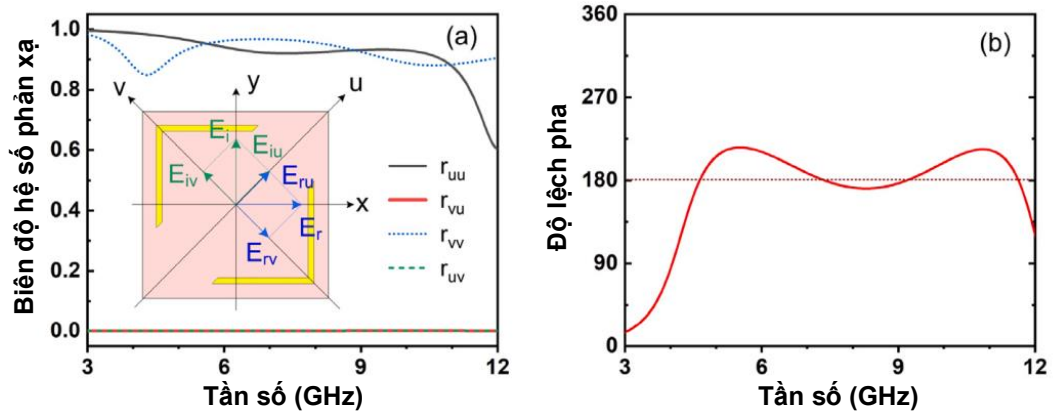


Hình 4.12. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của PCR vào góc tới ở chế độ (a) điện trường TE và (b) từ trường TM

Kết quả hiển thị cho cả hai chế độ điện trường TE và từ trường TM trên Hình 4.12 cho thấy, băng thông hoạt động của MFM bị thu hẹp lại ở cả hai chế độ TE và TM. Hiện tượng này có thể được giải thích là do đã có sự lệch pha 180° giữa các sóng phản xạ, chúng triệt tiêu lẫn nhau và làm giảm công suất phản xạ tổng thể. Hiện tượng này cũng đã được đề cập trong báo cáo [146]. Ngoài ra, sự sụt giảm hiệu suất được quan sát tại khoảng tần số 6,5 GHz ở cả hai chế độ TE và TM, do xuất hiện hấp thụ mạnh xảy ra tại tần số này. Tuy nhiên, cấu trúc MFM vẫn có khả năng duy trì hiệu suất chuyển đổi phân cực trên 80% trong hai dải tần: từ 4,38 GHz đến 6,3 GHz và từ 6,7 GHz đến 11 GHz, khi góc tới lên đến 40°. Kết quả này khẳng định rằng cấu trúc MFM được đề xuất có khả năng chuyển đổi phân cực ổn định và hiệu quả trong một dải tần rộng, ngay cả khi góc tới thay đổi.

Để làm rõ cơ chế hoạt động của MFM khi hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực, biên độ và độ lệch pha của các hệ số phản xạ được mô phỏng và phân tích. Kết quả được hiển thị như trên Hình 4.13 (a) (b). Giả sử sóng tới được phân cực dọc theo trục y , sóng này có thể được phân tích thành hai thành phần trực giao dọc theo các trục u và v . Việc khảo sát các thành phần trực giao này giúp làm rõ vai trò của các cộng hưởng và sự thay đổi pha trong quá trình chuyển đổi phân cực, từ đó giải thích cơ chế hoạt động của cấu trúc MFM.

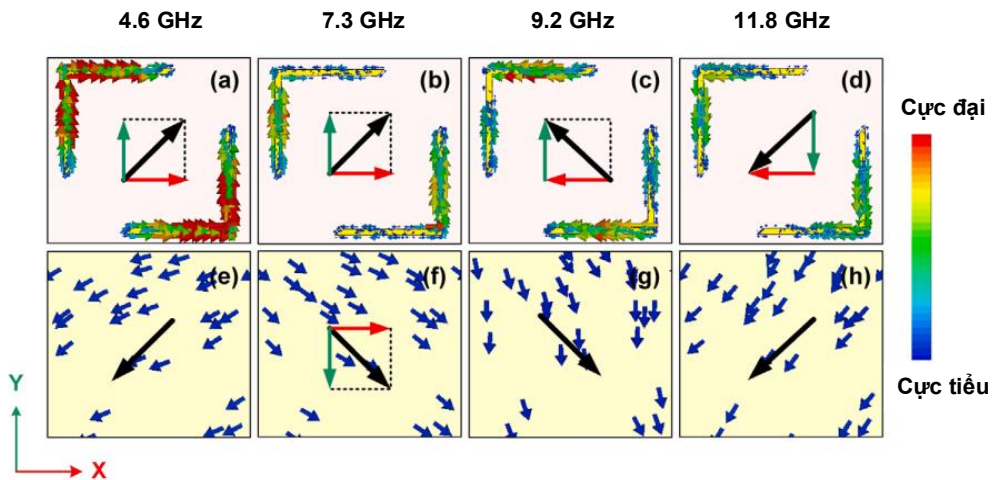
Điện trường tới và điện trường phản xạ của sóng điện từ tới có thể được biểu thị bởi biểu thức (3.4) và (3.6) và phân tích tương tự như đã trình bày trong mục 3.2.1 ở chương 3. Sóng điện từ tới được quay chính xác 90° so với góc tới như được mô tả trên Hình 4.13(a).



Hình 4.13. Kết quả mô phỏng (a) biên độ và (b) độ lệch pha của hệ số phản xạ đồng phân cực, phân cực vuông góc theo trục uv

Để kiểm chứng nhận định này, chúng tôi đã mô phỏng biên độ và độ lệch pha của các hệ số phản xạ ứng với các thành phần u_{uu} và v_{vv} của MFM trong điều kiện sóng tới vuông góc. Kết quả được hiển thị trong Hình 4.13(a) cho thấy, biên độ của hệ số đồng phản xạ r_{uu} và r_{vv} gần bằng 1 trong dải tần rộng từ 4,38 - 11,9 GHz. Ngoài ra, hệ số phản xạ vuông góc giữa các phân cực u và v , cụ thể là r_{uv} và r_{vu} gần như bằng 0 trong cùng dải tần từ 4,38 - 11,9 GHz. Hình 4.13(b) trình bày độ lệch pha $\Delta\varphi$ giữa r_{uu} và r_{vv} theo tần số. Kết quả cho thấy, độ lệch pha nằm trong khoảng $180^\circ - 35^\circ \leq \Delta\varphi \leq 180^\circ + 35^\circ$ trong vùng tần số từ 4,38 đến 11,9 GHz. Đặc biệt, độ lệch pha bằng 180° tại các tần số 4,6 GHz, 7,3 GHz, 9,2 GHz và 11,8 GHz tương ứng với bốn tần số cộng hưởng của MFM. Điều này chứng tỏ rằng các cơ chế cộng hưởng tại những tần số này đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì hiệu suất chuyển đổi phân cực.

Để hiểu rõ hơn về cơ chế vật lý của quá trình chuyển đổi phân cực, chúng tôi khảo sát và phân tích phân bố dòng điện bề mặt tại bốn tần số cộng hưởng 4,6 GHz, 7,3 GHz, 9,2 GHz và 11,8 GHz như được trình bày trên Hình 4.14.



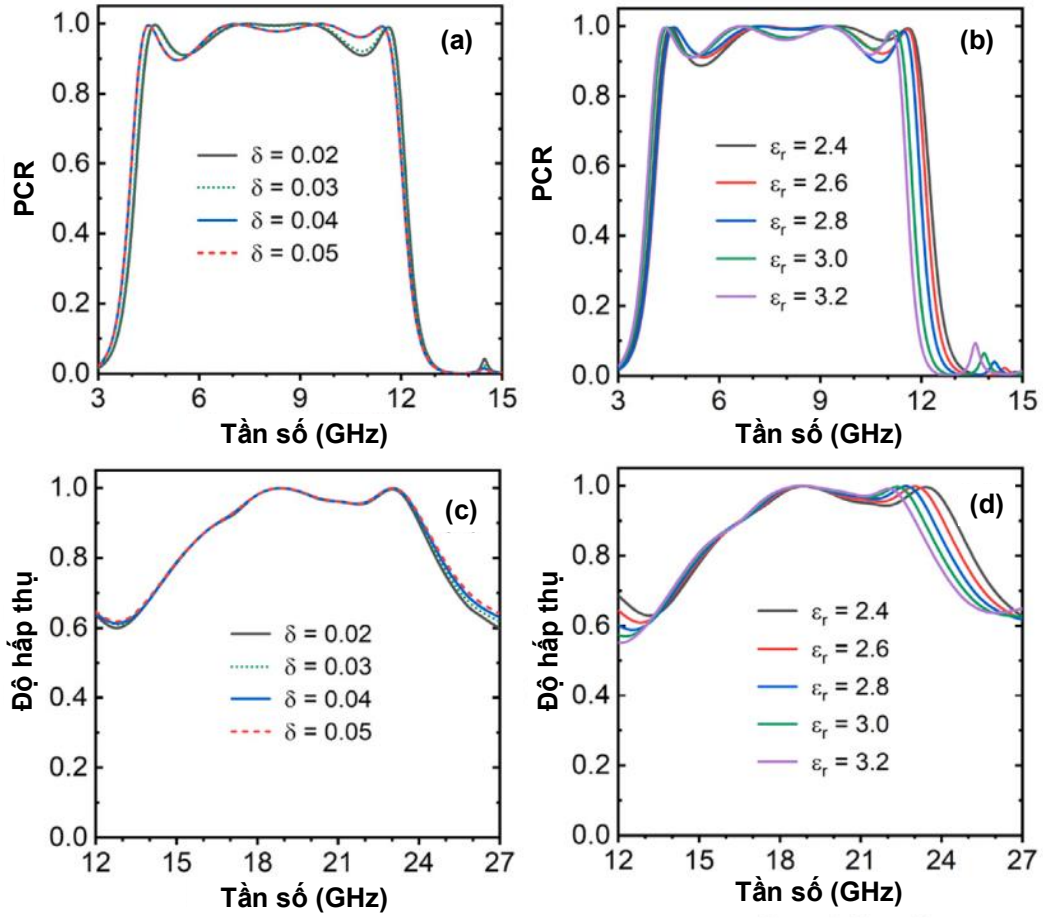
Hình 4.14. Phân bố dòng điện mô phỏng ở lớp kim loại trên cùng (a - d) và lớp kim loại dưới cùng (e - h) trong một ô đơn vị của MFM đề xuất tại các tần số cộng hưởng

Các mũi tên màu đen trên hình biểu thị hướng dòng điện bề mặt tổng hợp của từng lớp. Kết quả thể hiện trên Hình 4.14(a), (e) và (c), (g) cho thấy, tại hai tần số cộng hưởng 4,6 GHz và 9,2 GHz, các dòng điện bề mặt ở lớp trên cùng và lớp dưới cùng song song và ngược chiều nhau, tạo thành một vòng lặp dòng điện hiệu dụng, gây ra một mômen lưỡng cực từ mạnh vuông góc với bề mặt cấu trúc. Điều này cho thấy các cộng hưởng tại hai tần số này chủ yếu bắt nguồn từ cơ chế cộng hưởng từ [149]. Ngược lại, tại tần số cộng hưởng 11,8 GHz, các dòng điện bề mặt trên lớp trên cùng song song và cùng chiều với dòng điện của lớp đất phía dưới, được thể hiện trên Hình 4.14(d) và (h). Sự phân bố dòng điện này tương ứng như một lưỡng cực điện, cho thấy cơ chế cộng hưởng tại tần số này là cộng hưởng điện [81]. Ở tần số cộng hưởng 7,3 GHz, dòng điện trên bề mặt lớp trên cùng và lớp đất có hướng song song và ngược chiều nhau theo các trục y và x , tương ứng, như hiển thị trên Hình 4.14(b) và (f). Điều này cho thấy cộng hưởng tại tần số 7,3 GHz là kết quả của sự kết hợp giữa cộng hưởng từ và cộng hưởng điện [73]. Kết quả này giúp làm rõ cơ chế cộng hưởng của cấu trúc MFM tại các tần số cộng hưởng khác nhau, góp phần nâng cao hiệu suất chuyển đổi phân cực trong dải tần số rộng.

4.1.4. Khảo sát ảnh hưởng của các thông số vật liệu, kích thước đến hiệu suất của MFM

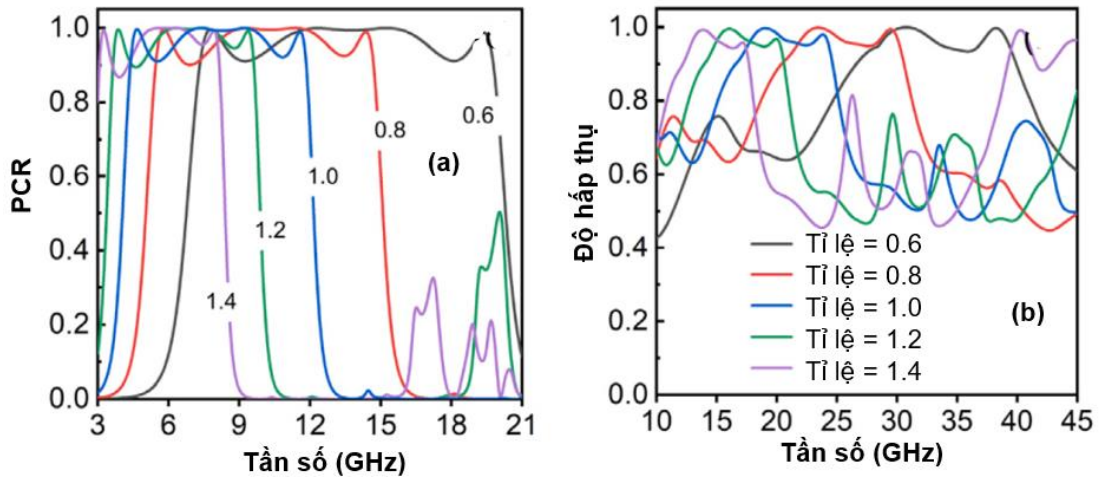
Để đánh giá khả năng hoạt động của MFM đề xuất khi được chế tạo bằng các vật liệu nhựa in 3D khác nhau, hiệu suất hấp thụ và chuyển đổi phân cực đã được khảo sát bằng cách thay đổi độ tổn thất và hằng số điện môi của vật liệu nhựa trong khoảng từ 0,02 đến 0,05 và từ 2,4 đến 3,2 tương ứng.

Kết quả, được thể hiện trong Hình 4.15(a), (c) cho thấy, phổ hấp thụ và chuyển đổi phân cực gần như không thay đổi khi tiếp tuyến tổn thất của nhựa thay đổi trong phạm vi 0,02 – 0,05. Điều này cho thấy rằng vật liệu nhựa có khả năng duy trì hiệu suất ổn định trong một phạm vi rộng của các tham số tổn thất. Ngoài ra, khi hằng số điện môi của vật liệu nhựa thay đổi từ 2,4 đến 3,2, phổ hiệu suất chuyển đổi và hấp thụ dịch chuyển về phía vùng tần số cao hơn, nhưng hiệu suất vẫn được duy trì ở mức cao trên 90%, như minh họa trong Hình 4.15(b), (d). Những kết quả này chỉ ra rằng hiệu suất chuyển đổi phân cực và hiệu suất hấp thụ của MFM đề xuất không bị ảnh hưởng đáng kể bởi sự thay đổi lớn về hằng số điện môi và độ tổn thất của vật liệu nhựa. Điều này mở ra tiềm năng ứng dụng công nghệ in 3D để chế tạo các MMs tích hợp nước, mang lại những lợi ích trong sản xuất và ứng dụng thực tiễn.



