

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

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

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Tăng Xuân Dương

**NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VÀ ĐIỀU KHIỂN TÍNH CHẤT
HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ TẠI VÙNG TẦN SỐ GHz
DỰA TRÊN TỔ HỢP VẬT LIỆU TỪ (nền FeCo và MFe_2O_4)
VÀ METAMATERIALS**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Hà Nội - 2026

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

Tăng Xuân Dương

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VÀ ĐIỀU KHIỂN TÍNH CHẤT
HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỬ TẠI VÙNG TẦN SỐ GHz
DỰA TRÊN TỔ HỢP VẬT LIỆU TỬ (nền FeCo và MFe_2O_4)
VÀ METAMATERIALS

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Vật liệu điện tử

Mã số: 9 44 01 23

Xác nhận của Học viện
Khoa học và Công nghệ



Nguyễn Thị Trung

Người hướng dẫn 1

GS.TS. Vũ Đình Lâm

Người hướng dẫn 2

TS. Bùi Sơn Tùng

Hà Nội - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan rằng luận án với đề tài “*Nghiên cứu chế tạo và điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ tại vùng tần số GHz dựa trên tổ hợp vật liệu từ (nền FeCo và MFe_2O_4) và metamaterials*” là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn khoa học của tập thể hướng dẫn. Trong quá trình thực hiện, luận án có tham khảo nhiều tài liệu khác nhau và mọi thông tin trích dẫn đều được ghi rõ nguồn gốc. Những kết quả nghiên cứu được công bố chung với các tác giả khác đã được sự đồng ý của các đồng tác giả khi sử dụng trong luận án. Toàn bộ số liệu và kết quả trình bày là trung thực, khách quan và chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình nào khác, ngoài các công bố của chính tác giả. Luận án này được hoàn thành trong thời gian tôi là nghiên cứu sinh tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Hà Nội, ngày 28 tháng 5 năm 2026

Tác giả luận án



Tăng Xuân Dương

LỜI CẢM ƠN

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

Nghiên cứu sinh muốn bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến Ban Lãnh đạo, các Phòng chức năng và cán bộ, giảng viên của Học viện Khoa học và Công nghệ, Lãnh đạo và Bộ phận đào tạo Viện Khoa học vật liệu đã truyền dạy những kiến thức, hỗ trợ các thủ tục, tạo điều kiện thuận lợi trong suốt quá trình học tập và thực hiện luận án của nghiên cứu sinh. Nghiên cứu sinh xin chân thành cảm ơn Phòng Thí nghiệm số, Học viện Khoa học và Công nghệ đã hỗ trợ thiết bị, công nghệ để hoàn thành các nội dung nghiên cứu của luận án.

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

Nghiên cứu sinh cũng xin bày tỏ lòng biết ơn đặc biệt đến Thường vụ Đảng uỷ, Ban Tổng Giám đốc Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga, Lãnh đạo Phòng Kế hoạch - Khoa học đã tạo mọi điều kiện thuận lợi cho nghiên cứu sinh được tham gia học tập và thực hiện luận án.

Nghiên cứu sinh xin chân thành cảm ơn Tổ chức Khoa học và Giáo dục Gặp gỡ Việt Nam (Rencontres du Viet Nam) và Tập đoàn Novatech đã trao tặng học bổng cho nghiên cứu sinh, đây là động lực cổ vũ tinh thần để đạt được những thành tích trong học tập và nghiên cứu khoa học.

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

Hà Nội, ngày 28 tháng 5 năm 2026

Tác giả luận án



Tăng Xuân Dương

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	ii
LỜI CẢM ƠN.....	iii
1. Lý do chọn đề tài	1
2. Mục tiêu nghiên cứu	4
3. Nội dung nghiên cứu.....	4
3.1 Phương pháp nghiên cứu	4
3.2 Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....	5
4. Cơ sở khoa học và thực tiễn của đề tài	5
5. Những đóng góp mới	5
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ TỔ HỢP VẬT LIỆU (TỪ - VẬT LIỆU BIẾN HÓA) HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ.....	7
1.1 Cơ chế hấp thụ sóng điện từ của vật liệu	7
1.1.1 Cơ chế tổn hao từ.....	8
1.1.2 Cơ chế tổn hao điện môi.....	12
1.2 Các hệ vật liệu từ hấp thụ sóng điện từ	14
1.2.1 Vật liệu từ mềm hấp thụ sóng điện từ.....	16
1.2.2 Vật liệu từ cứng hấp thụ sóng điện từ.....	18
1.2.3 Vật liệu từ cứng - từ mềm	19
1.3. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ.....	19
1.3.1 Hiện tượng phối hợp trở kháng.....	19
1.3.2 Hiện tượng giao thoa triệt tiêu.....	22
1.3.3 Cơ chế cộng hưởng trong cấu trúc vật liệu biến hóa	24
1.3.4 Các cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ.....	26
1.4. Tổ hợp vật liệu (từ - vật liệu biến hóa) hấp thụ sóng điện từ.....	30
1.5. Một số ứng dụng tiêu biểu của tổ hợp vật liệu (từ - vật liệu biến hóa)	38
1.6. Kết luận chương 1.....	42
CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU.....	44
2.1 Phương pháp nghiên cứu lý thuyết	44
2.1.1 Phương pháp mô phỏng	44
2.1.2 Phương pháp tính trở kháng	46
2.2 Một số phương pháp chế tạo và đo đạc đặc trưng vật liệu từ	46
2.2.1 Phương pháp nghiên cứu cơ năng lượng cao	46
2.2.2 Phương pháp đo độ từ thẩm và độ điện thẩm.....	50
2.2.3 Phương pháp đo từ kế mẫu rung	51
2.2.4 Phương pháp hiển vi điện tử quét.....	54

2.2.5 Phương pháp nhiễu xạ tia X.....	56
2.3 Phương pháp chế tạo vật liệu biến hóa và tổ hợp vật liệu từ - vật liệu biến hóa ..	58
2.3.1 Phương pháp quang khắc chế tạo vật liệu biến hóa	58
2.3.2 Phương pháp chế tạo tổ hợp vật liệu từ - vật liệu biến hóa.....	61
2.4 Phương pháp đo đặc trưng hấp thụ sóng điện từ.....	62
2.5 Kết luận Chương 2.....	64
CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU VẬT LIỆU HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ DÀI RỘNG DƯA TRÊN TỔ HỢP VẬT LIỆU TỪ FeCo-C VÀ VẬT LIỆU BIẾN HÓA.....	66
3.1 Vật liệu biến hóa sử dụng vật liệu từ như cấu trúc cộng hưởng.....	66
3.1.1 Thiết kế tổ hợp vật liệu sử dụng cấu trúc cộng hưởng FeCo-C.....	66
3.1.2 Đánh giá tính chất hấp thụ của tổ hợp vật liệu sử dụng cấu trúc cộng hưởng FeCo-C.....	70
3.2 Vật liệu biến hóa sử dụng vật liệu từ như tấm phủ.....	78
3.2.1 Thiết kế tổ hợp vật liệu sử dụng tấm phủ FeCo-C.....	78
3.2.2 Đánh giá tính chất hấp thụ của tổ hợp vật liệu sử dụng tấm phủ FeCo-C....	85
3.3 Kết luận chương 3.....	101
CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN BIÊN ĐỘ VÀ TẦN SỐ HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU DƯA TRÊN TỔ HỢP VẬT LIỆU TỪ NỀN MFe_2O_4 VÀ VẬT LIỆU BIẾN HÓA	103
4.1. Điều khiển cường độ hấp thụ của tổ hợp vật liệu.....	104
4.1.1. Thiết kế cấu trúc tổ hợp vật liệu sử dụng tấm phủ $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	104
4.1.2. Điều khiển cường độ hấp thụ của tổ hợp vật liệu bằng từ trường ngoài....	106
4.2 Điều khiển tần số hấp thụ của tổ hợp vật liệu.....	116
4.2.1. Thiết kế cấu trúc tổ hợp vật liệu sử dụng tấm phủ $MgFe_2O_4$	117
4.2.2 Điều khiển tần số hấp thụ của tổ hợp vật liệu thông qua từ trường ngoài ..	121
4.3 Kết luận chương 4.....	132
KẾT LUẬN CHUNG	133
KIẾN NGHỊ NHỮNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO.....	134
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN.....	135
TÀI LIỆU THAM KHẢO	136