Hình 4.15. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của hiệu suất (a) chuyển đổi phân cực và (b) hấp thụ vào hằng số điện môi và độ tổn thất của vật liệu nhựa

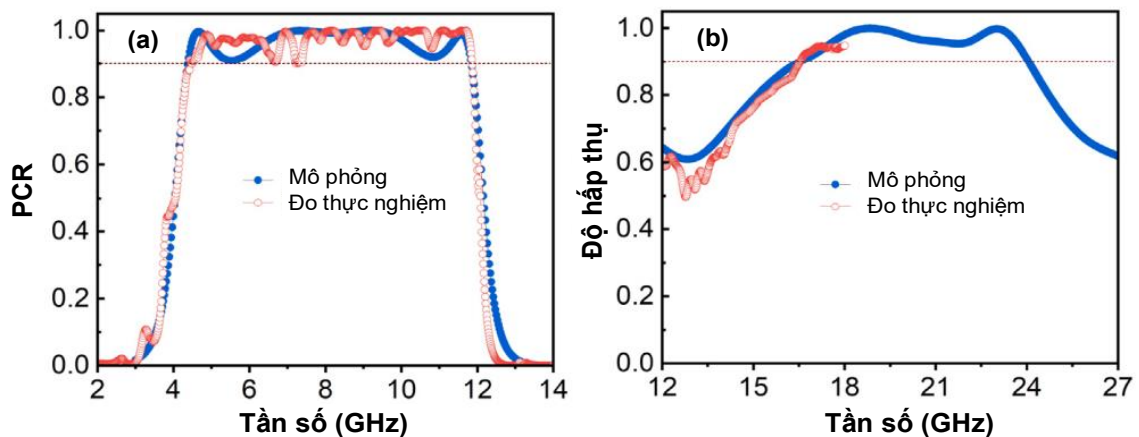
Bên cạnh việc khảo sát tác động của vật liệu nhựa lên hiệu suất của MFM, chúng tôi thực hiện khảo sát hiệu suất của MFM với tỉ lệ khác nhau của kích thước ô đơn vị thay đổi trong phạm vi từ 0,6 đến 1,4.



Hình 4.16. Kết quả mô phỏng hiệu suất (a) chuyển đổi phân cực và (b) hấp thụ với tỉ lệ khác nhau của kích thước ô đơn vị

Kết quả hiển thị trên Hình 4.16 cho thấy cả phổ hấp thụ và chuyển đổi phân cực đều được dịch chuyển về vùng tần số thấp hơn khi tăng kích thước P theo tỉ lệ từ 0,6 đến 1,4 trong khi RBW gần như không thay đổi. Kết quả khảo sát này cho thấy khả năng kiểm soát tần số hoạt động bằng cách thay đổi kích thước của cấu trúc.

Hình 4.17 là kết quả khảo sát, đo đặc các đặc trưng của mẫu chế tạo bằng thực nghiệm được so sánh với kết quả mô phỏng. Do giới hạn đo của thiết bị VNA tại phòng thí nghiệm chỉ từ 0 - 18 GHz, vì vậy dữ liệu được thu thập trong phạm vi từ 2 - 18 GHz.



Hình 4.17. Kết quả mô phỏng và đo đặc (a) hiệu suất chuyển đổi phân cực và (b) hiệu suất hấp thụ

Kết quả trên Hình 4.17 cho thấy có sự tương đồng tốt giữa mô phỏng và thực nghiệm. Tuy nhiên, có một số sai khác nhỏ giữa hai kết quả, điều này có thể được giải thích do lỗi căn chỉnh hệ thống trong quá trình đo đặc, cùng với sai số trong quá trình chế tạo, dẫn đến sự khác biệt nhẹ trong kết quả.

Cuối cùng, chúng tôi so sánh kết quả nghiên cứu với các báo cáo được công bố gần đây. Các thông số được sử dụng để so sánh bao gồm: chế độ hoạt động, băng tần làm việc, băng thông tương đối và cơ chế chuyển đổi chế độ hoạt động. Như thể hiện trong Bảng 4.2, cấu trúc đề xuất có thể hoạt động trong băng tần rộng với chức năng kép, bao gồm cả khả năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực. So với các cấu trúc MFM tương tự trong [99], MFM đề xuất có dải tần làm việc hẹp hơn ở chế độ hấp thụ, nhưng lại cao hơn ở chế độ chuyển đổi phân cực. So với cấu trúc dùng cơ chế chuyển đổi tương tự là tích hợp nước trong [18], cấu trúc MFM đề xuất có băng thông làm việc rộng hơn ở cả hai chế độ. Thêm vào đó, báo cáo trong [99] yêu cầu quá trình chế tạo phức tạp và tốn kém do cần sử dụng các thành phần điện tử và nguồn điện để cấp điện áp phân cực.

Bảng 4.2. So sánh hiệu suất của MFM hoạt động vùng tần số GHz đề xuất với các MFM hoạt động vùng tần số GHz được công bố gần đây

Tài liệu	Chức năng	Dải tần làm việc (GHz)	RBW (%)	Cơ chế chuyển đổi
[11]	Hấp thụ	4,48, 10,54 và 21,02	Không có	Phương pháp cơ học
	Chuyển đổi phân cực	14,43 - 20,32	33,9	
[168]	Hấp thụ	8,0 - 22,0	93,3	Phương pháp nhiệt
	Phản xạ	8,0 - 22,0	93,3	
[99]	Hấp thụ	2,56 - 7,62	99,4	Phương pháp điện
	Chuyển đổi phân cực	2,97 - 6,03	68,0	
[18]	Hấp thụ	16,1 - 16,9	4,8	Phương pháp tích hợp nước
	Chuyển đổi phân cực	5,9 - 10 và 14,3 - 16,4	51,5 và 13,7	
Thiết kế đề xuất	Hấp thụ	16,5 - 24	37	Phương pháp tích hợp nước
	Chuyển đổi phân cực	4,38 - 11,9	92,4	

Cấu trúc MFM tích hợp nước cho thấy tính khả thi cao trong việc hấp thụ sóng điện từ hiệu quả nhờ đặc tính tổn hao điện môi lớn của nước trong dải tần số rộng, đặc biệt ở vùng GHz. Ngoài ra, việc thay đổi trạng thái hoặc mức nước cho phép điều khiển chế độ hoạt động giữa hấp thụ và chuyển đổi phân cực, mở ra tiềm năng ứng dụng trong các thiết bị cảm biến và hệ thống điều khiển thông minh. Khi triển khai trong thực tế để đảm bảo tính ổn định cho hiệu suất hấp thụ cần có biện pháp làm kín hiệu quả do nước là vật liệu dễ bay hơi. Ngoài ra, vật liệu nhựa PLA sử dụng để làm khoang chứa nước là một vật liệu tiện lợi, phổ biến, nhưng có nhiệt độ làm việc giới hạn (khoảng 60 - 65°C). Khi tiếp xúc lâu dài với nước hoặc làm việc trong điều kiện môi trường biến động, vật liệu có nguy cơ biến dạng, rò rỉ, hoặc suy giảm đặc tính điện môi, làm ảnh hưởng đến độ ổn định hoạt động của thiết bị.

4.2. Thiết kế và tối ưu cấu trúc MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số THz

4.2.1. Thiết kế cấu trúc MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực tích hợp vật liệu chuyển pha VO_2

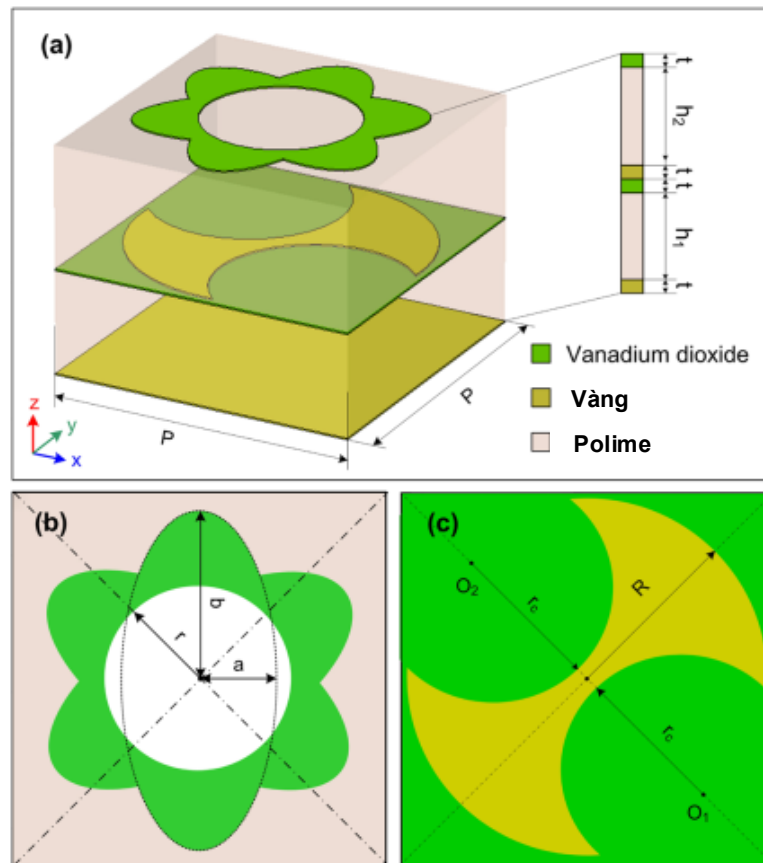
Sóng THz có tần số nằm trong khoảng 0,1 - 10 THz (tương ứng với bước sóng từ 3 mm đến 30 μm), với tiềm năng ứng dụng rộng lớn ở nhiều lĩnh vực trong tương lai đang ngày càng thu hút sự quan tâm nghiên cứu của các nhà khoa học.

Dựa trên kết quả nghiên cứu về cấu trúc hấp thụ sử dụng vật liệu chuyển pha VO_2 đã được trình bày ở chương 3 và một số nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng việc sử dụng các kim loại có tổn thất cao chẳng hạn như Crom hoặc VO_2 có thể giảm hệ số phẩm chất của cộng hưởng lưỡng cực, từ đó làm tăng băng thông hấp thụ so với các kim loại quý như Au và Ag [137], luận án tiếp tục tập trung vào việc thiết kế và tối ưu hóa cấu trúc MFM tích hợp vật liệu chuyển pha VO_2 có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số THz.

Cấu trúc MFM được thiết kế nhằm thực hiện hai chức năng chính: hấp thụ sóng điện từ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ, thông qua quá trình chuyển pha có điều khiển của VO_2 . Ô cơ sở của MFM được thiết kế gồm sáu lớp mỏng xếp chồng lên nhau, được chia thành hai tầng chức năng chính, tầng trên được thiết kế hoạt động ở chế độ hấp thụ khi VO_2 ở trạng thái kim loại, trong khi tầng dưới được thiết kế hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực khi VO_2 ở trạng thái cách điện. Chi tiết cấu trúc ô cơ sở của MFM được thể hiện trên Hình 4.18.

Trong thiết kế này, chúng tôi sử dụng chất nền Polyimide với hằng số điện môi là 3,5 và độ suy hao là 0,0027. Các lớp kim loại được làm bằng Vàng (Au) có độ dẫn điện $\sigma = 4,56 \times 10^7 \text{ S/m}$ và độ dày $t = 200 \text{ nm}$. Lớp cộng hưởng chính tại tầng trên được chế tạo từ VO_2 có hình dạng hoa 6 cánh đồng tâm được khoét bởi hình tròn có bán kính r . Tâm của vòng tròn bố trí lệch tâm của cấu trúc với khoảng cách là r_c , các cánh hoa mở rộng có chiều dài là a và chiều rộng là b . Thiết kế này nhằm kích thích các cộng hưởng đa tần và phối hợp trở kháng từ đó tăng hiệu suất hấp thụ trong dải tần rộng. Lớp cộng hưởng của tầng dưới bao gồm một cặp trụ kim loại vàng đối xứng nhau qua đường chéo của ô cơ sở. Việc thiết kế lớp kim loại không đối xứng này nhằm tạo ra sự lệch pha phản xạ, dẫn đến hiện tượng chuyển đổi phân cực chéo hiệu quả.

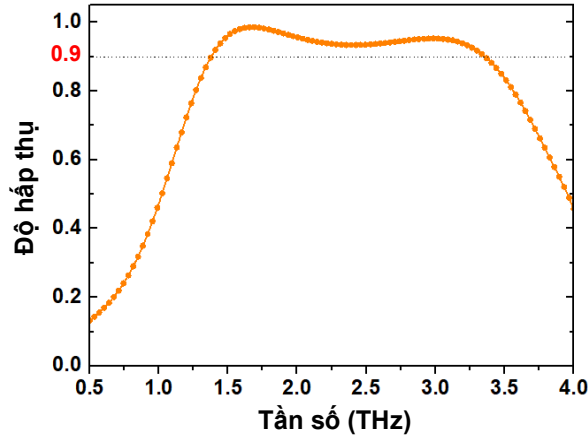
Các tham số hình học tối ưu của ô đơn vị như sau: $P = 40 \mu\text{m}$, $h_1 = 13,5 \mu\text{m}$, $h_2 = 16 \mu\text{m}$, $t = 0,2 \mu\text{m}$, $a = 8 \mu\text{m}$, $b = 17 \mu\text{m}$, $r = 10,5 \mu\text{m}$, $R = 19 \mu\text{m}$, và $r_c = 12,7 \mu\text{m}$. Tâm của các vòng tròn có bán kính r_c lần lượt là $O_1 (9,9 \mu\text{m}; -9,9 \mu\text{m})$ và $O_2 (-9,9 \mu\text{m}; 9,9 \mu\text{m})$. Kích thước của cấu trúc ô đơn vị là $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m} \times 30,3 \mu\text{m}$ được hình thành từ sáu lớp mỏng, đảm bảo phù hợp để sản xuất bằng công nghệ vi mô và nano thông thường. Thiết kế đề xuất có thể được chế tạo bằng kỹ thuật quang khắc, các màng mỏng của Au và VO_2 được lắng đọng trên chất nền polyimide bằng phương pháp phún xạ thông thường và các lớp polyimide được phủ kéo sợi. Quá trình chuyển pha của VO_2 có thể được thực hiện bằng cách sử dụng nhiệt, kích thích quang hay bằng điện áp hoặc dòng điện đủ lớn. Độ dẫn điện σ của vật liệu VO_2 ở pha cách điện là 200 S/m và pha kim loại là $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ tương ứng với điện trở suất lần lượt là $0,5 \Omega \cdot \text{cm}$ và $0,5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ [137].



Hình 4.18. Cấu trúc ô cơ sở của MMs: (a) Hình ảnh 3D, góc nhìn từ trên xuống của (b) tấm cộng hưởng cho chế độ hấp thụ và (c) tấm cộng hưởng cho chế độ chuyển đổi phân cực.

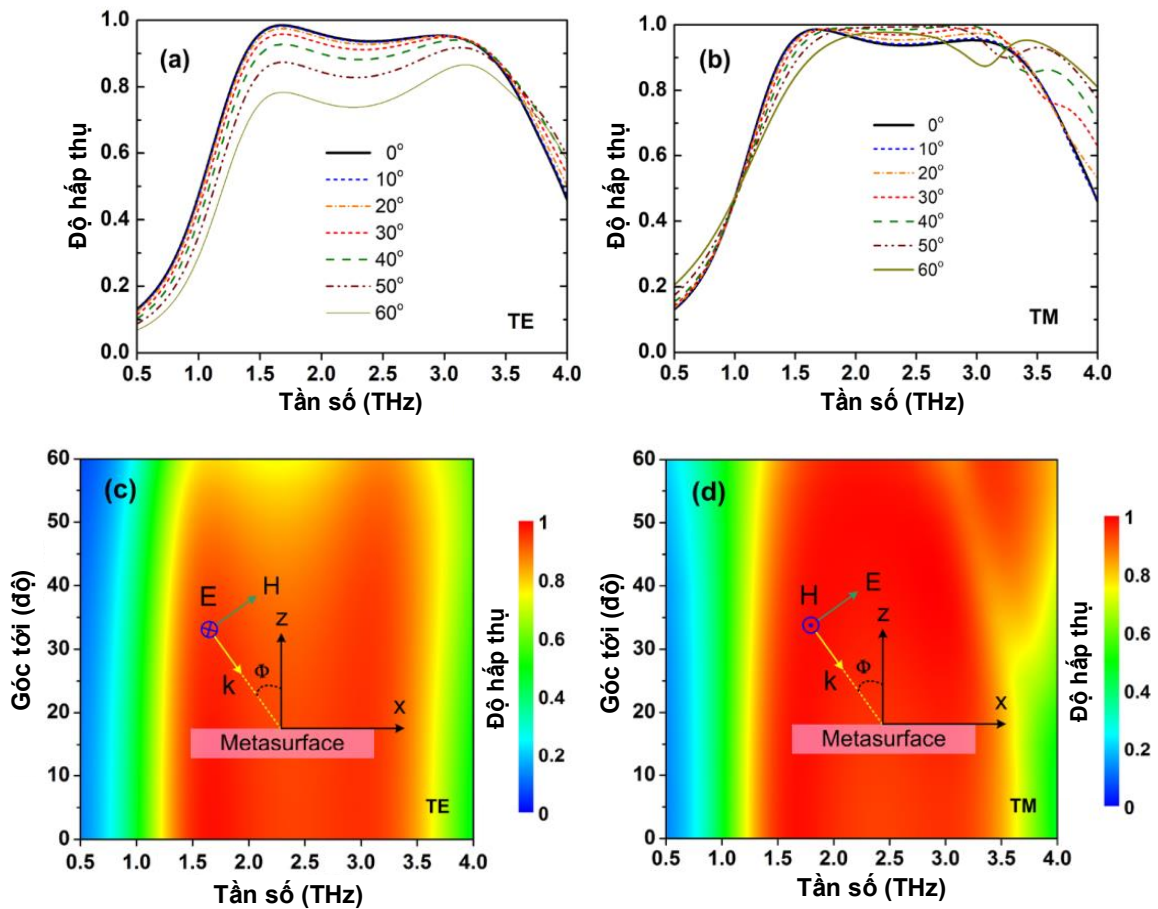
4.2.2. Khảo sát tính chất của MFM tích hợp VO_2 hoạt động ở chế độ hấp thụ

MFM đề xuất được mô phỏng cho cả trạng thái pha kim loại và pha điện môi của VO_2 tương ứng với chế độ hấp thụ và chế độ chuyển đổi phân cực.