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU

1. Danh mục các ký hiệu viết tắt

A	Độ hấp thụ
E	Điện trường
H	Từ trường
k	Hướng truyền sóng
f_r	Tần số cộng hưởng
ω	Tần số
H_c	Lực kháng từ
H_k	Đị hướng từ
M_s	Độ từ hóa bão hòa
L	Cảm kháng
C	Điện dung
R	Điện trở
S_{11}	Tham số phản xạ
S_{21}	Tham số truyền qua
Z	Trở kháng
μ	Độ từ thẩm
ϵ	Hằng số điện môi
σ	Độ dẫn điện
γ	Hệ số chuyển đổi từ
MFO	Vật liệu Magie ferrite - $MgFe_2O_4$
NZFO	Vật liệu Ni-Zn ferrite - $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$
BT	Vật liệu bari titanat - $BaTiO_3$
CIP	Bột sắt carbonyl
YIG	Vật liệu Yttrium Iron Garnet - $Y_3Fe_5O_{12}$
SE_T	Che chắn tổng
SE_A	Che chắn hấp thụ
SE_R	Che chắn phản xạ
SE_M	Che chắn nhiều lần
δ	Độ sâu xuyên thấu

2. Danh mục chữ viết tắt

Viết tắt	Nguyên bản tiếng Anh	Tạm dịch
CM-MA	Composite based on Magnetic materials-Metamaterial Absorber	Tổ hợp vật liệu từ - vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ
CST MWS	Computer Simulation Technology, Microwave Studio	Phần mềm mô phỏng tương tác điện từ
DWR	Domain-Wall Resonance	Cộng hưởng vách đômen
EAB	Effective Absorption Bandwidth	Băng thông hấp thụ hiệu quả
ED	Electric Dipole	Lưỡng cực điện
EMI	Electromagnetic Interference	Nhiều sóng điện từ
ER	Exchange Resonance	Cộng hưởng trao đổi
EMWAM	Electromagnetic Wave Absorbing Materials	Vật liệu hấp thụ sóng điện từ
EMW	Electromagnetic Wave	Sóng điện từ
FBMA	Flexible Broadband Metamaterial Absorber	Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ băng thông rộng linh hoạt
FBW	Fractional Bandwidth	Băng thông tương đối
FIT	Finite Integration Technique	Kỹ thuật tích phân hữu hạn
FMR	Ferromagnetic Resonance	Cộng hưởng sắt từ
FR-4	Flame Retardant 4	Vật liệu điện môi dùng cho mạch in
FWHM	Full Width at Half Maximum	Độ rộng phổ được đo tại điểm cường độ bằng một nửa cường độ cực đại
HEBM	High-Energy Ball Milling	Phương pháp nghiền cơ năng lượng cao
MA	Metamaterial Absorber	Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ
MD	Magnetic Dipole	Lưỡng cực từ
MM	Metamaterial	Vật liệu biến hóa
MSW	Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization	Phân cực không gian kiểu Maxwell-Wagner-Sillars
NRW	Nicolson-Ross-Weir	Thuật toán Nicolson-Ross-Weir
RL	Reflection Loss	Tổn hao phản xạ
SEM	Scanning Electron Microscope	Kính hiển vi điện tử quét

Viết tắt	Nguyên bản tiếng Anh	Tạm dịch
TE	Transverse Electric	Phân cực điện trường ngang
TM	Transverse Magnetic	Phân cực từ trường ngang
VNA	Véc tơ Network Analyzer	Máy phân tích mạng vector
XRD	X-Ray Diffraction	Nhiễu xạ tia X

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 2.1. Tổng hợp thông số lực kháng từ và từ hóa bão hòa của các mẫu vật liệu FeCo-C	53
Bảng 3.1. So sánh băng thông hấp thụ hiệu quả của cấu trúc CM-MA sử dụng cấu trúc cộng hưởng FeCo-C so với vật liệu của các nghiên cứu khác	78
Bảng 3.2. Thông số hình học tối ưu của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(75%)	83
Bảng 3.3. So sánh băng thông hấp thụ hiệu quả của cấu trúc CM-MA sử dụng tấm phủ FeCo-C (75%) với các nghiên cứu khác trước đây	94
Bảng 4.1. So sánh kết quả cấu trúc CM-MA sử dụng NZFO điều khiển đặc tính hấp thụ bằng từ trường ngoài so với các nghiên cứu khác	116
Bảng 4.2. Thông số hình học tối ưu của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu MFO	120
Bảng 4.3. So sánh kết quả điều khiển tần số hấp thụ cấu trúc CM-MA sử dụng MFO thông qua từ trường ngoài với các nghiên cứu trước đây	131

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

Hình 1.1. Phổ hằng số điện môi phụ thuộc tần số	12
Hình 1.2. Các đặc tính mong muốn của vật liệu hấp thụ EMW	15
Hình 1.3. Phối hợp trở kháng và phổ hấp thụ của vật liệu biến hóa	20
Hình 1.4. Phản xạ và giao thoa trong cấu trúc hấp thụ MA	23
Hình 1.5. Phân bố dòng điện trên bề mặt cấu trúc và mặt sau tấm phản xạ tại các tần số khác nhau của đỉnh cộng hưởng	24
Hình 1.6. Cộng hưởng điện môi trong cấu trúc MA	25
Hình 1.7. Phổ hấp thụ của cấu trúc MA cộng hưởng bậc cao và phân bố điện trường E và từ trường H trên cấu trúc tại các đỉnh hấp thụ	26
Hình 1.8. Sơ đồ cấu trúc MA và phổ hấp thụ, tổn hao năng lượng tại đỉnh cộng hưởng	27
Hình 1.9. Cấu trúc cộng hưởng từ các vòng liên kết và phân bố dòng điện bề mặt tại các đỉnh cộng hưởng	28
Hình 1.10. (a-b) Sơ đồ cấu trúc vật liệu biến hóa và (c) phổ hấp thụ đa đỉnh	29
Hình 1.11. (a-c) Sơ đồ cấu trúc FBMA sử dụng mực in graphene, bố trí hệ đo và (d-e) phổ hấp thụ mô phỏng và thực nghiệm của cấu trúc ở trạng thái phẳng và uốn cong	30
Hình 1.12. (a-c) Cấu trúc CM-MA (d) phổ tổn hao phản xạ của cấu trúc so với vật liệu CIP thông thường	31
Hình 1.13 a) Sơ đồ cấu trúc CM-MA, b) cấu trúc cộng hưởng và (c) phổ hấp thụ của cấu trúc trong vùng tần số S-band	32
Hình 1.14. Sơ đồ cấu trúc MA sử dụng vật liệu YIG và phổ cộng hưởng dịch chuyển theo hai chiều tại các từ trường khác nhau	34
Hình 1.15. Sơ đồ cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu YIG và phổ cộng hưởng của cấu trúc khi thay đổi giá trị từ trường tác động	35
Hình 1.16. Sơ đồ cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu ferrite và phổ hấp thụ dịch chuyển tại các giá trị từ trường H_0 khác nhau	36
Hình 1.17. a) Cấu trúc CM-MA sử dụng Mn-Zn ferrite; b) phổ thông số phản xạ mô phỏng và thực nghiệm của MA	39