Hình 4.19. Phổ hấp thụ mô phỏng của MFM đề xuất khi VO_2 ở pha kim loại

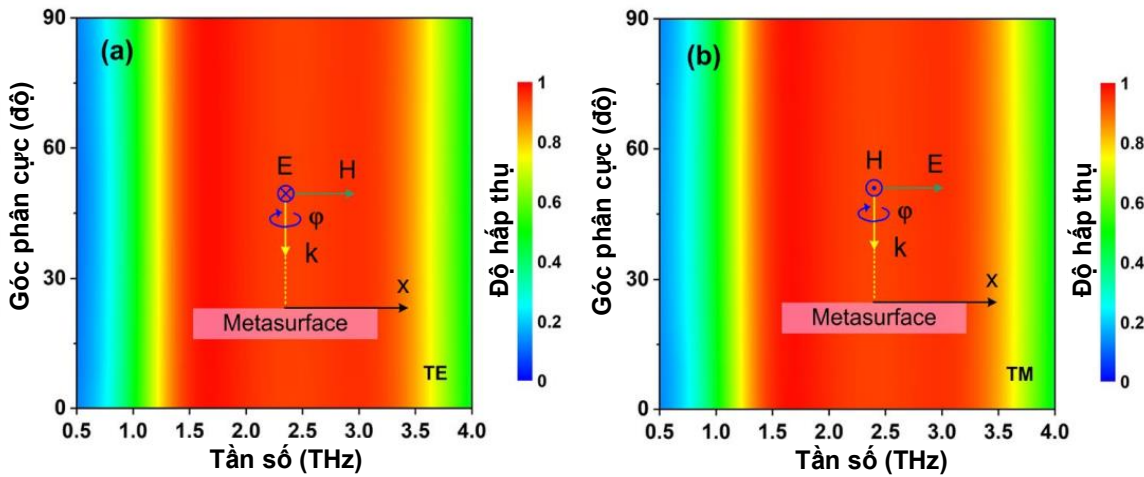
Khi VO_2 hoàn toàn ở trạng thái kim loại với độ dẫn điện σ là $2 \times 10^5 \text{ S/m}$, lớp VO_2 ngăn chặn sự truyền qua của sóng điện từ. Đồng thời, khi điều kiện phối hợp trở kháng được thỏa mãn, sự hấp thụ gần như tuyệt đối đạt được, như thể hiện trong Hình 4.19. Có thể thấy rằng cấu trúc đạt được đáp ứng hấp thụ băng thông rộng với hiệu suất trên 90% trong dải tần số từ 1,36 đến 3,38 THz, tương ứng với tỷ số băng thông (RBW) lên đến 85%. Hai đỉnh cộng hưởng ở 1,65 THz và 3,09 THz được quan sát với hiệu suất lần lượt là 98% và 95%.



Hình 4.20. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của độ hấp thụ vào góc tới cho MFM hoạt động ở chế độ hấp thụ (a, c) phân cực TE và (b, d) phân cực TM.

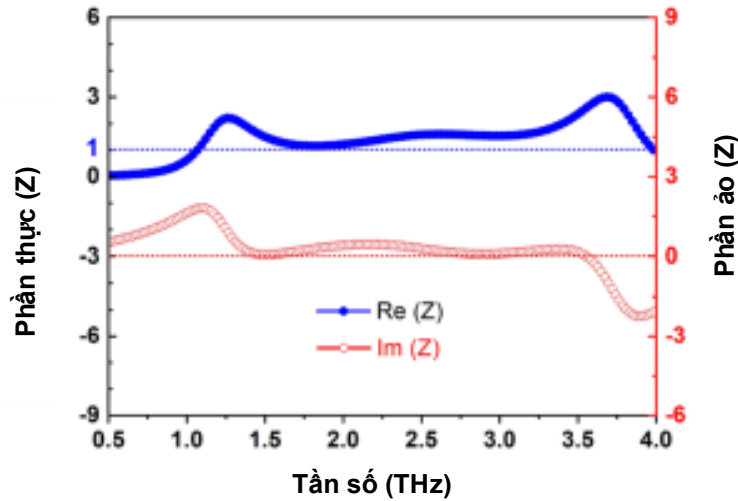
Khi sóng điện từ chiếu đến với các góc tới khác nhau, phổ hấp thụ đã được khảo sát với góc tới thay đổi từ 0° đến 60° . Kết quả thể hiện trên Hình 4.20 cho thấy, cấu trúc MFM thể hiện hiệu suất hấp thụ cao trong một dải góc tới rộng đối với cả hai chế độ phân cực TE và TM. Trong phân cực TE, độ hấp thụ giảm dần khi góc tới tăng, nhưng vẫn duy trì ở mức cao hơn 80% với góc tới lên đến 50° . Trong khi đó, với phân cực TM, một hiện tượng thú vị được quan sát là độ hấp thụ tăng khi góc tới tăng. Hơn nữa, phổ hấp thụ được mở rộng sang tần số cao hơn khi góc tới vượt quá 30° .

Tiếp theo, độ hấp thụ đối với các góc phân cực khác nhau trong cả hai phân cực TE và TM được mô phỏng và kết quả được trình bày trên Hình 4.21. Kết quả cho thấy độ hấp thụ không thay đổi với sự thay đổi góc phân cực từ 0 đến 90° đối với cả hai phân cực TE và TM. Kết quả chỉ ra rằng cấu trúc MFM được thiết kế không nhạy cảm với sự thay đổi góc phân cực nhờ vào tính đối xứng của bộ cộng hưởng VO_2 kim loại. Điều này làm tăng tính ổn định và hiệu quả của cấu trúc trong các ứng dụng thực tiễn với điều kiện sóng điện từ đa dạng.



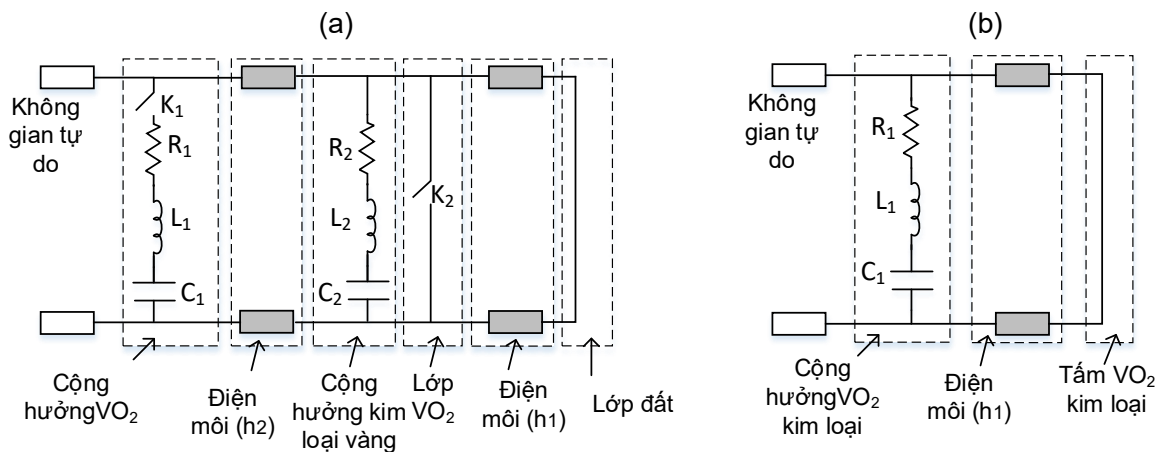
Hình 4.21. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của độ hấp thụ vào góc phân cực cho MFM hoạt động ở chế độ hấp thụ ở (a) phân cực TE và (b) phân cực TM

Cơ chế hấp thụ băng rộng của cấu trúc đề xuất được giải thích thông qua việc phối hợp trở kháng giữa cấu trúc và môi trường truyền sóng. Khi trở kháng của cấu trúc gần bằng trở kháng của môi trường, sóng điện từ tới sẽ không bị phản xạ mà truyền vào và bị hấp thụ hiệu quả. Kết quả tính toán trở kháng vào được trình bày trong Hình 4.22 cho thấy, trong dải tần rộng từ 1,65 THz đến 3,09 THz, phần thực của trở kháng vào duy trì giá trị gần bằng 1, trong khi phần ảo dao động quanh 0. Điều này chứng tỏ cấu trúc đã đạt được điều kiện phối hợp trở kháng lý tưởng trên một dải tần số rộng, giúp sóng điện từ được hấp thụ tối ưu. Kết quả này cho thấy khả năng thiết kế và điều chỉnh cộng hưởng hiệu quả trong cấu trúc, từ đó mở ra tiềm năng ứng dụng cho các thiết bị hấp thụ sóng điện từ băng rộng.



Hình 4.22. Kết quả tính toán trở kháng vào của MFM đề xuất ở chế độ hấp thụ.

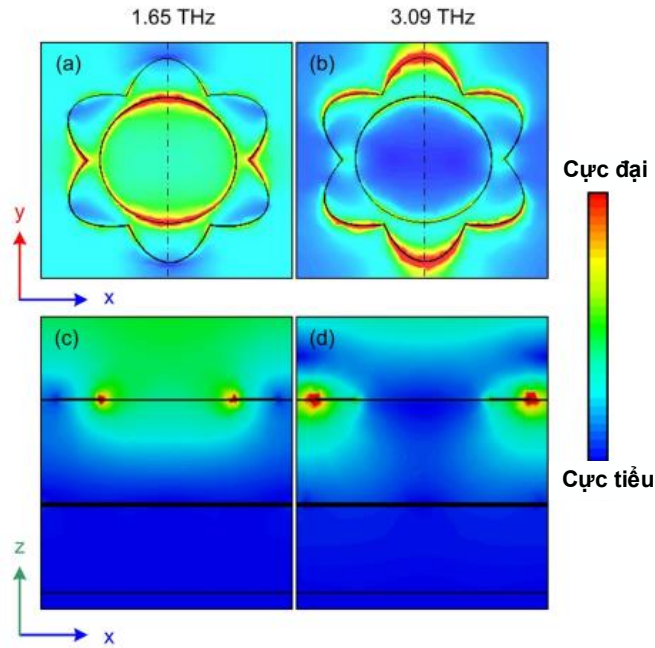
Để nghiên cứu tính chất vật lý của MFM đề xuất khi hoạt động ở chế độ hấp thụ, sơ đồ mạch tương đương ô đơn vị của cấu trúc đề xuất được thiết lập bằng lý thuyết đường truyền. Do VO_2 có sự thay đổi pha trong quá trình khảo sát, vì vậy, các công tắc K_1 và K_2 được dùng để phân biệt sự chuyển pha của VO_2 từ trạng thái kim loại sang trạng thái cách điện. K_1 và K_2 ở trạng thái “đóng” khi VO_2 ở pha kim loại và ở trạng “mở” khi VO_2 ở pha điện môi. Sơ đồ mạch tương đương bao gồm một đường truyền không gian trống, mạch $R_1L_1C_1$ cho lớp cộng hưởng VO_2 kim loại được kết nối với công tắc K_1 , một đường truyền cho chất nền polymer (độ dày h_2), mạch $R_2L_2C_2$ cho bộ cộng hưởng lớp vàng, lớp VO_2 làm công tắc K_2 và đường truyền với chất nền polymer (độ dày h_1). Khi VO_2 ở pha hoàn toàn kim loại, lúc này K_1, K_2 ở trạng thái “đóng”, sơ đồ mạch tương đương bao gồm một đường truyền không gian trống, mạch $R_1L_1C_1$ cho lớp cộng hưởng VO_2 kim loại, đường truyền ngắn mạch cho chất nền polymer (có độ dày h_2) như thể hiện trên Hình 4.23 (b).



Hình 4.23. (a) Sơ đồ mạch điện tương đương ô đơn vị của MFM đề xuất và (b) sơ đồ mạch tương đương của MFM đề xuất ở chế độ hấp thụ

Từ Hình 4.23 (b), giá trị của $Z(\omega)$ phụ thuộc vào kích thước và hình dạng của cấu trúc cộng hưởng VO₂ và độ dày của lớp đế polymer. Vì vậy, bằng cách tối ưu kích thước của cấu trúc lớp cộng hưởng VO₂ và độ dày chất nền polymer (có độ dày h_2), điều kiện phối hợp trở kháng có thể thu được như thể hiện trên Hình 4.22 và hoàn toàn đạt được hiệu suất hấp thụ cao như mô tả trong Hình 4.19.

Để hiểu rõ cơ chế hình thành các đỉnh hấp thụ, sự phân bố của điện trường ở hai tần số cộng hưởng là 1,96 THz và 3,09 THz trong điều kiện chiếu sáng vuông góc đã được khảo sát. Kết quả được trình bày trên các mặt phẳng xy và xz trong Hình 4.24.



Hình 4.24. Phân bố điện trường mô phỏng trong ô đơn vị đối với sóng tới phân cực y ở tần số cộng hưởng trong (a) (b) mặt phẳng xy (nhìn từ trên xuống) và (c) (d) mặt phẳng xz được xác định tại vị trí bằng các đường đứt nét màu đen.

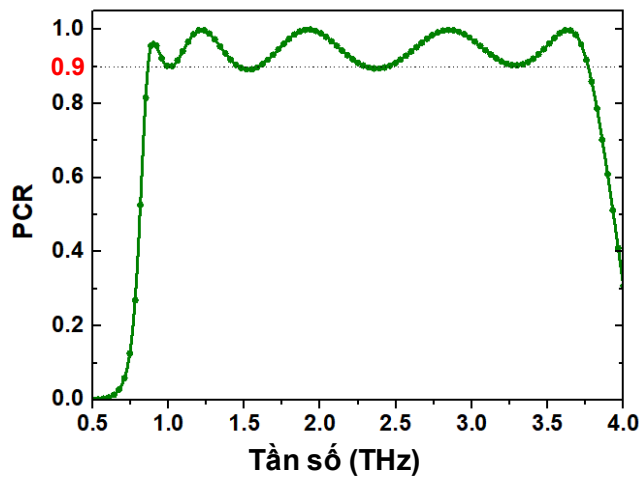
Tại tần số cộng hưởng 1,96 THz, điện trường tập trung chủ yếu ở hai mặt vòng trong của bộ cộng hưởng hình hoa như thể hiện trên Hình 4.24(a) và (c). Điện trường này được định vị bên trong vòng trong, tạo ra cộng hưởng thông qua chế độ lưỡng cực điện tương ứng của vòng trong. Tại tần số cộng hưởng 3,09 THz, điện trường chủ yếu tập trung ở các cánh bên ngoài của bộ cộng hưởng như thể hiện trên Hình 4.24(b). Tại tần số này, điện trường có sự liên kết chặt chẽ với các cánh của các ô đơn vị lân cận, hình thành cộng hưởng thông qua các lưỡng cực điện xảy ra giữa các cánh của các ô đơn vị gần nhau.