Hình 1.18. (a) Sơ đồ 3D của hệ đo thực nghiệm (b) Cấu hình đo để phân tích hiệu suất cảm biến (c) MM với các tấm gốm và phổ phản xạ của cấu trúc và (d-e) phổ phản xạ cấu trúc khi đặt trên đĩa gốm vỡ và tốt tương ứng	39
Hình 1.19. (a) Phổ hấp thụ của cấu trúc theo phương pháp HEBM-BT và (b) phương pháp BT truyền thống trong vùng tần số X và Ku	40
Hình 1.20. Cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu BT	41
Hình 1.21. Sự thay đổi theo tần số của hiệu quả che chắn: (a, b) SET và (c, d) độ sâu thâm thấu của gốm BaTiO ₃ chế tạo bằng HEBM và gốm BaTiO ₃ chế tạo bằng phương pháp truyền thống trong dải tần X và dải tần Ku	42
Hình 2.1. Phân bố dòng điện cùng mật độ tổn hao năng lượng trên bề mặt cấu trúc được mô phỏng bởi CST.	45
Hình 2.2. Sơ đồ khối chế tạo vật liệu FeCo-C	48
Hình 2.3. Sơ đồ khối chế tạo vật liệu Ni _{0.5} Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄	49
Hình 2.4. Sơ đồ nung thiêu kết	49
Hình 2.5 Sơ đồ hệ phân tích mạng đo thông số điện thẩm và từ thẩm và sơ đồ tính toán thông số điện từ	50
Hình 2.6. Đường cong từ trễ M(H) của các mẫu vật liệu FeCo-C 10%, 50%, 75%, 90% và graphene nguyên chất	52
Hình 2.7. Đường cong từ trễ M(H) của vật liệu Ni _{0.5} Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄	53
Hình 2.8. Ảnh SEM của các mẫu FeCo-C: a) 10%, b) 50%, c) 75% và d) 90%	54
Hình 2.9. Ảnh SEM của mẫu vật liệu Ni _{0.5} Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄	54
Hình 2.10. Hình ảnh phổ EDX và thành phần nguyên tố của vật liệu Ni _{0.5} Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄	56
Hình 2.11. Phổ XRD của mẫu FeCo-C (75%)	57
Hình 2.12. Phổ XRD của mẫu Ni _{0.5} Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄	58
Hình 2.13. Hệ thiết bị quang khắc tại Viện khoa học vật liệu	59
Hình 2.14. Sơ đồ minh họa phương pháp quang khắc chế tạo vật liệu biến hóa	60

Hình 2.15. (a) Chuẩn bị vật liệu từ và vật liệu kết dính; (b) Phôi trộn nguyên liệu, tạo lớp phủ lên cấu trúc MA; (c) Đóng rắn và tạo hình mẫu	62
Hình 2.16. Máy phân tích mạng véc tơ VNA	63
Hình 2.17. Sơ đồ bố trí thí nghiệm sử dụng hệ thiết bị VNA đo đặc trưng phản xạ của vật liệu biến hóa	64
Hình 3.1. Đồ thị phụ thuộc vào tần số của: (a-b) hằng số điện môi (phần thực và phần ảo) và (c-d) độ từ thẩm (phần thực và phần ảo) của FeCo-C. Đường nét liền là kết quả thực nghiệm được công bố trong [153] và đường nét đứt là kết quả mô phỏng của luận án	67
Hình 3.2. (a) Cấu trúc FeCo-C với tấm đồng, (b) phổ tổn hao phản xạ và (c) phổ hấp thụ thay đổi theo độ dày của tấm vật liệu FeCo-C	68
Hình 3.3. (a) Cấu trúc CM-MA1 với lớp trên cùng FeCo-C hình vuông, (b) phổ hấp thụ của cấu trúc	68
Hình 3.4. (a) Cấu trúc CM-MA2 với lớp trên cùng FeCo-C hình vuông có vòng đục lỗ, (b) phổ hấp thụ của cấu trúc	69
Hình 3.5. Cấu trúc tối ưu CM-MA3 và thông số hình học $a = 22$, $b = 20$, $r_1 = 9$, $r_2 = 7$, $r_3 = 5$, $r_4 = 3$, $q = 3$, $k = 0,5$, $t_m = 0,036$ mm	70
Hình 3.6. (a) Cấu trúc đục lỗ hai vòng, (b) Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA và (c) mức năng lượng bị tiêu tán trong lớp FeCo-C và FR-4	70
Hình 3.7. Mô phỏng véc-tơ từ trường và điện trường phân bố trên CM-MA: (a) Từ trường trong mặt phẳng (E, H), (b) từ trường trong mặt phẳng (H, k) và (c) điện trường trong mặt phẳng (E, k) tại tần số 9,40 GHz	71
Hình 3.8. Mô phỏng véc-tơ từ trường và điện trường phân bố trên CM-MA: (a) Từ trường trong mặt phẳng (E, H), (b) và (d) từ trường trong mặt phẳng (H, k), (c) và (e) điện trường trong mặt phẳng (E, k) tại tần số 12,50 GHz	72
Hình 3.9. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi hằng số điện môi của vật liệu FeCo-C được thay đổi giá trị của (a) phần thực và (b) phần ảo	73
Hình 3.10. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi độ từ thẩm của vật liệu FeCo-C được thay đổi giá trị của (a) phần thực và (b) phần ảo	74
Hình 3.11. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc (a) dưới các góc phân cực khác nhau và các góc tới khác nhau của chế độ phân cực (b) TE và (c) TM	75

- Hình 3.12. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi góc phân cực của sóng tới là 45° 76
- Hình 3.13. Mô phỏng véc-tơ điện trường và từ trường phân bố trên cấu trúc CM-MA tại tần số 9,4 GHz khi góc phân cực của sóng tới là 45° : (a) Từ trường trong mặt phẳng (E, H), Từ trường trong mặt phẳng (H, k) phân bố tại vị trí (b) tâm và (d) mép ngoài; (c) và (e) điện trường tương ứng trong mặt phẳng (E, k) 76
- Hình 3.14. Mô phỏng véc-tơ điện trường và từ trường phân bố trên cấu trúc CM-MA tại tần số 12,5 GHz khi góc phân cực của sóng tới là 45° : (a) Véc-tơ từ trường trong mặt phẳng (E, H), (b) Véc-tơ từ trường trong mặt phẳng (H, k) phân bố tại vị trí phân bố tại vị trí (bên trái) tâm và (bên phải) mép ngoài; (c) Véc-tơ điện trường trong mặt phẳng (E, k) 77
- Hình 3.15. Đồ thị thay đổi theo tần số của hằng số điện môi (phần thực và phần ảo) và độ từ thẩm (phần thực và phần ảo) của vật liệu (a) FeCo-C (10%), (b) FeCo-C (50%) (c) FeCo-C (75%), (d) FeCo-C (90%) và (e) graphene, tương ứng; (f) Biểu đồ hệ số tổn hao điện môi của các mẫu có tỷ lệ khối lượng C khác nhau 79
- Hình 3.16. a) Sơ đồ cấu trúc MA1 có cấu trúc cộng hưởng hình đĩa tròn và b) Mô phỏng phổ hấp thụ 81
- Hình 3.17. a) Sơ đồ cấu trúc MA2 có cấu trúc cộng hưởng gồm đĩa tròn và vòng tròn và b) Mô phỏng phổ hấp thụ 81
- Hình 3.18. a) Sơ đồ cấu trúc MA3 có cấu trúc cộng hưởng gồm đĩa tròn, vòng tròn và hình chữ L và b) Mô phỏng phổ hấp thụ 82
- Hình 3.19. Sơ đồ cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (75%) với các thông số hình học 82
- Hình 3.20. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi thay đổi độ dày lớp vật liệu FeCo-C (75%) 83
- Hình 3.21. So sánh phổ hấp thụ mô phỏng của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C dưới dạng tấm phủ với tỷ lệ carbon khác nhau: 10%, 50%, 75%, 90% và graphene nguyên chất 84
- Hình 3.22. So sánh phổ hấp thụ mô phỏng giữa vật liệu FeCo-C thông thường, cấu trúc MA và cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (75%) 85

- Hình 3.23. Giá trị trở kháng Z_r theo tần số của: a) cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (75%) và b) vật liệu FeCo-C (75%) thông thường tương ứng 86
- Hình 3.24. Mô phỏng dòng điện bề mặt tại (a) lớp kim loại phía trên và (b) lớp kim loại phản xạ phía dưới của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (75%) tại tần số 13,49 GHz 87
- Hình 3.25. Phân bố tổn hao năng lượng tại các lớp của cấu trúc CM-MA sử dụng FeCo-C (75%): (a -b) trên lớp kim loại tại mặt phẳng (E, H), (c) tại mặt phẳng (k, E) của cấu trúc CM-MA 87
- Hình 3.26. Tỷ lệ tổn hao năng lượng tại lớp FeCo-C (75%), FR-4 và đồng của cấu trúc CM-MA 88
- Hình 3.27. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng FeCo-C (75%) (a) dưới các góc phân cực khác nhau và các góc tới khác nhau của chế độ phân cực (b) TE và (c) TM 89
- Hình 3.28. Quá trình tạo mẫu vật liệu CM-MA và đo đạc thực nghiệm: (a) chuẩn bị mẫu vật liệu MA, (b) trộn FeCo-C với epoxy và chờ đóng rắn, (c) mẫu CM-MA sau khi chế tạo và (d) bố trí đo đạc thực nghiệm 90
- Hình 3.29. Phổ hấp thụ thực nghiệm với giá trị sai số chuẩn của các cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C với các tỷ lệ carbon khác nhau: a) 10%, b) 50%, c) 75 %, d) 90 % và graphene nguyên chất 91
- Hình 3.30. So sánh phổ hấp thụ (mô phỏng và thực nghiệm) của các cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C với các tỷ lệ carbon khác nhau: 10%, 50%, 75%, 90% và graphene nguyên chất 92
- Hình 3.31. So sánh phổ hấp thụ mô phỏng, thực nghiệm và khi giảm hằng số điện môi của CM-MA với các tỉ lệ C/FeCo khác nhau: 10%, 50%, 75%, 90% và graphene nguyên chất 93
- Hình 3.32. a) Sơ đồ cấu trúc ô cơ sở CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(10%) và (b) so sánh phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA với MA và tấm vật liệu FeCo-C(10%) thông thường 96
- Hình 3.33. Trở kháng của: a) CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(10%) và b) tấm vật liệu FeCo-C (10%) thông thường 97
- Hình 3.34. Tỷ lệ tổn hao năng lượng tiêu tán tại lớp FeCo-C (10%), FR-4 và đồng của cấu trúc CM-MA 98

Hình 3.35. Mô phỏng dòng điện bề mặt tại (a) lớp kim loại phía trên và (b) lớp kim loại phản xạ phía dưới của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (10%) tại tần số 12.8 GHz	99
Hình 3.36. Mô phỏng tổn hao năng lượng tại các lớp của cấu trúc CM-MA sử dụng FeCo-C (10%): (a -b) trên lớp kim loại tại mặt phẳng (E, H), (c) tại mặt phẳng (k, E) của cấu trúc CM-MA	99
Hình 3.37. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (10%) (a) dưới các góc tới khác nhau của chế độ phân cực a) TE và b) TM	100
Hình 3.38. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (10%) của chế độ phân cực a) TE và (b) TM tại góc phân cực 70° và góc tới 70°	101
Hình 4.1. Giá trị độ điện thẩm và từ thẩm (phần thực và phần ảo) theo tần số của vật liệu NZFO	105
Hình 4.2. a) Sơ đồ cấu trúc ô cơ sở CM-MA sử dụng vật liệu NZFO và các tham số cấu trúc b) So sánh phổ hấp thụ của vật liệu NZFO, cấu trúc vật liệu biến hóa và CM-MA sử dụng NZFO	107
Hình 4.3. a) Phần thực trở kháng Z_r của CM-MA sử dụng NZFO và b) Phần thực và phần ảo trở kháng Z_r của tấm NZFO	108
Hình 4.4. Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt (a) mặt trên cấu trúc tuần hoàn (b) Mặt sau tấm phản xạ tại tần số 13,59 GHz của CM-MA sử dụng NZFO	109
Hình 4.5. Mô phỏng tổn hao năng lượng trên mặt cắt ngang của (a-b) trong mặt phẳng (E, H), trên lớp kim loại, (c) trong mặt phẳng (E, k) ở tần số 13,59 GHz của CM-MA sử dụng NZFO	109
Hình 4.6. Mô phỏng phân bố từ trường của cấu trúc CM-MA trong mặt phẳng (H, k): (a) tại mặt cắt với vòng tròn ngoài và (b) tại vị trí $y = 0$	110
Hình 4.7. Tiêu tán năng lượng tại các lớp vật liệu NZFO, FR-4 và đồng của cấu trúc CM-MA	110
Hình 4.8. Quá trình chế tạo mẫu: a) chuẩn bị cấu trúc MA; b) Phối trộn NZFO với paraffin và c) mẫu CM-MA sử dụng NZFO sau khi chế tạo	111

Hình 4.9. a) Bố trí từ trường trong hệ đo và (b-c) đo đặc thực nghiệm khả năng điều khiển biên độ hấp thụ bằng từ trường ngoài	112
Hình 4.10. So sánh phổ hấp thụ mô phỏng và thực nghiệm cấu trúc CM-MA sử dụng NZFO	113
Hình 4.11. Phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA được tăng cường khi thay đổi giá trị từ trường từ 0 đến 2000 Oe	114
Hình 4.12. Kết quả mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi tăng giá trị của a) phần thực và b) phần ảo độ từ thẩm của vật liệu NZFO lên 1,5 và 2 lần	114
Hình 4.13. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc (a) dưới các góc phân cực khác nhau và các góc tới khác nhau của chế độ phân cực (b) TE và (c) TM	116
Hình 4.14. Độ từ thẩm hiệu dụng của vật liệu MFO tại các giá trị từ trường khác nhau	118
Hình 4.15. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng MFO với độ dày lớp vật liệu MFO khác nhau	119
Hình 4.16. a) Sơ đồ cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu MFO và b) phổ hấp thụ của cấu trúc	120
Hình 4.17. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng MFO và CM-MA thuần điện môi	121
Hình 4.18. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng MFO khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 0 Oe; 1,15 kOe; 1,35 kOe; 1,55 kOe; 1,75 kOe và 1,95 kOe tương ứng	122
Hình 4.19. Mô phỏng dòng điện bề mặt tại mặt trên cấu trúc tuần hoàn và mặt sau tấm phản xạ: (a-b) tại tần số 9,96 GHz và (c-d) tại tần số 10,43 GHz khi không áp dụng từ trường	123
Hình 4.20. Mô phỏng dòng điện bề mặt tại mặt trên cấu trúc tuần hoàn và mặt sau tấm phản xạ: (a-b) tại tần số 10,24 GHz và (c-d) tại tần số 10,97 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,15 kOe	124
Hình 4.21. Mô phỏng dòng điện bề mặt tại mặt trên cấu trúc tuần hoàn và mặt sau tấm phản xạ: (a-b) tại tần số 10,40 GHz và (c-d) tại tần số 11,13 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,35 kOe	124

Hình 4.22. Mô phỏng dòng điện bề mặt tại mặt trên cấu trúc tuần hoàn và mặt sau tấm phản xạ: (a-b) tại tần số 10,60 GHz và (c-d) tại tần số 11,32 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,55 kOe	125
Hình 4.23. a) Mô phỏng dòng điện bề mặt tại mặt trên cấu trúc tuần hoàn và b) mặt sau tấm phản xạ tần số 11,54 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,75 kOe	125
Hình 4.24. a) Mô phỏng dòng điện bề mặt tại mặt trên cấu trúc tuần hoàn và b) mặt sau tấm phản xạ tần số 11,80 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,95 kOe	125
Hình 4.25. Mô phỏng từ trường trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ tại tần số: a) 9,96 GHz và b) 10,43 GHz khi không có từ trường tác dụng	126
Hình 4.26. Mô phỏng từ trường trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ tại tần số: a) 10,24 GHz và b) 10,97 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,15 kOe	126
Hình 4.27. Mô phỏng từ trường trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ tại tần số: a) 10,40 GHz và b) 11,13 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,35 kOe	126
Hình 4.28. Mô phỏng từ trường trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ tại tần số: a) 10,60 GHz và b) 11,32 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,55 kOe	127
Hình 4.29. Mô phỏng từ trường trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ tại tần số 11,54 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,75 kOe	127
Hình 4.30. Mô phỏng từ trường trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ tại tần số 11,80 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,95 kOe	127
Hình 4.31. Trở kháng của cấu trúc CM-MA khi không có từ trường ngoài áp dụng	128
Hình 4.32. Trở kháng của cấu trúc CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,15 kOe	128
Hình 4.33. Trở kháng của cấu trúc CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,35 kOe	129
Hình 4.34. Trở kháng của cấu trúc CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,55 kOe	129