4.2.3. Khảo sát tính chất của MFM tích hợp VO₂ ở chế độ chuyển đổi phân cực

Khi VO₂ ở trạng thái cách điện với $\sigma = 200$ S/m, toàn bộ các lớp của tầng trên,

bao gồm lớp cấu trúc tuần hoàn VO_2 , lớp polyimide và lớp VO_2 ở giữa, đều hoạt động như là vật liệu điện môi. Điều này cho phép sóng điện từ truyền qua tầng thứ hai mà không bị cản trở. Tại bề mặt tầng thứ hai, sóng điện từ tương tác với cấu trúc bề mặt cộng hưởng, bao gồm mẫu kim loại hình trụ kép đối xứng qua đường chéo của ô cơ sở. Cấu trúc này tạo ra hiện tượng chuyển đổi phân cực chéo, như được mô tả trong Hình 4.25.

Kết quả cho thấy cấu trúc được thiết kế đạt hiệu suất chuyển đổi phân cực trên 90% trong một dải tần số siêu băng rộng từ 1,04 đến 3,75 THz, với tỉ số băng thông RBW lên tới 113%. Hiệu suất này khẳng định khả năng hoạt động hiệu quả của cấu trúc trong chế độ chuyển đổi phân cực, đồng thời mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống điều khiển và xử lý sóng THz.

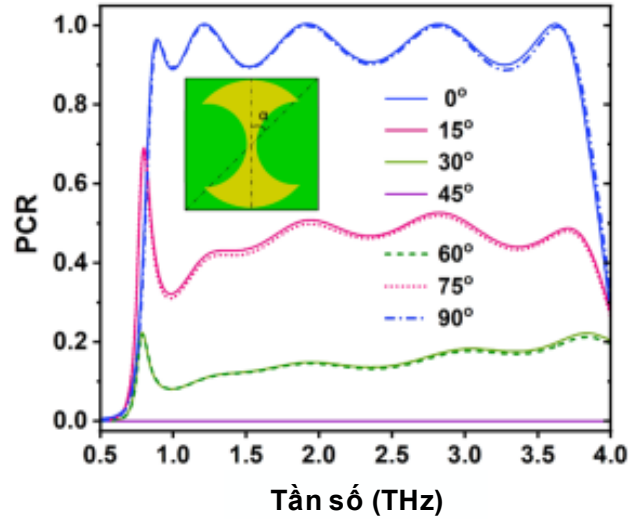


Hình 4.25. Phổ hiệu suất chuyển đổi phân cực mô phỏng khi VO_2 ở pha điện môi

Ngoài ra, tại năm đỉnh cộng hưởng ở các tần số 0,89 THz, 1,22 THz, 1,91 THz, 2,83 THz và 3,63 THz, hiệu suất chuyển đổi phân cực đạt gần bằng 100%. Đây là một đặc điểm quan trọng, cho thấy khả năng chuyển đổi phân cực gần như hoàn hảo tại các tần số này. Điều này nhấn mạnh hiệu quả vượt trội của cấu trúc được thiết kế, đặc biệt trong việc tạo ra hiện tượng chuyển đổi phân cực băng rộng.

Ảnh hưởng của phương hướng tấm cộng hưởng vàng đối với hiệu suất chuyển đổi phân cực đã được khảo sát thông qua nghiên cứu phổ hiệu suất chuyển đổi phân cực của cấu trúc MFM được đề xuất với các góc quay (α) khác nhau trong điều kiện bình thường. Kết quả được trình bày trong Hình 4.26 cho thấy: Do cấu trúc không đối xứng, MFM đạt hiệu suất chuyển đổi phân cực khác nhau đối với các phân cực TE và TM khi góc quay thay đổi. Hiệu suất chuyển đổi giảm dần khi góc quay tăng từ 0 đến 45°, sau đó lại tăng lên khi góc quay tăng từ 45° đến 90°. Hiệu suất chuyển

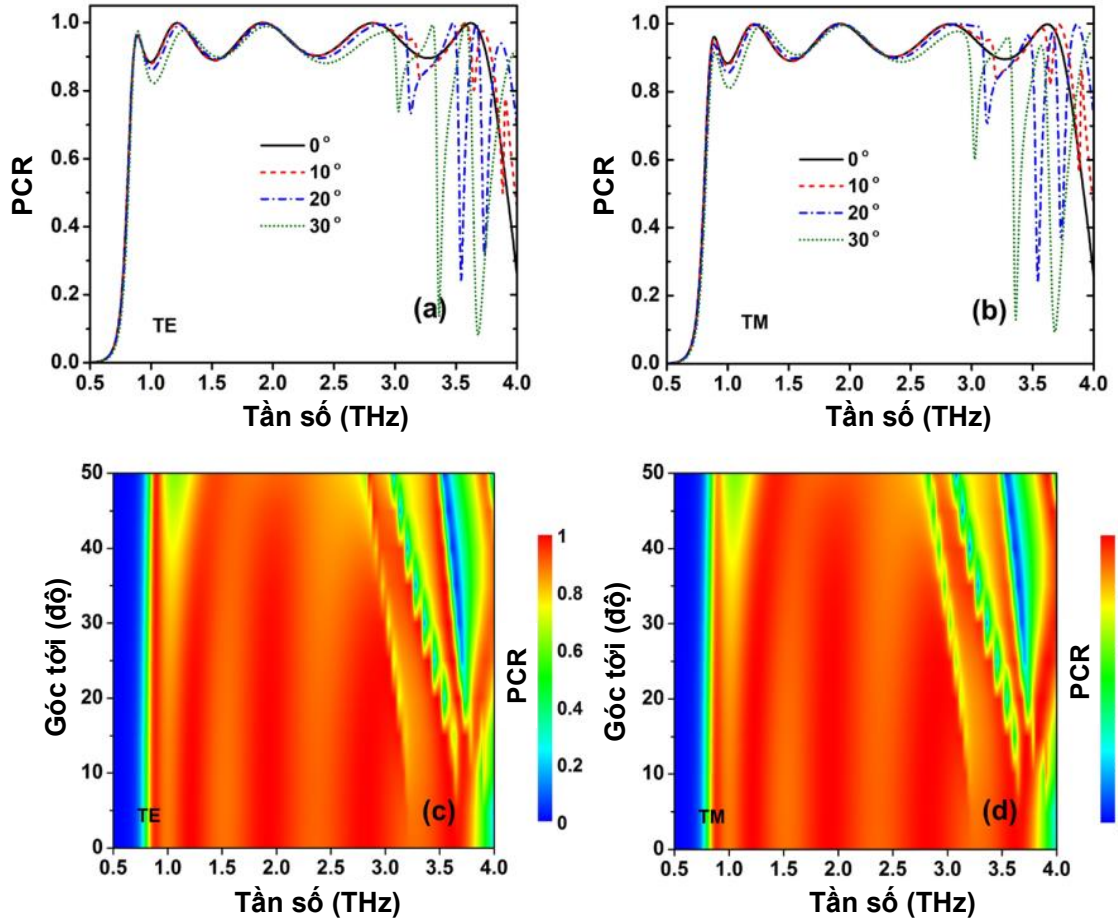
đôi phân cực gần như không đổi đối với các góc quay lần lượt là 0° và 90° , 15° và 75° , và 30° và 60° và băng thông hoạt động gần như không đổi khi góc quay thay đổi. Kết quả thu được cho thấy hiệu suất chuyển đổi cao nhất có thể đạt được bằng cách thiết kế miếng cộng hưởng của MPC theo đường chéo của ô đơn vị.



Hình 4.26. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của PCR vào góc quay (α) trong điều kiện sóng tới vuông góc với bề mặt vật liệu (α là góc giữa đường cơ sở dài của lớp cộng hưởng vàng và đường chéo của ô đơn vị)

Tiếp theo, ảnh hưởng của góc tới sóng điện từ đến hiệu suất chuyển đổi phân cực đã được khảo sát. Kết quả mô phỏng mô tả tác động của sự thay đổi góc tới lên phổ hiệu suất chuyển đổi phân cực dưới cả hai phân cực TE và TM, và được thể hiện trong Hình 4.27.

Cấu trúc được thiết kế cho thấy hiệu suất chuyển đổi ổn định với dung sai góc tới cao ở góc tới lớn từ 0 đến 50° đối với cả hai phân cực TE và TM. Tuy nhiên, băng thông trở nên hẹp hơn ở dải tần số cao khi góc tới tăng, điều này có thể được giải thích chủ yếu là do sự giao thoa triệt tiêu giữa các sóng bị phản xạ tại bề mặt vật liệu, như đã được đề cập trong các nghiên cứu trước đây [146]. Mặc dù vậy, hiệu suất chuyển đổi phân cực vẫn duy trì cao hơn 80% trong dải tần 1,04 – 3,0 THz khi góc tới tăng lên đến 40° . Điều này cho thấy cấu trúc được thiết kế có khả năng duy trì các đặc tính chuyển đổi phân cực tốt ngay cả khi chịu tác động của các góc tới rộng. Đây là một yếu tố quan trọng cho việc ứng dụng cấu trúc này trong các hệ thống sóng điện từ, nơi các góc tới có thể thay đổi trong quá trình hoạt động.



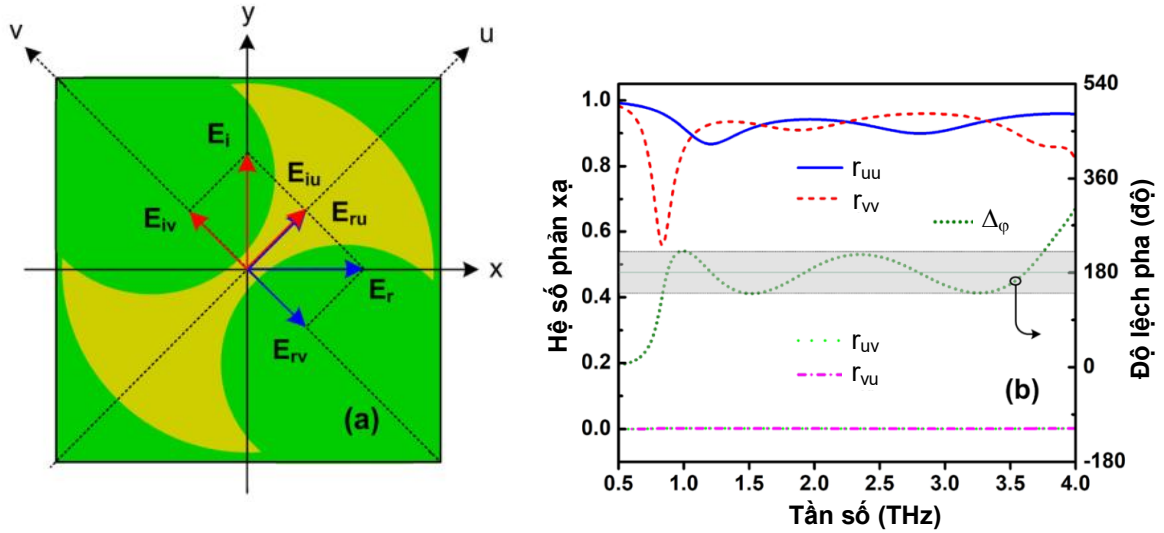
Hình 4.27. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của PCR vào góc tới của MFM được đề xuất hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực: (a, c) chế độ TE và (b, d) chế độ TM

Để nghiên cứu nguyên lý hoạt động của MFM ở chế độ chuyển đổi phân cực, chúng tôi tiến hành phân tích trong hệ tọa độ uv , như được trình bày trên Hình 4.28(a). Sóng điện từ tới phân cực y (E_i) có thể được phân tách thành hai phần trực giao của E_{iu} và E_{iv} trong hệ tọa độ uv .

Do hình dạng không đối xứng của cấu trúc được đề xuất cho chế độ chuyển đổi phân cực, cường độ và pha của sóng phản xạ theo hướng u và v là khác nhau.

Như đã thấy trong Hình 4.28(a), sự tổng hợp của E_{ru} và E_{rv} sẽ định hướng dọc theo trục x nếu $r_{uu} = r_{vv} = 1$, $r_{uv} = r_{vu} = 0$ và $\Delta\varphi = |\varphi_{uu} - \varphi_{vv}| = \pi + 2k\pi$. Do đó, các hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực vuông góc cũng như độ lệch pha của đáp ứng phản xạ đồng phân cực so với tần số được nghiên cứu như trong Hình 4.28(b). Kết quả cho thấy rằng cường độ của phản xạ đồng phân cực và phản xạ vuông góc gần bằng 0 và 1, tương ứng trên toàn dải tần. Trong khi đó, độ lệch pha dao động quanh $180 \pm 40^\circ$ và bằng 180° ở chính xác năm tần số cộng hưởng. Điều này chứng minh rằng cấu trúc được thiết kế có đặc tính chuyển đổi phân cực chéo băng thông rộng và

hiệu quả cao.

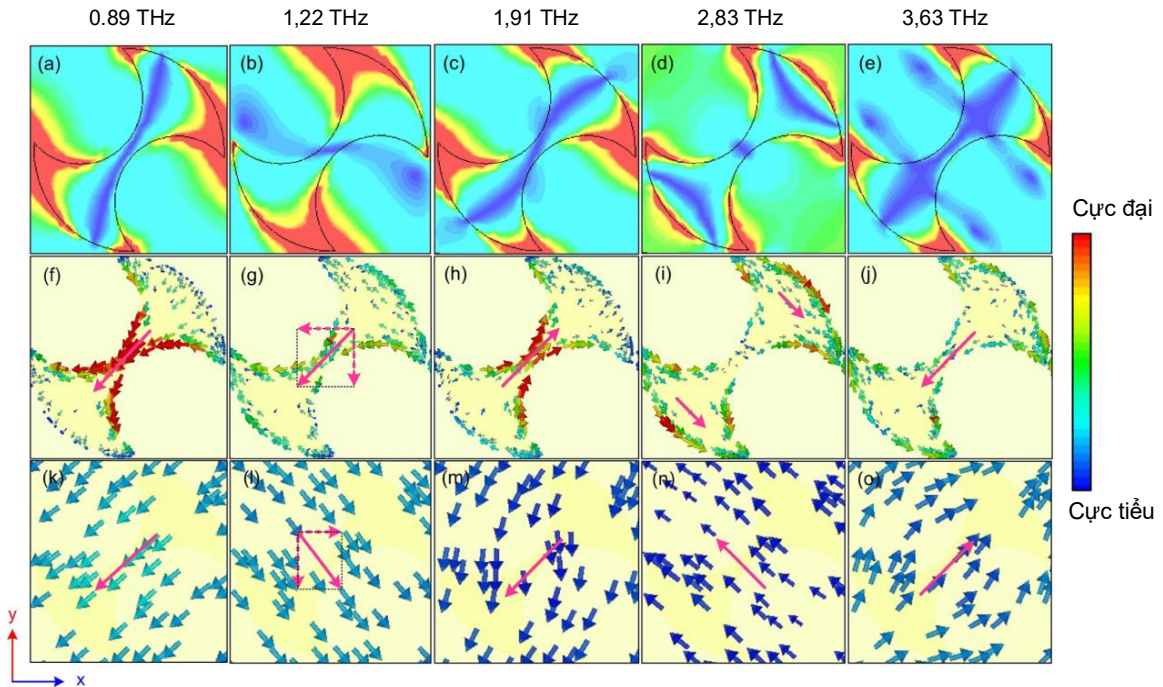


Hình 4.28. (a) Sơ đồ phân tách điện trường tới và điện trường phản xạ theo trục u , v , (b) độ lớn của hệ số phản xạ và độ lệch pha của hệ số phản xạ theo hai thành phần uu và vv .