Hình 4.35. Trở kháng của cấu trúc CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,75 kOe 130

Hình 4.36. Trở kháng của cấu trúc CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,95 kOe 130

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Sự phát triển nhanh của các hệ thống thông tin vô tuyến, thiết bị điện tử công suất cao, công nghệ radar, Internet vạn vật và các nền tảng truyền thông thế hệ mới làm gia tăng mạnh mật độ bức xạ điện từ trong môi trường sống, môi trường công nghiệp và các hệ thống kỹ thuật [1, 2]. Những tác động của trường điện từ ảnh hưởng đến môi trường và sức khỏe con người luôn là chủ đề đang được quan tâm và thu hút nhiều nghiên cứu trong thời gian gần đây [3-5]. Nhiều điện từ không chỉ ảnh hưởng đến độ ổn định, độ tin cậy của thiết bị điện tử, mà còn đặt ra yêu cầu ngày càng cao đối với các giải pháp che chắn, hấp thụ và kiểm soát sóng điện từ trong cả lĩnh vực dân sự và quốc phòng. Trong đó, vật liệu hấp thụ sóng điện từ được xem là hướng tiếp cận hiệu quả hơn so với che chắn phản xạ, do có khả năng chuyển hóa năng lượng sóng điện từ thành nhiệt, hạn chế phản xạ thứ cấp và góp phần làm giảm tiết diện phản xạ radar [6-8].

Vật liệu hấp thụ sóng điện từ (Electromagnetic Wave Absorbing Materials - EMWAM) đã được phát triển mạnh nhằm đáp ứng yêu cầu kiểm soát nhiễu điện từ trong vùng vi sóng GHz. Theo cơ chế chi phối, EMWAM thường được chia thành ba nhóm chính: vật liệu hấp thụ điện môi, vật liệu hấp thụ trên cơ sở điện trở/dẫn điện và vật liệu tổn hao từ. Trong đó, vật liệu điện môi thường có ưu thế về phối hợp trở kháng; vật liệu dẫn điện có tổn hao điện mạnh, khối lượng riêng thấp; còn vật liệu từ như ferrite, kim loại và hợp kim từ có thể đồng thời cải thiện phối hợp trở kháng và tăng tiêu tán năng lượng thông qua độ từ thẩm [9, 10]. Các EMWAM lý tưởng phải có các đặc điểm “mạnh, rộng, nhẹ và mỏng” (hấp thụ mạnh sóng điện từ, dải hấp thụ hiệu quả rộng, trọng lượng nhẹ và mỏng) [11]. Tuy nhiên, các EMWAM truyền thống cũng bộc lộ những giới hạn mang tính hệ thống khi hướng tới đồng thời các tiêu chí “mỏng - nhẹ - hấp thụ mạnh - dải rộng”. Vật liệu điện môi thuần thường thiếu kênh tổn hao từ nên hiệu quả hấp thụ ở GHz bị phụ thuộc mạnh vào tối ưu phần ảo của hằng số điện môi (ϵ'') theo độ dày; vật liệu carbon, vật liệu dẫn điện tuy có tổn hao điện lớn nhưng lại dễ rơi vào trạng thái phối hợp trở kháng kém, làm tăng phản xạ bề mặt và gây ô nhiễm thứ cấp do năng lượng bị phản xạ trở lại môi trường [12, 13]. Đối với nhóm vật liệu từ, các hệ nền Fe/kim loại từ có thể cho hấp thụ mạnh, nhưng thường gặp các nhược điểm như mật độ lớn, dễ oxy hóa và đặc biệt là trở kháng

khó phù hợp với không khí, dẫn tới dải hấp thụ hẹp hoặc khó đạt hấp thụ cao với độ dày mỏng. Để cải thiện điều này, các nhà nghiên cứu thường sử dụng phương pháp cải thiện độ từ thẩm và tổn hao từ của vật liệu bằng thiết kế cấu trúc hình thái [14, 15]; phương pháp còn lại là kết hợp vật liệu đa thành phần (vật liệu tổ hợp) để tối ưu hóa phối hợp trở kháng [16, 17].

Nhu cầu hiện nay không chỉ dừng ở hấp thụ cao mà còn cần tối ưu dải tần, giảm nhạy theo phân cực và góc tới và đặc biệt là khả năng điều chỉnh tần số hấp thụ chủ động. Trên nền tảng nhu cầu đó, vật liệu biến hóa (metamaterial - MM) đã mở ra một hướng thiết kế vật liệu theo cấu trúc, thay vì chỉ dựa vào thành phần hóa học. Theo định nghĩa do Walser đề xuất vào năm 2001, MM là lớp vật liệu nhân tạo có thể tạo ra các đáp ứng điện từ phi tự nhiên, tức các đặc trưng hiếm gặp hoặc không tồn tại trong vật liệu thông thường [18]. Bản chất của MM là vật liệu tạo thành bởi tập hợp các phần tử cấu trúc dưới bước sóng (thường được gọi là “nguyên tử nhân tạo”), sắp xếp theo quy luật tuần hoàn theo 2D hoặc 3D. Mỗi phần tử hoạt động tương tự một mạch cộng hưởng điện từ; nhờ thiết kế hình học và quy luật sắp xếp, có thể điều khiển đáp ứng hiệu dụng của môi trường (ví dụ: hằng số điện môi, độ từ thẩm, trở kháng tương đương...) theo mục tiêu mong muốn. Vì vậy, thay đổi hình dạng, kích thước và cách bố trí các “nguyên tử nhân tạo” chính là chìa khóa tạo nên các tính chất đặc biệt của MM. Vì vậy, dù nhiều hướng tối ưu vi cấu trúc và vật liệu tổ hợp đã được phát triển, bài toán cân bằng giữa tối ưu sóng đi vào bên trong vật liệu (phối hợp trở kháng) và tiêu tán đủ mạnh (tổn hao điện, từ) vẫn là rào cản khi cần lớp hấp thụ mỏng nhưng làm việc đa băng, dải rộng.

Vật liệu điển hình của MM là vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ (metamaterial absorber - MA), được Landy và cộng sự đề xuất vào năm 2008 [19]. Từ cột mốc này, nhiều cấu trúc hấp thụ tối ưu đã được phát triển, cho phép “thiết kế theo yêu cầu” các đặc tính như: hấp thụ đa băng, hấp thụ dải rộng, giảm nhạy theo phân cực và góc tới của sóng điện từ... phục vụ các mục tiêu khác nhau trong dân sự và quốc phòng [20-23]. Trong hơn một thập kỷ qua, các MA hoạt động từ vùng vi sóng đến vùng quang học đã được đề xuất và chứng minh bằng thực nghiệm. Tuy nhiên, để chuyển các ý tưởng MA thành giải pháp ứng dụng ổn định và kinh tế, vẫn còn những vấn đề cốt lõi cần giải quyết, tiêu biểu gồm: tối ưu cấu trúc để giảm độ phức tạp chế tạo nhưng vẫn duy trì hấp thụ cao; nâng cao tính bền vững theo phân cực và góc tới; mở rộng

dải tần làm việc (đa đỉnh hoặc dải rộng) và phát triển các cơ chế điều khiển, điều chỉnh tần số hấp thụ theo tác nhân bên ngoài.