Nguồn gốc của cơ chế vật lý của chuyển đổi phân cực là một vấn đề quan trọng, cho dù đó là do cộng hưởng điện và/hoặc từ gây ra. Để hiểu rõ hơn về cơ chế vật lý của cấu trúc được thiết kế, điện trường và sự phân bố dòng điện bề mặt trên cấu trúc MFM trong chế độ chuyển đổi phân cực được mô phỏng ở các tần số cộng hưởng. Như thể hiện trong các Hình 4.29(a) - 4.29(e), điện trường chủ yếu được định vị ở các cạnh trục của cấu trúc. Hơn nữa, tại một tần số xác định, điện trường tập trung vào một phần nhất định của cấu trúc MFM.

Tiếp theo, để làm rõ hơn bản chất của quá trình chuyển đổi phân cực khi sóng điện từ tương tác với MFM, tiến hành mô phỏng và biểu diễn sự phân bố dòng điện bề mặt lớp kim loại vàng phía trên và lớp kim loại vàng phía dưới ở năm tần số cộng hưởng như thể hiện trong Hình 4.29(f) – 4.29(o). Kết quả mô phỏng cho thấy, ở các tần số cộng hưởng cao hơn như 1,91 THz, 2,83 THz và 3,63 THz, dòng điện ở bề mặt lớp trên là ngược chiều với dòng điện ở bề mặt lớp dưới tạo thành một vòng lặp dòng điện hiệu dụng, gây ra một mômen lưỡng cực từ mạnh vuông góc với bề mặt, điều này cho thấy các cộng hưởng tại các tần số này bắt nguồn từ cơ chế cộng hưởng từ. Trong khi đó, ở tần số thấp nhất là 0,89 GHz, dòng điện ở bề mặt lớp trên song song với dòng điện ở bề mặt lớp dưới. Sự phân bố dòng điện này tương ứng như một lưỡng cực điện, cho thấy cơ chế cộng hưởng tại tần số này là cộng hưởng điện. Tuy nhiên, ở tần số cộng hưởng 1,22 THz, sự tổng hợp của các dòng điện trên bề mặt lớp trên và

lớp dưới là song song và song song theo các trục x và y tương ứng. Do đó, tần số cộng hưởng này là sự kết hợp giữa cộng hưởng từ và cộng hưởng điện. Dựa trên các kết quả quan sát được, có thể kết luận rằng cơ chế chuyển đổi phân cực băng rộng là do sự kết hợp của đa cộng hưởng được tạo ra bởi cả cộng hưởng điện và từ.



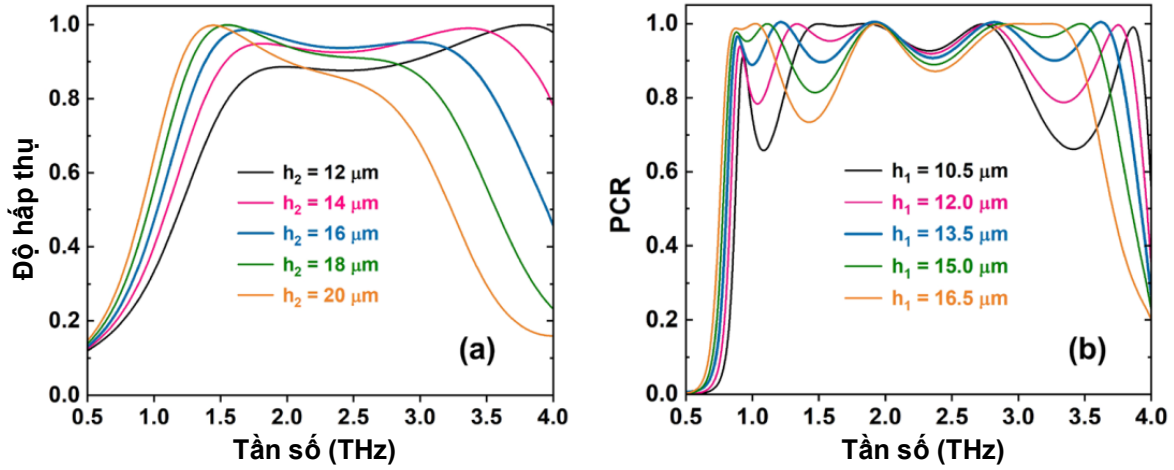
Hình 4.29. (a–e) phân bố điện trường mô phỏng và phân bố dòng điện mô phỏng: (f–j) ở bề mặt lớp trên cùng và (k–o) ở bề mặt lớp dưới cùng của MFM hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực tại các tần số cộng hưởng

4.2.4. Khảo sát ảnh hưởng của tham số cấu trúc và các lớp vật liệu lên tính chất hấp thụ và chuyển đổi phân cực

Để tối ưu hóa thiết kế và đạt được hiệu suất hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực cao nhất, các thông số của cấu trúc đề xuất đã được khảo sát thông qua phần mềm mô phỏng CST. Hình 4.30 trình bày kết quả khảo sát ảnh hưởng của các thông số cấu trúc đến hiệu suất hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực của MFM đề xuất.

Đầu tiên, phổ hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực được khảo sát với các giá trị khác nhau của độ dày lớp điện môi (h_2 và h_1) trong khi giữ nguyên các thông số còn lại của cấu trúc. Kết quả thể hiện trong Hình 4.30 cho thấy sự thay đổi của các giá trị h_2 và h_1 lần lượt ảnh hưởng đến hiệu suất hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi của MFM. Khi thay đổi giá trị h_2 , cả cường độ hấp thụ và phổ hấp thụ đều thay đổi, như mô tả trong Hình 4.30(a). Việc tăng giá trị h_2 dẫn đến sự thay đổi trong phổ hấp thụ. Giá trị tối ưu của h_2 được chọn là 16 μm để đạt được cả độ hấp thụ cao nhất và băng

thông rộng nhất. Khi giá trị h_1 thay đổi, hiệu suất chuyển đổi và dải tần đều thay đổi, như thể hiện trong Hình 4.30(b). Với giá trị h_1 là $13,5 \mu\text{m}$, hiệu suất chuyển đổi được tối ưu hóa.

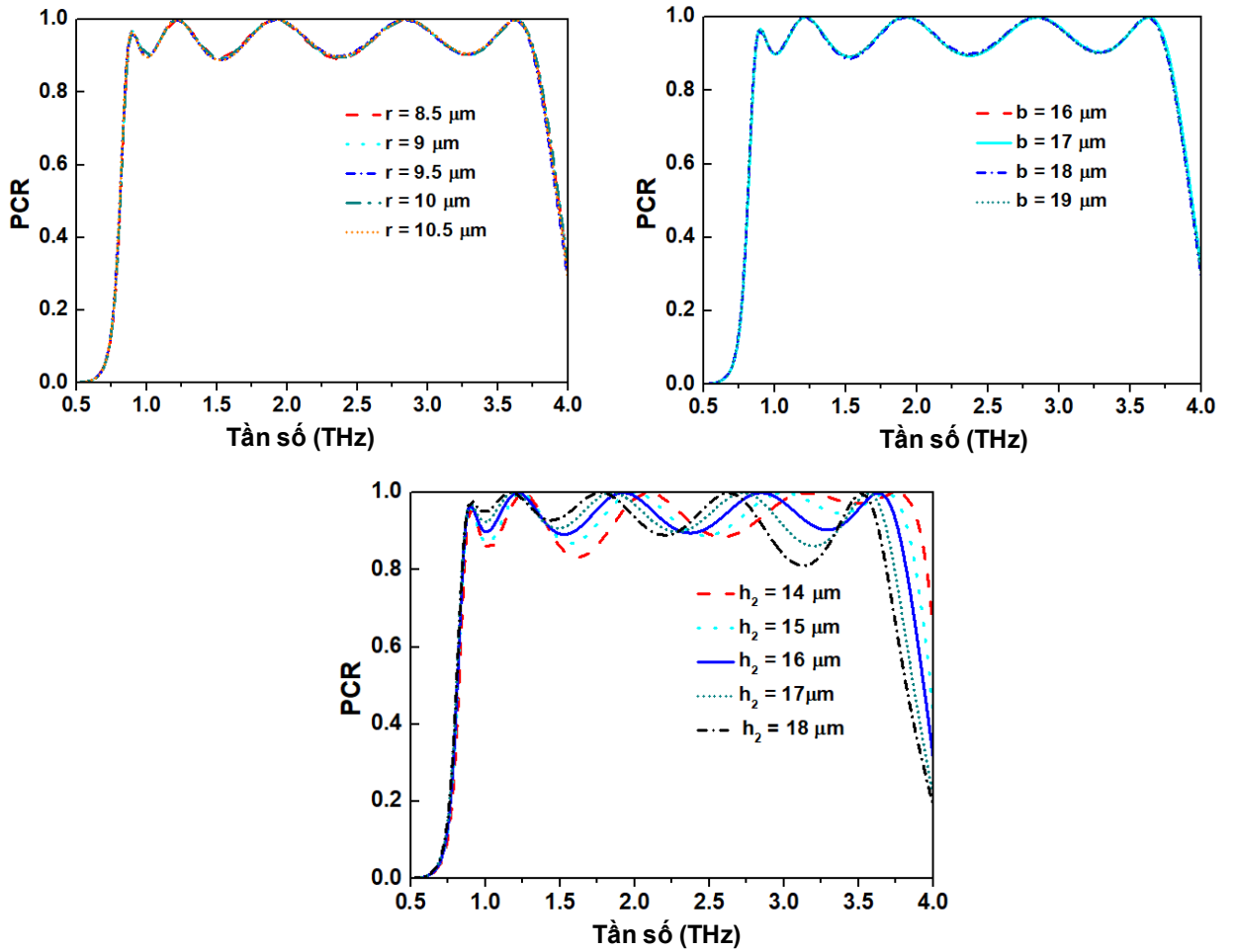


Hình 4.30. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của hiệu suất hấp thụ và chuyển đổi phân cực vào độ dày của các lớp điện môi: (a) h_2 và (b) h_1 .

Kết quả khảo sát này chỉ ra rằng, việc điều chỉnh độ dày của các lớp điện môi là yếu tố quan trọng trong việc tối ưu hóa hiệu suất hấp thụ và chuyển đổi phân cực của cấu trúc, giúp nâng cao hiệu quả hoạt động của MFM trong ứng dụng tần số THz.

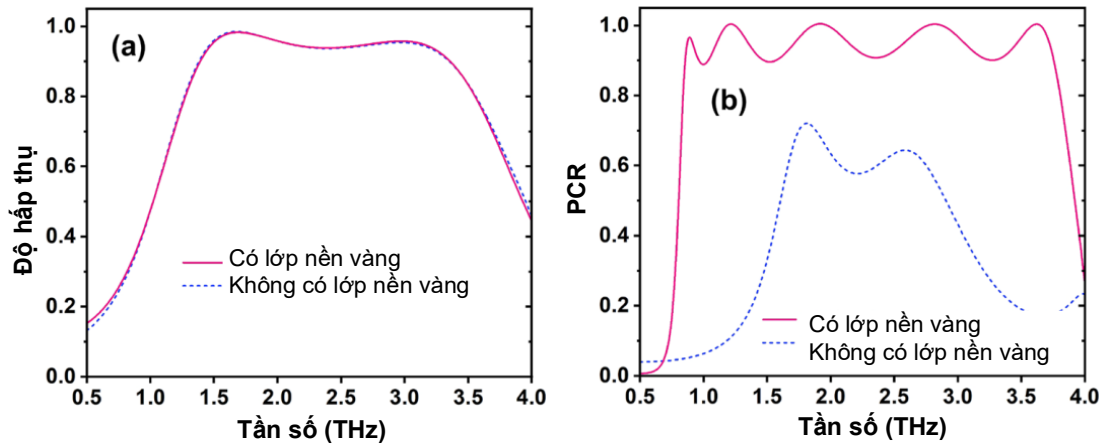
Do cấu trúc của MFM bao gồm hai tầng, trong đó tầng trên được thiết kế để thực hiện chức năng hấp thụ và tầng dưới được thiết kế để thực hiện chức năng chuyển đổi phân cực, vì vậy, chúng tôi tiến hành khảo sát ảnh hưởng của các thông số tầng trên đến hiệu suất của tầng dưới. Cụ thể, để khảo sát hiệu suất chuyển đổi phân cực, chúng tôi giữ nguyên kích thước P và giá trị các thông số của tầng dưới, đồng thời thay đổi các thông số như kích thước các thông số r và b của lớp cộng hưởng VO_2 , độ dày lớp điện môi h_2 của tầng trên, và tiến hành mô phỏng.

Kết quả mô phỏng thể hiện trên Hình 4.31 cho thấy: khi giá trị r , b của VO_2 thay đổi, hiệu suất chuyển đổi phân cực của MFM gần như giữ nguyên, không có sự thay đổi đáng kể. Trong khi đó, hiệu suất chuyển đổi phân cực có sự thay đổi đáng kể cả về hiệu suất chuyển đổi lẫn băng thông hoạt động khi độ dày của lớp điện môi Polyimide (h_2) thay đổi. Các kết quả khảo sát này chỉ ra rằng độ dày của lớp điện môi h_2 có tác động mạnh mẽ đến hiệu suất chuyển đổi phân cực của cấu trúc MFM. Do đó, khi tiến hành tối ưu các thông số của lớp dưới nhằm đạt hiệu suất chuyển đổi phân cực cao nhất và băng thông rộng nhất, chúng tôi đã tối ưu các thông số của lớp trên và giữ cố định chúng, sau đó tiếp tục tối ưu các thông số của lớp dưới.



Hình 4.31. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của các thông số tầng trên đến hiệu suất hoạt động của tầng dưới (a) khoảng cách từ tâm đến rìa bên trong hình hoa, (b) khoảng cách từ tâm đến đỉnh hình hoa và (c) độ dày lớp điện môi tầng trên

Để nghiên cứu ảnh hưởng của lớp nền kim loại vàng liên tục (lớp dưới cùng của cấu trúc) đến hiệu suất của cấu trúc MMs đề xuất cho cả chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực, phổ hấp thụ và chuyển đổi phân cực của cấu trúc được đề xuất trong trường hợp có và không có lớp vàng được mô phỏng và kết quả được minh họa trong Hình 4.32(a) và (b). Như đã thấy trong Hình 4.32(a), phổ hấp thụ không bị thay đổi khi loại bỏ lớp nền vàng, chứng tỏ rằng tấm kim loại VO_2 có thể chặn sóng điện từ. Sóng điện từ được hấp thụ trong ngăn đầu tiên của bộ cộng hưởng kim loại với cấu trúc hình VO_2 - lớp điện môi - lớp kim loại VO_2 . Ngược lại, trong Hình 4.32(b), khi lớp nền vàng bị loại bỏ, hiệu suất chuyển đổi phân cực giảm mạnh. Điều này chứng tỏ rằng lớp nền vàng đóng một vai trò quan trọng trong việc ngăn chặn sự truyền sóng điện từ, từ đó cải thiện sóng phản xạ khi MMs hoạt động trong chế độ chuyển đổi phân cực. Lớp vàng giúp tạo ra các hiệu ứng phản xạ mạnh mẽ, góp phần vào hiệu suất chuyển đổi phân cực cao của cấu trúc MFM khi lớp vàng tồn tại.



Hình 4.32. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của lớp nền kim loại vàng đến hiệu suất của MFM trong (a) chế độ hấp thụ và (b) chế độ chuyển đổi phân cực.

Cuối cùng, chúng tôi so sánh MFM đề xuất với các công bố khác gần đây nhằm đánh giá hiệu quả của thiết kế. Bảng 4.3 so sánh hiệu suất hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực của MFM đề xuất với các MFM tiên tiến được công bố gần đây hoạt động trong vùng tần số THz.

Bảng 4.3. So sánh hiệu suất của MFM đề xuất hoạt động vùng tần số THz với các cấu trúc MFM tiên tiến hoạt động vùng tần số THz được công bố gần đây

Tài liệu	Chức năng	Dải tần làm việc (THz)	Hiệu suất (%)	RBW (%)	Vật liệu tích hợp
[26]	Hấp thụ	1,54 – 4,54	> 80	96	Graphene
	Chuyển đổi phân cực	2,11 – 3,63	> 90	53	
[33]	Hấp thụ	0,52 – 1,2	> 90	79	VO ₂
	Chuyển đổi phân cực	0,42 – 10,4	> 90	85	
[34]	Hấp thụ	6,3 – 15,0	> 90	82	VO ₂
	Chuyển đổi phân cực	10,8 – 14,4	> 90	57	
[37]	Hấp thụ	0,74 – 1,62	> 90	75	VO ₂
	Chuyển đổi phân cực	1,47 – 2,27	> 70	86	
Thiết kế đề xuất	Hấp thụ	1,36 – 3,38	> 90	85	VO₂
	Chuyển đổi phân cực	1,04 – 3,75	> 90	113	

Kết quả cho thấy, MFM đề xuất có hiệu suất đồng thời cao trên dải băng thông rộng vượt trội hơn so với các MFM tiên tiến hoạt động vùng tần số THz công bố gần

đây. Điều này có thể cung cấp một cách tiếp cận mới để thiết kế cấu trúc có hiệu suất cao và tiềm năng cho các ứng dụng trong vùng tần số THz. Mặc dù vậy, do VO_2 là vật liệu có tuổi thọ vật lý giới hạn do sự thay đổi pha liên tục có thể dẫn đến nứt vỡ mô, suy giảm tính năng điện sau nhiều chu kỳ hoạt động. Ngoài ra, VO_2 dễ bị oxy hóa hoặc bị phân hủy nếu không được bảo vệ đúng cách, gây ảnh hưởng đến độ dẫn điện và hiệu suất hoạt động. Vì vậy, để ứng dụng cấu trúc thành công trong thực tiễn, cần nghiên cứu tích hợp thêm lớp bảo vệ cho VO_2 .

4.3. Kết luận chương 4

Trong chương này, luận án đã thiết kế và khảo sát tính chất của các MFM có khả năng chuyển đổi hoạt động ở chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ. Hai cấu trúc được đề xuất bao gồm: một cấu trúc tích hợp nước hoạt động vùng tần số GHz và một cấu trúc tích hợp VO_2 hoạt động vùng tần số THz, nhằm khai thác các đặc tính điều chỉnh điện từ của chúng để chuyển đổi giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực. Trong đó cấu trúc MFM tích hợp nước được nghiên cứu cả mô phỏng và thực nghiệm.

Kết quả mô phỏng và đo đạc bằng thực nghiệm cho thấy, MFM tích hợp nước có thể chuyển đổi hoạt động giữa chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực. Trong đó, vật liệu nước đóng vai trò trong việc chuyển đổi giữa hai chế độ. Khi có nước, MFM đề xuất đạt hiệu suất hấp thụ trên 90% trong dải tần rộng từ 16,4 - 24 GHz và độ hấp thụ trên 80% ở cả hai chế độ TE và TM với góc tới tăng đến 35° . Khi không có nước, MFM đề xuất đạt hiệu suất chuyển đổi phân cực trên 90% trong dải tần số rộng từ 4,38 GHz - 11,9 GHz, tỉ số băng thông đạt 92,4%.

Kết quả mô phỏng MFM tích hợp vật liệu chuyển pha kim loại - điện môi VO_2 cho thấy, VO_2 đóng vai trò trong việc chuyển đổi giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực của cấu trúc. Khi VO_2 ở pha kim loại, cấu trúc MFM đề xuất hoạt động ở chế độ hấp thụ và độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần 1,36 - 3,38 THz, băng thông lên tới 85%. Khi VO_2 ở pha điện môi, cấu trúc MFM đề xuất hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực vuông góc và hiệu suất chuyển đổi phân cực đạt trên 90% trong dải tần rộng 1,04 - 3,75 THz với tỉ lệ băng thông tương đối RBW lên tới 113%. Các tính chất hấp thụ và chuyển đổi phân cực đã được phân tích kỹ lưỡng, giải thích làm rõ nguyên lý của quá trình hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ của MFM đề xuất.

Các kết quả nghiên cứu được so sánh với một số kết quả nghiên cứu được công bố gần đây về MFM, cho thấy các cấu trúc MFM đề xuất trong luận án có những đặc tính vượt trội, đặc biệt là trong việc thiết kế các MFM băng rộng, hiệu suất cao và ít phụ thuộc vào góc tới và góc phân cực.

Ngoài ra, nghiên cứu cũng chỉ ra rằng việc tối ưu hóa hình học và vật liệu của các cấu trúc có thể cải thiện đáng kể hiệu suất hấp thụ và độ rộng băng thông hoạt động. Những phát hiện này không chỉ mở ra hướng phát triển mới cho các vật liệu biến hóa đa chức năng mà còn cung cấp nền tảng quan trọng cho ứng dụng trong các hệ thống hấp thụ sóng điện từ điều chỉnh được, cảm biến và các thiết bị quang điện tiên tiến.

Kết quả nghiên cứu trình bày trong Chương 4 gồm 02 bài báo được đăng trên tạp chí SCIE. Cụ thể là công trình số 3, 6 trong Danh mục các công trình công bố của luận án.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Luận án *“Nghiên cứu cấu trúc và tính chất của vật liệu biến hóa đa chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ”* đã được thực hiện tại Viện Khoa học vật liệu và Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Những kết quả chính của luận án đã được công bố gồm: 04 bài trên tạp chí SCI-E, 02 bài trên tạp chí quốc gia trong danh mục tính điểm của Hội đồng Giáo sư Nhà nước.

Với mục tiêu của luận án là thiết kế và phát triển các vật liệu MFM có khả năng chuyển đổi giữa chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ, đồng thời mở rộng ứng dụng của chúng trong các dải tần số từ GHz đến THz. Luận án đã sử dụng kết hợp các phương pháp bao gồm: tính toán lí thuyết, mô phỏng khảo sát tính chất điện từ của vật liệu, phương pháp chế tạo mẫu vật liệu bằng kĩ thuật quang khắc, phương pháp in 3D và đo đạc bằng máy phân tích mạng Vector Network Analyzer. Các kết quả chính của luận án đạt được bao gồm:

1. Đã thiết kế và khảo sát tính chất của cấu trúc MMs có đặc tính hấp thụ sử dụng cấu trúc đĩa tròn khoét lỗ hình vuông tích hợp vật liệu chuyển pha VO₂ hoạt động vùng tần số THz. Cấu trúc đạt được phổ hấp thụ hiệu suất cao băng thông rộng dựa trên nguyên lí phối hợp trở kháng giữa vật liệu và môi trường truyền. Cấu trúc đề xuất có khả năng chuyển đổi giữa hai chế độ hấp thụ và phản xạ tương ứng với khi VO₂ ở pha kim loại và khi VO₂ ở pha điện môi. Khi VO₂ ở pha kim loại, MA thực hiện hấp thụ sóng điện từ với độ hấp thụ đạt trên 90% trong băng thông rộng từ 1,29 - 3,26 THz. Ngoài ra, độ hấp thụ của MA có thể thay đổi được bằng cách thay đổi độ dẫn của VO₂.

2. Đã thiết kế và khảo sát tính chất của các MMs có đặc tính chuyển đổi phân cực với cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh hoạt động ở các băng tần S (2 - 4 GHz), C (4 - 8 GHz), X (8 - 12 GHz), Ku (12- 18 GHz) và vùng tần số THz. MPC thiết kế hoạt động ở băng tần S, C có hiệu suất chuyển đổi phân cực trên 90% trong dải tần từ 2 - 8,45 GHz, độ rộng băng thông tương đối đạt 123,4%, cấu trúc MPC hoạt động băng tần C, X, Ku có hiệu suất chuyển đổi trên 93% trong dải tần từ 4,0 đến 14 GHz, độ rộng băng thông tương đối đạt tới 111,1%, MPC hoạt động ở dải tần THz có hiệu suất chuyển đổi trên 93% trong dải tần từ 1,6 THz đến 5,8 THz với độ rộng băng thông tương đối là 113,5%. Ngoài ra, đã chế tạo thành công MPC hoạt động băng tần S, C và MPC hoạt động băng tần C, X, Ku và khảo sát đặc trưng điện từ của mẫu cho thấy kết quả tương đồng giữa mô phỏng và thực nghiệm.

3. Đã thiết kế và chế tạo thành công MFM tích hợp nước có khả năng chuyển đổi giữa hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số GHz. Khi có nước, MFM đề xuất hoạt động ở chế độ hấp thụ với hiệu suất hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần rộng từ 16,4 - 24 GHz và độ hấp thụ trên 80% ở cả hai chế độ TE và TM với góc tới tăng đến 35° . Khi không có nước, MFM đề xuất hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực vuông góc với hiệu suất chuyển đổi phân cực đạt trên 90% trong dải tần số rộng từ 4,38 GHz - 11,9 GHz, tỉ số băng thông đạt 92,4%.

4. Đã thiết kế và khảo sát tính chất của cấu trúc MFM tích hợp vật liệu chuyển pha VO_2 có khả năng chuyển đổi giữa chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số THz. Khi VO_2 ở pha kim loại, cấu trúc MFM đề xuất hoạt động ở chế độ hấp thụ với độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần 1,36 – 3,38 THz, tỉ số băng thông đạt 85%. Khi VO_2 ở pha điện môi, cấu trúc MFM đề xuất hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực vuông góc với hiệu suất chuyển đổi phân cực đạt trên 90% trong dải tần rộng 1,04 - 3,75 THz, tỉ số băng thông đạt 113%.

Các kết quả nghiên cứu đạt được của luận án có khả năng ứng dụng trong các thiết bị anten mạng di động 5 G, 6 G, các thiết bị tàng hình trong quân sự, nâng cao chất lượng hình ảnh trong các thiết bị y tế,... Bên cạnh đó, kết quả luận án góp phần mở rộng nghiên cứu về vật liệu biến hóa nói chung và vật liệu biến hóa đa chức năng nói riêng, làm tài liệu tham khảo cho các nhà khoa học, sinh viên, học viên nghiên cứu về vật liệu biến hóa.

2. Kiến nghị

Dựa trên những kết quả nghiên cứu đã được trình bày, luận án đề xuất một số kiến nghị để mở rộng và hoàn thiện hơn nữa nội dung nghiên cứu như sau:

- Tiếp tục nghiên cứu, cải tiến cấu trúc MFM hoạt động ở vùng tần số cao hơn như vùng hồng ngoại, vùng ánh sáng nhìn thấy.
- Nghiên cứu khả năng điều khiển tính chất của MFM thông qua các yếu tố kích thích như điện trường, từ trường hoặc quang học, từ đó mở ra tiềm năng cho các ứng dụng trong thực tế.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN

1. **Nguyen Thi Minh**, Nguyen Thi Kim Thu, Phan Duy Tung, Le Dac Tuyen, Vu Dinh Lam, Nguyen Thi Quynh Hoa, & Kim Jung Mu, 2022, Ultra-wideband and lightweight electromagnetic polarization converter based on multiresonant metasurface. *IEEE Access*, 10, 92097-92104.
2. **Nguyen Thi Minh**, Phan Huu Lam, Vu Dinh Lam, Nguyen Thi Quynh Hoa, & Kim Jung Mu, 2022, Ultra-wideband and high-efficiency cross-polarization conversion using a double split ring shaped metasurface for C, X, and Ku-band applications. *AIP Advances*, 12 (11).
3. **Nguyen Thi Minh**, Vu Dinh Lam, Nguyen Thi Quynh Hoa, & Kim Jung Mu, 2022. Reconfigurable broadband metasurfaces with nearly perfect absorption and high efficiency polarization conversion in THz range. *Scientific Reports*, 12(1), 18779.
4. **Nguyen Thi Minh**, Nguyen Thi Kim Thu, Nguyen Thi Hong Van, Nguyen Thi Minh Tam, Ho Thi Huyen Thuong, Phan Duy Tung, Vu Dinh Lam & Nguyen Thi Quynh Hoa, 2022. Metal-dielectric phase transition of VO₂ assisted broadband and high-efficiency bifunctional metasurface in the terahertz frequency. *Vietnam Journal of Science and Technology* 60 (5).
5. **Nguyen Thi Minh**, Phan Huu Lam, Nguyen Hong Quang, Cao Thanh Nghia, Luong Ngoc Minh, Nguyen Thi Kim Thu, Nguyen Thi Minh Tam, Ho Thi Huyen Thuong & Nguyen Thi Quynh Hoa, 2023. A simple design of broadband cross-polarization converter for the THz frequency range. *Vinh University Journal of Science*, 52.
6. Nguyen Thi Quynh Hoa, Phan Huu Lam, **Nguyen Thi Minh**, Nguyen Ngoc Hieu, Le Dac Tuyen, Bui Xuan Khuyen, Vu Dinh Lam & Kim Jung Mu, 2024, Switchable bi-functional water-based metasurface for high efficiency and wideband polarization conversion and absorption. *Optical Materials*, 115682.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Landy N.I., Sajuyigbe S., Mock J.J., Smith D.R., and Padilla W.J., 2008, Perfect metamaterial absorber, *Physical Review Letters*, 100(20), pp. 207402.
2. Duan Z., Tang X., Wang Z., Zhang Y., Chen X., Chen M., and Gong Y., 2017, Observation of the reversed Cherenkov radiation, *Nature Communications*, 8(1), pp. 14901.
3. Seddon N., and Bearpark T., 2003, Observation of the inverse Doppler effect, *Science*, 302(5650), pp. 1537-1540.
4. Anh D.T., Viet D.T., Trang P.T., Thang N.M., Quy H.Q., Hieu N.V., Lam V.D., and Tung N.T., 2015, Taming electromagnetic metamaterials for isotropic perfect absorbers, *AIP Advances*, 5(7).
5. Peng L., Jiang X., and Li S.M., 2018, Multi-functional device with switchable functions of absorption and polarization conversion at terahertz range, *Nanoscale research letters*, 13, pp. 1-9.
6. Peng L., Li X.F., Gao X., Jiang X., and Li S.M., 2019, Methodology for the design of a multi-functional device with switchable absorption and polarization conversion modes by graphene and metallic metasurfaces, *Optical Materials Express*, 9(2), pp. 687-705.
7. Song Z., and Zhang J., 2020, Achieving broadband absorption and polarization conversion with a vanadium dioxide metasurface in the same terahertz frequencies, *Optics express*, 28(8), pp. 12487-12497.
8. Pham T.S., Zheng H., Chen L., Khuyen B.X., and Lee Y., 2024, Wide-incident-angle, polarization-independent broadband-absorption metastructure without external resistive elements by using a trapezoidal structure, *Scientific Reports*, 14(1), pp. 10198.
9. Hua J., and He X., 2024, Broadband metamaterial linear polarization converter designed by a hybrid neural network with data augmentation, *AIP Advances*, 14(9).
10. Xuan K.B., Tung B.S., Lam V.D., and Tung N.T., 2021, Origami-based stretchable bi-functional metamaterials: reflector and broadband absorber, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(16), pp. 165111.
11. Liu Y., Huang X., Yang H., Hua L., and Lei Y., 2020, Zigzag reflective multifunctional metamaterial absorber and polarization rotator with horizontal strip structure, *Physica Scripta*, 95(8), pp. 085510.

12. Dutta R., Mitra D., and Ghosh J., 2020, Dual-band multifunctional metasurface for absorption and polarization conversion, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(7), pp. e22200.
13. Zhou Y., Cao X., Gao J., Yang H., Zheng Y., and Li S., 2018, A multifunctional metasurface with integrated absorption and polarization rotation, *Materials Research Express*, 6(1), pp. 015802.
14. Long L.V., Dung D.N., Son P.T., Tung N.T., Hanh V.T.H., Ha D.T., and Lam V.D., 2023, Robust reversion of dual-band polarization conversion and absorption based on flexible metamaterial, *Journal of the Physical Society of Japan*, 92(2), pp. 024801.
15. Cao M., Wang J., Yuen M.M., and Yan D., 2022, Realization of multifunctional metamaterial structure based on the combination of vanadium dioxide and graphene, *Nanomaterials*, 12(16), pp. 2883.
16. Xiao B., Wang X., and Gao M., 2021, Research on VO₂-based Absorbing/Polarization Conversion Terahertz 6G Communication Devices. pp. 1-14.
17. Li Z., Yang R., Wang J., Zhao Y., Tian J., and Zhang W., 2021, Multifunctional metasurface for broadband absorption, linear and circular polarization conversions, *Optical Materials Express*, 11(10), pp. 3507-3519.
18. Li S., Yang H., Yang Y., Li Y., Huang X., Zhang A., and Jin J., 2023, Multifunctional water-based metamaterial with polarization conversion and absorption, *Optics Express*, 31(2), pp. 3336-3348.
19. Jing H., Gao Y., Kang J., Zhao L., Chen L., Duan J., and Zhang B., 2024, Bifunctional integrated metamaterial of water-based broadband absorption and polarization conversion, *Optics & Laser Technology*, 177, pp. 111174.
20. Jia Y., Wang G., Zhang X., Li M., Miao F., and Gao Y., 2023, Terahertz multi-band absorber and dual-bandwidth polarization converter based on VO₂ and graphene, *Results in Physics*, 53, pp. 107006.
21. Trần Văn Huỳnh, 2022, Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ đẳng hướng của MMs trên cơ sở kết hợp với Graphene, Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
22. Đinh Hồng Tiệp, 2020, Nghiên cứu chế tạo vật liệu hấp thụ băng tần rộng vùng GHz trên cơ sở vật liệu biến hóa (metamaterials), Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.