Trong vùng tần số GHz, nhu cầu về các lớp hấp thụ/che chắn mỏng, nhẹ, linh hoạt và hấp thụ dải rộng ngày càng tăng, đặt ra thách thức lớn đối với vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ. Để mở rộng băng thông, nhiều nghiên cứu đã tích hợp nhiều phần tử cộng hưởng trong cùng ô cơ sở hoặc thiết kế cấu trúc MA đa lớp nhằm tạo các đỉnh cộng hưởng chồng lấn [24]. Tuy nhiên, các cách tiếp cận này thường làm tăng kích thước ô cơ sở, chiều dày cấu trúc hoặc độ phức tạp chế tạo, làm giảm lợi thế “mỏng - nhẹ” của MA. Một hướng khác là sử dụng linh kiện ngoại vi như điện trở, tụ điện để điều chỉnh trở kháng và tham số cộng hưởng [25]. Dù cho hiệu quả điều chỉnh rõ rệt, giải pháp này lại làm tăng đáng kể độ phức tạp chế tạo, nhất là khi cần tích hợp số lượng lớn linh kiện và đối với các mẫu có kích thước nhỏ ở vùng tần số cao.

Để khắc phục các hạn chế trên, hướng tích hợp vật liệu có tổn hao nội tại vào cấu trúc MA đang thu hút nhiều quan tâm. Trong đó, tổ hợp vật liệu từ - vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ (Composite based on magnetic material - metamaterial absorbers - CM-MA) hướng tới khắc phục các hạn chế về kích thước, độ phức tạp công nghệ của một số thiết kế dải rộng truyền thống, vừa mở ra khả năng điều khiển đặc tính hấp thụ. Đối với tổ hợp vật liệu CM-MA hấp thụ dải rộng, hiện nay, các nghiên cứu trên thế giới chủ yếu sử dụng vật liệu từ dưới dạng tấm phủ, các vật liệu từ sử dụng trong cấu trúc đa dạng như sắt carbonyl, ferrite, FeCo-C, CoNi/epoxy...[26-30], tuy nhiên, tối ưu độ dày của cấu trúc CM-MA cần được nghiên cứu và bên cạnh đó CM-MA sử dụng vật liệu từ như cấu trúc cộng hưởng chưa được nghiên cứu rộng rãi. Ngoài ra, hướng nghiên cứu điều khiển phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA chủ yếu tập trung điều khiển tần số hấp thụ, trong đó vật liệu từ thường được sử dụng là magie ferrite và yttrium iron garnet [27, 31, 32]. Một số hệ vật liệu từ khác phù hợp để điều khiển tính chất hấp thụ còn chưa được nghiên cứu, đặc biệt các nghiên cứu về điều khiển biên độ hấp thụ tại tần số cố định còn chưa được quan tâm. Bên cạnh đó, nghiên cứu điều khiển phổ hấp thụ đa đỉnh cũng chưa được nghiên cứu đầy đủ.

Trong nước, trong vùng tần số GHz, hướng nghiên cứu vật liệu từ đơn lẻ hoặc cấu trúc MA sử dụng cấu trúc cộng hưởng kim loại hấp thụ sóng điện từ đang được quan tâm, phát triển [33-36]. Một số hệ vật liệu từ như Ni-Zn ferrite,

hexaferrite, hệ vật liệu từ-điện môi...[37-39] đã được nghiên cứu cho hấp thụ sóng điện từ, một số luận án về vật liệu từ hấp thụ sóng điện từ đã được triển khai thực hiện như “Nghiên cứu chế tạo một số vật liệu hấp thụ sóng vi ba trên cơ sở tổ hợp vật liệu điện môi $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4$ với các hạt nano từ” của NCS. Chu Thị Ánh Xuân (năm 2018) và “Nghiên cứu tổng hợp và chế tạo sơn nguy trang hấp thụ sóng điện từ radar trên cơ sở polyme dẫn chứa ferocen và spinel ferit” của NCS Hoàng Anh Tuấn (năm 2010) ... [40, 41] và các luận án nghiên cứu về vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ dưới sự hướng dẫn của GS.TS. Vũ Đình Lâm và nhóm nghiên cứu của Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam đã được thực hiện [42-45]. Tuy nhiên, hướng nghiên cứu về tổ hợp vật liệu nền vật liệu từ và vật liệu biến hóa cho hấp thụ dải rộng hoặc có khả năng điều khiển đặc tính hấp thụ thông qua từ trường ngoài là hướng đi mới, không có sự trùng lặp với các nghiên cứu trước đây và hứa hẹn góp phần chế tạo hệ vật liệu hấp thụ sóng điện từ mới, hiệu quả và thông minh hơn.

Từ các lý do trên, nghiên cứu sinh đã lựa chọn đề tài **“Nghiên cứu chế tạo và điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ tại vùng tần số GHz dựa trên tổ hợp vật liệu từ (nền FeCo và MFe_2O_4) và metamaterials”**. Luận án trình bày kết quả nghiên cứu đạt được về việc thiết kế và chế tạo một số CM-MA sử dụng vật liệu từ nền FeCo cho hấp thụ sóng điện từ dải rộng và CM-MA sử dụng vật liệu từ nền MFe_2O_4 có khả năng điều khiển độc lập cường độ hấp thụ hoặc tần số hấp thụ bằng từ trường ngoài của CM-MA; cũng như đánh giá sự đóng góp và vai trò của vật liệu từ và vật liệu biến hóa cấu thành nên tổ hợp vật liệu.

2. Mục tiêu nghiên cứu

- Thiết kế và chế tạo tổ hợp vật liệu CM-MA sử dụng vật liệu từ nền FeCo có khả năng hấp thụ sóng điện từ dải rộng trong vùng tần số GHz.

- Thiết kế và chế tạo tổ hợp vật liệu CM-MA sử dụng vật liệu từ nền MFe_2O_4 có khả năng điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ thông qua từ trường ngoài.

3. Nội dung nghiên cứu

3.1 Phương pháp nghiên cứu

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

Quy trình nghiên cứu bắt đầu bằng việc thiết kế cấu trúc và mô phỏng số các đặc tính điện từ (bao gồm khả năng hấp thụ, phản xạ và truyền qua) của cấu trúc hấp thụ trên phần mềm chuyên dụng. Các dữ liệu mô phỏng này sẽ được đối chiếu với kết quả tính toán lý thuyết để đánh giá độ chính xác. Sau bước tối ưu hóa kích thước, mẫu CM-MA được gia công bằng các kỹ thuật như nghiền cơ năng lượng cao, quang khắc và phủ trực tiếp. Cuối cùng, tính chất điện từ, khả năng điều khiển tần số và biên độ hấp thụ sóng điện từ của CM-MA sẽ được thực nghiệm và kiểm chứng thông qua các kết quả đo thực nghiệm.

3.2 Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Vật liệu biến hóa tích hợp vật liệu từ nền FeCo dưới dạng tấm phủ hoặc cấu trúc cộng hưởng có khả năng hấp thụ sóng điện từ dải rộng.

- Vật liệu biến hóa tích hợp vật liệu từ nền MFe_2O_4 có khả năng điều khiển độc lập biên độ và tần số hấp thụ thông qua từ trường ngoài.

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

Ý nghĩa khoa học

- Góp phần xây dựng các mô hình vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ dải rộng sử dụng vật liệu từ có khả năng điều khiển đặc tính hấp thụ sóng điện từ thông qua từ trường ngoài.

- Làm rõ về cơ chế hoạt động, sự đóng góp của các vật liệu từ trong cấu trúc vật liệu biến hoá về khả năng hấp thụ dải rộng, điều khiển về biên độ và tần số phổ hấp thụ.

Ý nghĩa thực tiễn:

Các kết quả trong luận án đóng góp vào việc sử dụng CM-MA ứng dụng trong che chắn sóng điện từ, bộ thu giữ năng lượng, cảm biến... phục vụ mục đích quân sự - quốc phòng và dân sinh.

5. Những đóng góp mới

- Mở rộng và tăng cường khả năng hấp thụ của vật liệu từ nền FeCo bằng cách tích hợp vào cấu trúc vật liệu biến hoá.

- Điều khiển biên độ không thay đổi tần số cộng hưởng và tần số hấp thụ đa đỉnh của vật liệu biến hoá sử dụng vật liệu từ nền MFe_2O_4 bằng từ trường ngoài.