23. Đặng Hồng Lưu, 2018, Nghiên cứu vật liệu biến hóa (metamaterials) hấp thụ sóng điện từ ở vùng tần số THz, Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
24. 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 vật liệu, Học viện Khoa học và Công nghệ.
25. 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 vật liệu điện tử, Học viện Khoa học và Công nghệ.
26. Nguyễn Thị Kim Thu, 2024, Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ bằng rộng sử dụng vật liệu biến hóa tích hợp phần tử tổn hao, Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
27. Bose J.C., 1898, On the rotation of plane of polarisation of electric wave by a twisted structure, *Proceedings of the Royal Society of London*, 63(389-400), pp. 146-152.
28. Lindell I.V., Sihvola A.H., and Kurkijarvi J., 1992, Karl F. Lindman: The last Hertzian, and a harbinger of electromagnetic chirality, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 34(3), pp. 24-30.
29. Veselago V.G., 1967, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , *Usp. fiz. nauk*, 92(3), pp. 517-526.
30. Pendry J.B., Holden A.J., Stewart W.J., and Youngs I., 1996, Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures, *Physical Review Letters*, 76(25), pp. 4773-4776.
31. Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., and Stewart W.J., 1999, Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), pp. 2075-2084.
32. Smith D.R., Padilla W., Vier D.C., Nemat-Nasser S., and Schultz S., 2000, Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity, *Physical review letters*, 84, pp. 4184-7.
33. Amiri M., Tofigh F., Shariati N., Lipman J., and Abolhasan M., 2021, Review on Metamaterial Perfect Absorbers and Their Applications to IoT, *IEEE Internet of Things Journal*, 8(6), pp. 4105-4131.
34. Miliyas C., Andersen R.B., Lazaridis P.I., Zaharis Z.D., Muhammad B., Kristensen J.T., and Hermansen D.D., 2021, Metamaterial-Inspired Antennas:

- A Review of the State of the Art and Future Design Challenges, *IEEE Access*, 9, pp. 89846-89865.
35. Ali Esmail B., Ali Esmail B., Majid H.A., Zainal Abidin Z., Haimi Dahlan S., Himdi M., Dewan R., and Al-Fadhali N., 2020, Reconfigurable radiation pattern of planar antenna using metamaterial for 5G applications, *Materials*, 13(3), pp. 582.
 36. Agarwal S., and Prajapati Y.K., 2019, Multifunctional metamaterial surface for absorbing and sensing applications, *Optics Communications*, 439, pp. 304-307.
 37. Tadesse A.D., Acharya O.P., and Sahu S., 2020, Application of metamaterials for performance enhancement of planar antennas: A review, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(5), pp. e22154.
 38. Asif M., Sehrai D.A., Kiani S.H., Khan J., Abdullah M., Ibrar M., and Limiti E., 2021, Design of a Dual Band SNG Metamaterial Based Antenna for LTE 46/WLAN and Ka-Band Applications, *IEEE Access*, 9, pp. 71553-71562.
 39. Rosaline I., 2021, A Triple-Band Antenna with a Metamaterial Slab for Gain Enhancement and Specific Absorption Rate (SAR) Reduction, *Progress In Electromagnetics Research C*, Report 109, pp. 275-287.
 40. Ali U., Ullah S., Shafi M., Shah S.A., Shah I.A., and Flint J.A., 2019, Design and comparative analysis of conventional and metamaterial-based textile antennas for wearable applications, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 32(6), p. e2567.
 41. Krzysztofik W.J., and Nghia C.T., 2019, Metamaterials in Application to Improve Antenna Parameters, *Metamaterials and metasurfaces*, 12(2), pp. 63-85.
 42. Gao X.J., Cai T., and Zhu L., 2016, Enhancement of gain and directivity for microstrip antenna using negative permeability metamaterial, *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 70(7), pp. 880-885.
 43. Kim D., and Choi J., 2010, Analysis of Antenna Gain Enhancement with a New Planar Metamaterial Superstrate: an Effective Medium and a Fabry-Pérot Resonance Approach, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 31, pp. 1289-1303.
 44. Mosallaei H., and Sarabandi K., 2007, Design and Modeling of Patch Antenna Printed on Magneto-Dielectric Embedded-Circuit Metasubstrate, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 55, pp. 45-52.

45. Lee H.J., and Yook J.G., 2008, Biosensing using split-ring resonators at microwave regime, *Applied Physics Letters*, 92(25) 254103.
46. Dutta R., Ganguly S., Dey A., Dutta D., Das S., Sil S., and Pramanik T., 2022, Cloaking and Quantum Stealth: The Science Behind Invisibility," *Oriental Journal of Chemistry*, 38(4), pp. 884-889.
47. Schurig D., Hwang H.Y., Tao H., Strikwerda A.C., Fan K., Keiser G.R., ... and Averitt R.D., 2006, Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies, *Science*, 314(5801), pp. 977-980.
48. Zhang J., Liu L., Luo Y., Zhang S., and Mortensen N., 2011, Homogeneous optical cloak constructed with uniform layered structures, *Optics express*, 19, pp. 8625-8631.
49. Xu S., Wang Y., Zhang B., and Chen H., 2013, Invisibility cloaks from forward design to inverse design, *Science China Information Sciences*, 56(12), pp. 1-11.
50. Zhong M., 2020, Enhance of the absorption and bandwidth based on a ultra-thin tungsten structure metamaterial absorber in 400–1500 nm range, *Optics & Laser Technology*, 127, pp. 106142.
51. Bilal R.H., Baqir M.A., Choudhury P.K., Ali M.M., Rahim A.A., and Kamal W., 2020, Polarization-insensitive multi-band metamaterial absorber operating in the 5G spectrum, *Optik*, 216, pp. 164958.
52. Fan B., Tang H., Qiu Y., Jiang L., Lin L., Su J., and Pan M., 2024, Graphene-based metamaterial: Achieving perfect absorption across multiple spectral bands with high sensitivity, *Physics Letters A*, 522, pp. 129761.
53. Song Y., Deng X.H., Zhang P., Guo F., and Qin K., 2024, Graphene-based metamaterial absorber with perfect multi-band absorption, *Journal of Electronic Materials*, 53(7), 4049-4058.
54. Alkurt F.O., Erkinay Ozdemir M., Akgol O., and Karaaslan M., 2021, Ground plane design configuration estimation of 4.9 GHz reconfigurable monopole antenna for desired radiation features using artificial neural network, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 31(8), pp. e22734.
55. Bakhtiari S., Elmer T.W., Cox N.M., Gopalsami N., Raptis A.C., Liao S., and Sahakian A.V., 2011, Compact millimeter-wave sensor for remote monitoring of vital signs, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(3), pp. 830-841.

56. Tung B.S., Khuyen B.X., Van Dung N., Lam V.D., Kim Y.H., Cheong H., and Lee Y., 2015, Multi-band near-perfect absorption via the resonance excitation of dark meta-molecules, *Optics Communications*, 356, pp. 362-367.
57. Dung N.V., Tung B.S., Khuyen B.X., Yoo Y.J., Kim Y.J., Rhee J.Y., and Lee Y.P., 2015, Simple metamaterial structure enabling triple-band perfect absorber, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48(37), pp. 375103.
58. Kim Y.J., Hwang J.S., Yoo Y.J., Khuyen B.X., Rhee J.Y., Chen X., and Lee Y., 2017, Ultrathin microwave metamaterial absorber utilizing embedded resistors, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(40), pp. 405110.
59. Tung B.S., Khuyen B.X., Kim Y.J., Lam V.D., Kim K.W., and Lee Y., 2017, Polarization-independent, wide-incident-angle and dual-band perfect absorption, based on near-field coupling in a symmetric metamaterial, *Scientific reports*, 7(1), pp. 11507.
60. Xu H., Bie S., Xu Y., Yuan W., Chen Q., and Jiang J., 2016, Broad bandwidth of thin composite radar absorbing structures embedded with frequency selective surfaces, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 80, pp. 111-117.
61. Kim Y.J., Hwang J.S., Yoo Y.J., Khuyen B.X., Chen X., and Lee Y., 2017, Triple-band metamaterial absorber based on single resonator, *Current Applied Physics*, 17(10), pp. 1260-1263.
62. Sayed S.I., Mahmoud K., and Mubarak R.I., 2023, Design and optimization of broadband metamaterial absorber based on manganese for visible applications, *Scientific reports* , 13(1), pp. 11937.
63. Smith D.R, Vier D.C, Koschny T., and Soukoulis C.M., 2005, Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials, *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 71(3), pp. 036617.
64. Balanis C.A., 2016, *Antenna theory: analysis and design*, John wiley & Sons.
65. Balanis C.A., 2012, *Advanced engineering electromagnetics*, John Wiley & Sons.
66. Verma A., and Meena O., 2023, A Review of Metamaterial Absorber and its Absorption Techniques, in *2023 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, pp. 1-6.
67. Mutlu M., and Ozbay E., 2012, A transparent 90° polarization rotator by combining chirality and electromagnetic wave tunneling, *Applied Physics Letters*, 100(5).

68. Xu J., Li R., Qin J., Wang S., and Han T., 2018, Ultra-broadband wide-angle linear polarization converter based on H-shaped metasurface, *Optics Express*, 26(16), pp. 20913-20919.
69. Huang X., Yang D., and Yang H., 2014, Multiple-band reflective polarization converter using U-shaped metamaterial, *Journal of Applied Physics*, 115(10), pp. 103505 - 103511.
70. Xu P., Wang S., and Wen G., 2017, A linear polarization converter with near unity efficiency in microwave regime, *Journal of Applied Physics*, 121, pp. 144502.
71. Z. Li, W. Liu, H. Cheng, S. Chen, and J. J. S. r. Tian, 2015, Realizing broadband and invertible linear-to-circular polarization converter with ultrathin single-layer metasurface, *Scientific reports*, 5 (1), pp. 18106.
72. Gao, X., Yang, W. L., Ma, H. F., Cheng, Q., Yu, X. H., & Cui, T. J., 2018, A reconfigurable broadband polarization converter based on an active metasurface, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66 (11), pp. 6086-6095.
73. Cao T.N., Nguyen M.T., Nguyen N.H., Truong C.L., and Nguyen T.Q.H., 2021, Numerical design of a high efficiency and ultra-broadband terahertz cross-polarization converter, *Materials Research Express*, 8(6), pp. 065801.
74. Khan, H. A., Rafique, U., Abbas, S. M., Ahmed, F., Huang, Y., Uqaili, J. A., & Mahmoud, A., 2023, Polarization-independent ultra wideband RCS reduction conformal coding metasurface based on integrated polarization conversion-diffusion-absorption mechanism, in *Photonics*, 10 (3), pp. 281.
75. Q. Zheng, C. Guo, J. J. I. A. Ding, and W. P. Letters, 2018, Wideband metasurface-based reflective polarization converter for linear-to-linear and linear-to-circular polarization conversion, 17 (8), pp. 1459-1463.
76. Li Y., Wang Y., and Cao Q., 2019, Design of a multifunctional reconfigurable metasurface for polarization and propagation manipulation, *IEEE Access*, 7, pp. 129183-129191.
77. Li F., Chen H., Zhang L., Zhou Y., Xie J., Deng L., and Harris V.G., 2018, Compact high-efficiency broadband metamaterial polarizing reflector at microwave frequencies, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 67(2), pp. 606-614.
78. Zhu H., Cheung S., Chung K.L., Yuk T.I., 2013, Linear-to-circular polarization conversion using metasurface, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(9), pp. 4615-4623.

79. Baena J.D., Glybovski S.B., del Risco J.P., Slobozhanyuk A.P., Belov P.A., 2017, Broadband and thin linear-to-circular polarizers based on self-complementary zigzag metasurfaces, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(8), pp. 4124-4133.
80. Lin B., Guo J., Lv L., Wu J., Ma Y., Liu B., and Wang Z., 2019, Ultra-wideband and high-efficiency reflective polarization converter for both linear and circular polarized waves, *Applied Physics A*, 125, pp. 1-8.
81. Gao Xi., Han X., Cao W.P., Li H.O., Ma H.F., and Cui T.J., 2015, Ultrawideband and high-efficiency linear polarization converter based on double V-shaped metasurface, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(8), pp. 3522-3530.
82. Khan M.I., Khalid Z., and Tahir F.A., 2019, Linear and circular-polarization conversion in X-band using anisotropic metasurface, *Scientific reports*, 9(1), pp. 4552.
83. Mei Z.L., Ma X.M., Lu C., and Zhao Y.D., 2017, High-efficiency and wide-bandwidth linear polarization converter based on double U-shaped metasurface, *Aip Advances*, 7(12).
84. Yan M., Wang J., Wang W., Xu C., Chen H., Wang W., and Qu S., 2021, An FSS-backed reflective polarization conversion meta-surface for radar stealth, *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 43, pp. 100846.
85. Chen Y., Jia Z., and Wang L., 2016, Hierarchical honeycomb lattice metamaterials with improved thermal resistance and mechanical properties, *Composite structures*, 152, pp. 395-402.
86. Yuan X., Chen M., Yao Y., Guo X., Huang Y., Peng Z., and Fang D., 2021, Recent progress in the design and fabrication of multifunctional structures based on metamaterials, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 25(1), pp. 100883.
87. Zhang L., Li P., and Song X., 2020, Mid-infrared tunable triple-band cross-polarization converter based on a periodic ellipse graphene patch with a slit, *JOSA B*, 37(7), pp. 1921-1926.
88. Wang H.L., Ma H.F., Chen M., Sun S., and Cui T.J., 2021, A Reconfigurable Multifunctional Metasurface for Full-Space Control of Electromagnetic Waves, *Advanced Functional Materials*, 31(25), pp. 2100275.

89. Zhou Y., Cao X., Gao J., Yang H., Zheng Y., and Li S., 2019, A multifunctional metasurface with integrated absorption and polarization rotation, *Materials Research Express*, 6(1), pp. 015802.
90. Dutta R., Mitra D., and Ghosh J., 2020, Dual-band multifunctional metasurface for absorption and polarization conversion, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(7), pp. e22200.
91. Ha D.T., Dzung D.N., Van Ngoc N., Tung B.S., Pham T.S., Lee Y., and Lam V.D., 2021, Switching between perfect absorption and polarization conversion, based on hybrid metamaterial in the GHz and THz bands, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(23), pp. 234003.
92. Liu Y., Huang X., Yang H., Hua L., and Lei Y., 2020, Zigzag reflective multifunctional metamaterial absorber and polarization rotator with horizontal strip structure, *Physica Scripta*, 95(8), pp. 085510.
93. Le D.H., and Lim S., 2019, Four-Mode Programmable Metamaterial Using Ternary Foldable Origami, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11, pp. 28554-28561.
94. Ren Y., and Tang B., 2021, Switchable Multi-Functional VO₂-Integrated Metamaterial Devices in the Terahertz Region, *Journal of Lightwave Technology*, 39(18), pp. 5864-5868.
95. Song Z., and Zhang J., 2020, Achieving broadband absorption and polarization conversion with a vanadium dioxide metasurface in the same terahertz frequencies, *Optics Express*, 28(8), pp. 12487-12497.
96. He J., Zhu Q., Zhou Y., Wang J., Cai G., Li M., and Dong J., 2022, Lightweight switchable bifunctional metasurface based on VO₂: High-efficiency absorption and ultra-wideband circular polarization conversion, *Optik*, 257, pp. 168837.
97. Barkabian M., Sharifi N., and Granpayeh N., 2021, Multi-functional high-efficiency reflective polarization converter based on an ultra-thin graphene metasurface in the THz band, *Optics Express*, 29(13), pp. 20160-20174.
98. Peng L., Jiang X., and Li S., 2018, Multi-functional Device with Switchable Functions of Absorption and Polarization Conversion at Terahertz Range, *Nanoscale Research Letters*, 13, pp. 1-9.
99. Wang J., Yang R., Ma R., Tian J., and Zhang W., 2020, Reconfigurable multifunctional metasurface for broadband polarization conversion and perfect absorption, *IEEE Access*, 8, pp. 105815-105823.