Bố cục của luận án

Luận án gồm có 150 trang, bao gồm phần mở đầu, 4 chương nội dung và các kết luận, bao gồm:

Mở đầu

Chương 1. Tổng quan về tổ hợp vật liệu (từ - vật liệu biến hóa) hấp thụ sóng điện từ

Giới thiệu tổng quan về vật liệu từ, MA, cơ chế hoạt động, MA hấp thụ dải rộng, vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ sử dụng vật liệu từ và điều khiển khả năng hấp thụ sóng điện từ bằng từ trường ngoài.

Chương 2. Phương pháp nghiên cứu

Trình bày các phương pháp lý thuyết và thực nghiệm để chế tạo tổ hợp vật liệu, đo đạc các thông số điện từ được sử dụng trong luận án để nghiên cứu CM-MA.

Chương 3. Nghiên cứu tổ hợp vật liệu hấp thụ sóng điện từ dải rộng dựa trên vật liệu từ FeCo-C và vật liệu biến hóa

Chương 4. Nghiên cứu điều khiển biên độ và tần số hấp thụ sóng điện từ của vật liệu dựa trên tổ hợp vật liệu từ nền MFe_2O_4 và vật liệu biến hóa

Kết luận

Luận án này được thực hiện và sử dụng trên thiết bị được trang bị tại Phòng Thí nghiệm số, Học viện Khoa học và Công nghệ và Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Kết quả chính của luận án được công bố trên 02 bài báo quốc tế thuộc tạp chí SCIE, 01 sáng chế được cấp bằng độc quyền, 01 bài báo trên tạp chí quốc gia đã được chấp nhận đăng và 02 bài báo thuộc kỷ yếu hội nghị quốc tế.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ TỔ HỢP VẬT LIỆU (TỪ - VẬT LIỆU BIẾN HÓA) HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ

Trong những năm gần đây, nhu cầu phát triển các vật liệu hấp thụ sóng điện từ có đặc tính mỏng, nhẹ, hấp thụ mạnh và dải rộng ngày càng trở nên cấp thiết trong các lĩnh vực che chắn điện từ, cảm biến, thu giữ năng lượng và kỹ thuật tàng hình. Để đáp ứng các yêu cầu này, hướng nghiên cứu kết hợp vật liệu từ với vật liệu biến hóa đã thu hút nhiều sự quan tâm nhờ khả năng đồng thời cải thiện phối hợp trở kháng, tăng cường tổn hao nội tại và mở rộng khả năng điều khiển phổ hấp thụ. Trên cơ sở đó, Chương 1 trình bày tổng quan về cơ chế hấp thụ sóng điện từ của vật liệu, các hệ vật liệu từ hấp thụ sóng điện từ, vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ, cũng như các nghiên cứu liên quan đến tổ hợp vật liệu từ - vật liệu biến hóa. Từ các kết quả nghiên cứu trong nước và trên thế giới, chương này làm rõ cơ sở khoa học, xu hướng nghiên cứu và những vấn đề còn tồn tại, qua đó định hướng cho các nội dung nghiên cứu được triển khai trong luận án.

1.1 Cơ chế hấp thụ sóng điện từ của vật liệu

Khi một sóng điện từ tới truyền bề mặt một lớp vật liệu, năng lượng của sóng tới sẽ được chia thành ba thành phần: phản xạ ở mặt phân cách, truyền qua lớp vật liệu và phần suy giảm bên trong vật liệu (chuyển hoá chủ yếu thành nhiệt). Để vật liệu hấp thụ được sóng điện từ cần thoả mãn hai điều kiện chính sau: Phối hợp trở kháng - trở kháng hiệu dụng tại bề mặt vật liệu nên càng gần trở kháng của môi trường không khí càng tốt, khi đó phản xạ giảm và năng lượng đi sâu vào vật liệu tăng; tiêu tán năng lượng sau khi đã vào bên trong vật liệu, biên độ sóng cần suy giảm nhanh nhờ các cơ chế tổn hao điện môi hoặc tổn hao từ. Nếu chỉ tăng tổn hao mà bỏ qua phối hợp trở kháng, lớp vật liệu có thể trở thành “phản xạ mạnh” và hiệu quả hấp thụ tổng thể lại kém. Ngược lại, nếu phối hợp trở kháng tốt nhưng tổn hao yếu thì sóng đi xuyên qua và năng lượng không được tiêu tán đáng kể [46, 47].

Khi biểu diễn vật liệu bằng hằng số điện môi phức $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ và độ từ thẩm phức $\mu_r = \mu' - j\mu''$, trở kháng vào của lớp hấp thụ tại mặt tiếp xúc với không khí phụ thuộc vào ϵ_r , μ_r , tần số và độ dày d của vật liệu. Tổn hao phản xạ (Reflection loss - RL) thường được tính bằng [48]:

$$RL(dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|, \quad (1.1)$$

trong đó, Z_0 là trở kháng môi trường không khí, còn Z_{in} là trở kháng vào của lớp hấp thụ. Biểu thức này cho thấy RL chỉ nhỏ (âm lớn về độ lớn) khi Z_{in} tiến gần Z_0 ; vì vậy vai trò của μ' và ε' (chi phối trở kháng) quan trọng không kém μ'' và ε'' (chi phối tổn hao).

Trong các vật liệu từ (ferrite, sắt từ, ferrimagnetic và các tổ hợp vật liệu chứa pha từ), độ từ thẩm hiệu dụng $\mu_{eff}(f)$ có thể được điều chỉnh đồng thời hai yếu tố: phần thực độ từ thẩm (μ') thông qua phối hợp trở kháng và phần ảo của độ từ thẩm (μ'') thông qua tiêu tán năng lượng. Đây là ưu điểm then chốt của vật liệu từ so với nhiều điện môi thuần. Tuy nhiên, phổ $\mu_{eff}(f)$ của vật liệu từ thường có tính tán sắc mạnh theo tần số do các cơ chế cộng hưởng (vách đô men, cộng hưởng sắt từ...), nên việc lựa chọn hệ vật liệu và kiểm soát vi cấu trúc trở thành yếu tố quyết định [49].

Về bản chất, sự suy giảm năng lượng sóng điện từ trong lớp hấp thụ thường được quy về hai nhóm chính: tổn hao điện môi và tổn hao từ. Trong vật liệu từ thực tế, hai nhóm cơ chế này thường cùng tồn tại do bản chất đa pha, và các yếu tố khuyết tật. Vì vậy, để giải thích hoặc tối ưu phổ hấp thụ, cần phân tích đồng thời: hằng số điện môi, độ từ thẩm, ảnh hưởng độ dày và điều kiện phối hợp [50].

1.1.1 Cơ chế tổn hao từ

Độ từ thẩm của vật liệu được mô tả bởi độ từ thẩm phức [51]:

$$\mu(\omega) = \mu'(\omega) - j\mu''(\omega), \quad (1.2)$$

$$\tan \delta_m = \frac{\mu''}{\mu'}, \quad (1.3)$$

trong đó μ' là phần thực của độ từ thẩm biểu thị khả năng tích trữ năng lượng từ trường, còn μ'' là phần ảo của độ từ thẩm, là đại lượng đặc trưng cho khả năng tiêu tán năng lượng từ trường của vật liệu. Khi sóng điện từ lan truyền trong vật liệu, công suất tổn hao phụ thuộc lớn vào giá trị của μ'' . Tổn hao từ gồm các nhóm cơ chế chính: cộng hưởng sắt từ, cộng hưởng vách đô men (domain-wall resonance -DWR), tổn hao từ trễ, tổn hao do dòng xoáy và cộng hưởng trao đổi. Có thể chia tổn hao từ thành hai nguyên nhân chính: tổn hao nội tại liên quan đến bản chất vật liệu và tổn hao ngoại sinh liên quan đến hình dạng, kích thước và môi trường. Tổn hao từ trễ là cơ chế tổn hao nội tại chiếm

ưu thế, bắt nguồn từ quá trình đảo chiều lặp lại của các mômen từ dưới tác dụng của từ trường ngoài biến thiên, dẫn đến sự hình thành đường cong từ trễ và làm tiêu tán năng lượng, đặc biệt rõ rệt trong các vật liệu sắt từ. Bên cạnh đó, sự không đồng nhất trong cấu trúc vi mô, bao gồm các khuyết tật tinh thể, biên giới hạt và sự phân bố pha không đồng đều, có thể cản trở sự dịch chuyển của các miền từ, qua đó làm gia tăng mức tổn hao năng lượng. Ngoài các cơ chế nội tại, tổn hao ngoại sinh (extrinsic) chủ yếu là tổn hao do dòng điện xoáy, phát sinh khi từ thông biến thiên cảm ứng các dòng điện Foucault trong vật liệu dẫn điện; cơ chế này phụ thuộc mạnh vào độ dẫn điện, chiều dày cũng như cấu trúc hình học của vật liệu [52] [53].