100. Zhao J., Huang X., and Helin Y., 2016, Influence of curved surface on properties of metamaterial absorber, *Applied Physics A*, 122, pp. 1-6.
101. Liu Y., Huang X., Yang H., Hua L., and Lei Y., 2020, Zigzag reflective multifunctional metamaterial absorber and polarization rotator with horizontal strip structure, *Physica Scripta*, 95(8), pp. 085510.
102. Yan X., Kong X., Wang Q., Xing L., Xue F., Xu Y., and Liu X., 2020, Water-based reconfigurable frequency selective rasorber with thermally tunable absorption band, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(8), pp. 6162-6171.
103. Xiong H., and Yang F., 2020, Ultra-broadband and tunable saline water-based absorber in microwave regime, *Optics Express*, 28(4), pp. 5306-5316.
104. Li H., Yuan H., Costa F., Cao Q., Wu W., and Monorchio A., 2021, Optically transparent water-based wideband switchable radar absorber/reflector with low infrared radiation characteristics, *Optics Express*, 29(26), pp. 42863-42875.
105. Zhao J., Wei S., Wang C., Chen K., Zhu B., Jiang T., and Feng Y., 2018, Broadband microwave absorption utilizing water-based metamaterial structures, *Optics Express*, 26(7), pp. 8522-8531.
106. Zhu W., Rukhlenko I.D., Xiao F., He C., Geng J., Liang X., and Jin R., 2017, Multiband coherent perfect absorption in a water-based metasurface, *Optics Express*, 25(14), pp. 15737-15745
107. Fang Z., Wang Y., Liu Z., Schlather A., Ajayan P.M., Koppens F.H., and Halas N.J., 2012, Plasmon-Induced Doping of Graphene, *ACS Nano*, 6(11), pp. 10222-10228.
108. Obraztsova E.D., Rybin M.G., and Obraztsov P.A., 2021, 7 - Optical properties of graphene, *Graphene. Woodhead Publishing*, pp. 133-142.
109. Ishikawa A., and Tanaka T., 2013, Plasmon hybridization in graphene metamaterials, *Applied Physics Letters*, 102(25), pp. 253110.
110. Novoselov K.S., Colombo L.P.M., Gellert P.R., Schwab M.G., and Kim K.A.J.N., 2012, A roadmap for graphene, *Nature*, 490(7419), pp. 192-200.
111. Geim A.K., and Novoselov K.S., 2007, The rise of graphene, *Nat Mater*, 6(3), pp. 183-191.
112. Papasimakis N., Luo Z., Shen Z.X., De Angelis F., Di Fabrizio E., Nikolaenko A.E., and Zheludev N.I., 2010, Graphene in a photonic metamaterial, *Optics Express*, 18(8), pp. 8353-8359.

113. Andryieuski A., and Lavrinenko A.V., 2013, Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach, *Optics Express*, 21(7), pp. 9144-9155.
114. Mou N., Sun S., Dong H., Dong S., He Q., Zhou L., and Zhang L., 2018, Hybridization-induced broadband terahertz wave absorption with graphene metasurfaces, *Optics Express*, 26(9), pp. 11728-11736.
115. Xu Z., Wu D., Liu Y., Liu C., Yu Z., Yu L., and Ye H., 2018, Design of a Tunable Ultra-Broadband Terahertz Absorber Based on Multiple Layers of Graphene Ribbons, *Nanoscale Res Lett*, 13(1), pp. 1-8.
116. Amin M., Farhat M., and Bağcı H., 2013, An ultra-broadband multilayered graphene absorber, *Optics Express*, 21(24), pp. 29938-29948.
117. Peng L., Li X.F., Jiang X., and Li S.M., 2018, A Novel THz Half-Wave Polarization Converter for Cross-Polarization Conversions of Both Linear and Circular Polarizations and Polarization Conversion Ratio Regulating by Graphene, *Journal of Lightwave Technology*, 36, pp. 4250-4258.
118. Tian X., and Li Z.Y., 2018, An optically-triggered switchable mid-infrared perfect absorber based on phase-change material of vanadium dioxide, *Plasmonics*, 13, pp. 1393-1402.
119. Hao Q., Li W., Xu H., Wang J., Yin Y., Wang H., and Chu P.K., 2018, VO₂/TiN plasmonic thermochromic smart coatings for room-temperature applications, *Advanced materials*, 30(10), pp. 1705421.
120. Huang J., Li J., Yang Y., Li J., Li J., Zhang Y., and Yao J., 2020, Active controllable dual broadband terahertz absorber based on hybrid metamaterials with vanadium dioxide, *Optics Express*, 28(5), pp. 7018-7027.
121. Nam M.H., Tung B.S., Khuyen B.X., Ha D.T., Ngoc N.V., Tran M.C., ... and Lee Y., 2022, Graphene-Integrated Plasmonic Metamaterial for Manipulation of Multi-Band Absorption, Based on Near-Field Coupled Resonators, *Crystals*, 12(4), pp. 525.
122. Ha D.T., Tung B.S., Khuyen B.X., Pham T.S., Tung N.T., Tung N.H., ... and Lee Y., 2021, Dual-band, polarization-insensitive, ultrathin and flexible metamaterial absorber based on high-order magnetic resonance, *In Photonics*, 8(12), pp. 574.
123. Yan D., Meng M., Li J., Li J., and Li X., 2020, Vanadium dioxide-assisted broadband absorption and linear-to-circular polarization conversion based on a

- single metasurface design for the terahertz wave, *Optics Express*, 28(20), pp. 29843-29854.
124. Fang S., Deng L., Zhang P., Qiu L., Xie H., Huang S., and Wang Z., 2022, Dual-function flexible metasurface for absorption and polarization conversion and its application for radar cross section reduction, *Journal of Applied Physics*, 131(13).
 125. Nobre F.D., de Sousa T.M., Campos A.L., and da Silva M.W., 2024, Multifunctional Metasurface with PIN Diode Application Featuring Absorption, Polarization Conversion, and Transmission Functions, *Micromachines*, 15(11), pp. 1344.
 126. Wang G., Zuo S., Liu J., Zhang X., Li M., Yang S., ... and Gao Y., 2023, Difunctional terahertz metasurface with switchable polarization conversion and absorption by VO₂ and photosensitive silicon, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25(29), pp. 19719-19726.
 127. Zou W., Zhong C., Hong L., Lei J., Shen Y., Deng X., ... and Guo T., 2024, Switchable Vanadium Dioxide Metasurface for Terahertz Ultra-Broadband Absorption and Reflective Polarization Conversion, *Micromachines*, 15(8), pp. 967.
 128. Wang Z., Ma Y., Li M., Wu L., Guo T., Zheng Y., ... and Fu Y., 2022, A thermal-switchable metamaterial absorber based on the phase-change material of vanadium dioxide, *Nanomaterials*, 12(17), pp. 3000.
 129. Nicolson A.M., Ross G.F., 1970, Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 19(4), pp. 377-382.
 130. Chen X., Grzegorzczak T.M., Wu B.I., Pacheco Jr.J., Kong J.A., 2004, Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials, *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 70(1), pp. 016608.
 131. Sun L., Sun J., Yang B., Gao X., Long H., and Shao Y., 2020, A simplified design of broadband metamaterial absorber covering X-and Ku-band, *Materials Research Express*, 6(12), pp. 125805.
 132. Weiland T., 1977, A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields, *AEÜ*, 31, pp. 116-120.

133. Zhuang L., Zhang W., Chao M., Liu Q., Cheng B., Song G., and Liu J., 2024, Terahertz broadband tunable multifunctional metasurface based on VO₂, *Optical Materials Express*, 14(2), pp. 483-493.
134. Jepsen P.U., Fischer B.M., Thoman A., Helm H., Suh J.Y., Lopez R., and Haglund Jr.R.F., 2006, Metal-insulator phase transition in a VO₂ thin film observed with terahertz spectroscopy, *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 74(20), pp. 205103.
135. Ren, Z., Wang, W., Zhao, Y., Chang, S., Ren, G., Li, S., & Wang, R., 2023, A switchable terahertz metamaterial absorber between ultra-broadband and dual bands, 11, pp. 1227013.
136. Mou N., Tang B., Li J., Dong H., and Zhang L., 2022, Switchable ultra-broadband terahertz wave absorption with VO₂-based metasurface, *Scientific Reports*, 12(1), pp. 2501.
137. Ding F., Zhong S., and Bozhevolnyi S.I., 2018, Vanadium dioxide integrated metasurfaces with switchable functionalities at terahertz frequencies, *Advanced Optical Materials*, 6(9), pp. 1701204.
138. Zhang H.T., Zhang L., Mukherjee D., Zheng Y.X., Haislmaier R.C., Alem N., and Engel-Herbert R., 2015, Wafer-scale growth of VO₂ thin films using a combinatorial approach, *Nature communications*, 6(1), pp. 1-8.
139. Zheng Z., Zheng Y., Luo Y., Yi Z., Zhang J., Liu L., ... and Zhang J., 2021, Terahertz perfect absorber based on flexible active switching of ultra-broadband and ultra-narrowband, *Optics express*, 29(26), pp. 42787-42799.
140. Huang J., Li J., Yang Y., Li J., Li J., Zhang Y., and Yao J., 2020, Broadband terahertz absorber with a flexible, reconfigurable performance based on hybrid-patterned vanadium dioxide metasurfaces, *Optics Express*, 28(12), pp. 17832-17840.
141. Nguyen T.K.T., Nguyen T.M., Nguyen H.Q., Cao T.N., Le D.T., Bui X.K., ... and Nguyen T.Q.H., 2021, Simple design of efficient broadband multifunctional polarization converter for X-band applications, *Scientific reports*, 11(1), pp. 2032.
142. Cong L., Cao W., Zhang X., Tian Z., Gu J., Singh R., ... and Zhang W., 2013, A perfect metamaterial polarization rotator, *Applied Physics Letters*, 103(17).
143. Nguyen T.Q.H., Nguyen T.K.T., Nguyen T.Q.M., Cao T.N., Phan H.L., Luong N.M., ... and Vu D.L., 2021, Simple design of a wideband and wide-angle

- reflective linear polarization converter based on crescent-shaped metamaterial for Ku-band applications, *Optics Communications*, 486, pp. 126773.
144. Huang C.P., Wang Q.J., Yin X.G., Zhang Y., Li.J.Q., and Zhu Y.Y., 2014, Break through the limitation of Malus' law with plasmonic polarizers, *Advanced Optical Materials*, 2(8), pp. 723-728.
 145. Tretyakov S.A., 2015, Metasurfaces for general transformations of electromagnetic fields, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2049), pp. 20140362.
 146. Xu J., Li R., Qin J., Wang S., and Han T., 2018, Ultra-broadband wide-angle linear polarization converter based on H-shaped metasurface, *Optics Express*, 26(16), pp. 20913-20919.
 147. Zheng X., Xiao Z., and Ling X., 2018, A tunable hybrid metamaterial reflective polarization converter based on vanadium oxide film, *Plasmonics*, 13, pp. 287-291.
 148. Shi H., Li J., Zhang A., Wang J., and Xu Z., 2014, Broadband cross polarization converter using plasmon hybridizations in a ring/disk cavity, *Optics Express*, 22(17), pp. 20973-20981.
 149. Neshev D., Aharonovich I., 2018, Optical metasurfaces: new generation building blocks for multi-functional optics, *Light: Science & Applications*, 7(1), pp. 58.
 150. Chen Q., Bie S., Yuan W., Xu Y., Xu H., and Jiang J., 2016, Low frequency absorption properties of a thin metamaterial absorber with cross-array on the surface of a magnetic substrate, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(42), pp. 425102.
 151. Phan D.T., Nguyen T.K.T., Nguyen N.H., Le D.T., Bui X.K., Vu D.L., ... and Nguyen T.Q.H., 2021, Lightweight, ultra-wideband, and polarization-insensitive metamaterial absorber using a multilayer dielectric structure for C- and X-band applications, *Physica Status Solidi (b)*, 258(10), pp. 2100175.
 152. Yao Z., Xiao S., Jiang Z., Yan L., Wang B.Z., 2020, On the design of ultrawideband circuit analog absorber based on quasi-single-layer FSS, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(4), pp. 591-595.
 153. Khuyen B.X., Tung B.S., Tung N.T., Hien N.T., Kim Y.J., Chen L.Y., ... and Lam V.D., 2019, Realization for dual-band high-order perfect absorption, based on metamaterial, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(10), pp. 105502.

154. Qin F., Ding L., Zhang L., Monticone F., Chum C.C., Deng J., ... and Qiu C.W., 2016, Hybrid bilayer plasmonic metasurface efficiently manipulates visible light, *Science Advances*, 2(1), pp. e1501168.
155. Diem M., Koschny T., Soukoulis C.M., 2009, Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime, *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 79(3), pp. 033101.
156. Dai H., Zhao Y., Sun H., Chen J., Ge Y., and Li Z., 2018, An ultra-wideband linear polarization conversion metasurface, *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(9), pp. 090311.
157. Xu J., Li R., Wang S., and Han T., 2018, Ultra-broadband linear polarization converter based on anisotropic metasurface, *Optics Express*, 26(20), pp. 26235-26241.
158. Long F., Yu S., Kou N., Zhang C., Ding Z., and Zhang Z., 2020, Efficient broadband linear polarization conversion metasurface based on %-shape, *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(1), pp. 226-232.
159. Xu Z., Sheng H., Wang Q., Zhou L., and Shen Y., 2021, Terahertz broadband polarization converter based on the double-split ring resonator metasurface, *SN Applied Sciences*, 3, pp. 1-7.
160. Zhao J., and Cheng Y., 2016, A high-efficiency and broadband reflective 90° linear polarization rotator based on anisotropic metamaterial, *Applied Physics B*, 122, pp. 1-7.
161. Nguyen T.M., Phan H.L., Vu D.L., Nguyen T.Q.H., and Kim J.M., 2022, Ultra-wideband and high-efficiency cross-polarization conversion using a double split ring shaped metasurface for C, X, and Ku-band applications, *AIP Advances*, 12(11).
162. Qi Y., Zhang B., Liu C., and Deng X., 2020, Ultra-broadband polarization conversion meta-surface and its application in polarization converter and RCS reduction, *IEEE Access*, 8, pp. 116675-116684.
163. Wen J., Zhao Q., Peng R., Yao H., Qing Y., Yin J., and Ren Q., 2022, Progress in water-based metamaterial absorbers: a review, *Optical Materials Express*, 12(4), pp. 1461-1479.
164. Vijay R., Jain R., and Sharma K.S., 2015, Dielectric spectroscopy of grape juice at microwave frequencies, *International Agrophysics*, 29(2).

165. Ren J., and Yin J.Y., 2018, 3D-printed low-cost dielectric-resonator-based ultra-broadband microwave absorber using carbon-loaded acrylonitrile butadiene styrene polymer, *Materials*, 11(7), pp. 1249.
166. Ren J., and Yin J.Y., 2018, Cylindrical-water-resonator-based ultra-broadband microwave absorber, *Optical Materials Express*, 8(8), pp. 2060-2071.
167. Ge J., Zhang Y., Li H., Dong H., and Zhang L., 2023, Ultra-Broadband, Tunable, and Transparent Microwave Meta-Absorber Using ITO and Water Substrate, *Advanced Optical Materials*, 11(10), pp. 2202873.
168. Wang Z., Chen Q., Ma Y., Guo T., Shuai C., and Fu Y., 2022, Design of thermal-switchable absorbing metasurface based on vanadium dioxide, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 21(12), pp. 2302-2306.