Tổn hao từ trễ

Tổn hao từ trễ xuất phát từ tính không thuận nghịch của quá trình đảo vách đômen và quay mômen từ khi vật liệu chịu tác động của từ trường biến thiên. Đường cong từ trễ tiêu biểu của vật liệu sắt từ được trình bày trong Hình 1.1. Trong vùng tần số thấp, năng lượng tổn hao trên một chu kỳ bằng diện tích vòng trễ $B - H$. Tuy nhiên, trong các phép đo hấp thụ vi sóng, biên độ từ trường kích thích H_{rf} thường nhỏ, nên lực kháng từ H_c thường nhỏ, diện tích đường từ trễ nhỏ và đóng góp từ trễ thường không còn chi phối nhiều so với các cơ chế cộng hưởng, đặc biệt là cộng hưởng sắt từ (ferromagnetic resonance - FMR). Các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng, hấp thụ vi sóng của vật liệu từ, tổn hao từ trễ thường được xem là thứ yếu trong điều kiện sóng vi sóng biên độ nhỏ, trong khi các cơ chế cộng hưởng và dòng xoáy quyết định tổn hao trong dải GHz [53, 54].

Đối với vật liệu hấp thụ cần giảm H_c (lực kháng từ) giúp giảm tổn hao từ trễ và thường có lợi cho các loại tổn hao khác hay còn gọi là “đáp ứng mềm”. Thực tế, muốn tăng hấp thụ trong GHz thì cần tối ưu các cơ chế động (DWR/FMR/ER) và tăng tổn hao dòng xoáy [6].

Tổn hao do chuyển động vách đômen và cộng hưởng vách đômen

Đối với vật liệu sắt từ mềm, dưới kích thích từ trường xoay chiều, vách đômen có thể dịch chuyển nhằm tái phân bố cấu trúc đômen theo hướng giảm năng lượng tự do. Quá trình này tiêu tán năng lượng do: ma sát tạo bởi chuyển động của vách đômen trong vật liệu; ghim vách (pinning) tạo bởi khuyết tật, tạp chất, ứng suất dư; tán xạ magnon - phonon và tương tác với biên hạt.

Khi tần số tăng, vách đômen không còn theo hướng của trường kích thích một cách đàn hồi; khi đạt tần số cộng hưởng vách đômen, làm μ'' tăng trong

một miền tần số nhất định (thường đạt được ở tần số từ MHz đến vùng vài GHz, phụ thuộc mạnh vào cấu trúc vi mô dao động theo từ trường ngoài, tăng tổn hao do ma sát và lực kháng từ của vật liệu). Các vật liệu từ nói chung và vật liệu ferrite nói riêng, cộng hưởng vách đômên đóng góp nhiều đến tổn hao ở vùng tần số thấp, cỡ MHz đến vài GHz [53]. Độ lớn của đômên ảnh hưởng bởi kích thước hạt, hạt lớn dễ hình thành nhiều đômên từ đó đóng góp vách đômên rõ; hạt nhỏ (tiệm cận đơn đômên) làm yếu dần cơ chế vách đômên và chuyển trọng tâm tổn hao sang quay mômen (spin rotation) và cộng hưởng tự nhiên [55, 56]. Bên cạnh đó, biên hạt và khuyết tật làm tăng tổn hao do ma sát nội tại trong vật liệu (có thể tăng μ'' ở miền thấp). Tuy nhiên, nhưng lượng khuyết tật quá lớn sẽ làm giảm μ' và giảm tính mềm từ, gây ra bất lợi cho phối hợp trở kháng trong hấp thụ [6].

Trong vùng tần số GHz, cộng hưởng sắt từ đóng góp quan trọng nhất cho μ'' của nhiều vật liệu từ. Về cơ chế, mômen từ tổng cộng (từ độ M_s) phụ thuộc độ lớn giá trị hiệu dụng H_{eff} (gồm trường ngoài, trường khử từ, trường dị hướng tinh thể, trao đổi...), và tiêu tán năng lượng thông qua hệ số suy giảm Gilbert α trong phương trình LLG [57]. Điều kiện cộng hưởng xảy ra khi tần số kích thích trùng với tần số dao động riêng của các mô men từ, khi đó μ'' đạt cực đại (hấp thụ năng lượng mạnh nhất); μ' thay đổi nhanh và độ rộng đỉnh cộng hưởng phụ thuộc giá trị α và năng lượng dị hướng từ của vật liệu. Phương trình Kittel thường dùng để liên hệ tần số cộng hưởng với các trường hiệu dụng. Một dạng hay dùng cho vật liệu có trường dị hướng H_k và độ từ hóa bão hòa M_s được trình bày theo công thức [58]:

$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{H_k (H_k + 4\pi M_s)}. \quad (1.4)$$

và khi có từ trường ngoài, H_k được thay bằng các thành phần của H_{eff} . Khi năng lượng dị hướng lớn, H_k có xu hướng đẩy f_r lên cao từ đó mở rộng hấp thụ lên vùng tần số cao hơn. Khi M_s tăng có thể làm tăng độ từ thẩm và tần số cộng hưởng sắt từ của vật liệu.

Cộng hưởng trao đổi

Hấp thụ vi sóng do cộng hưởng trao đổi liên quan đến cộng hưởng từ trong vật liệu, đặc biệt là các tổ hợp vật liệu sắt từ và phản sắt từ, trong đó sự ghép nối trao đổi giữa các lớp từ tính làm dịch chuyển tần số FMR. Việc tăng cường khả năng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu bằng cách tạo ra các dải hấp

thụ rộng hơn, có thể điều chỉnh được thông qua các tương tác giao diện phức tạp (tổn hao điện môi/từ tính, phối hợp trở kháng). Các cơ chế chính bao gồm phân cực giao diện, tán xạ nhiều lần, tổn hao dẫn điện, dòng điện xoáy, tất cả đều được tối ưu hóa bằng cách tinh chỉnh cấu trúc vi mô (giao diện, kích thước hạt, cấu trúc rỗng) để tiêu tán năng lượng hiệu quả, thường thấy trong các vật liệu tổ hợp ferrite/carbon [6].

Cơ chế này được chi phối bởi sự truyền năng lượng giữa các hạt từ và các vùng bề mặt phân cách của chúng, gồm: Độ nhạy vi cấu trúc hấp thụ vi sóng do cộng hưởng trao đổi rất nhạy với độ kết tinh và kích thước hạt. Trong vật liệu hạt nano, khi kích thước giảm, ghép trao đổi giữa các pha từ mềm và từ cứng hoặc giữa các hạt kề nhau trở nên chi phối; Tăng cường trường hiệu dụng: Sự ghép này tạo ra một trường trao đổi nội tại bổ sung, cộng thêm vào trường dị hướng (H_k), đẩy tần số cộng hưởng (f_r) lên vùng cao hơn, chẳng hạn như băng Ku (12 - 18 GHz). Trong các hệ vật liệu tổ hợp, cộng hưởng trao đổi thường hoạt động đồng thời với hồi phục phân cực điện môi và phân cực giữa các bề mặt, qua đó mở rộng đáng kể dải tần hấp thụ hiệu quả [55, 59].

Tổn hao dòng xoáy

Đối với vật liệu từ có độ dẫn điện cao (Fe, Co, Ni, hợp kim, kim loại...), từ trường biến thiên cảm ứng dòng điện xoáy, gây tổn hao năng lượng dưới dạng nhiệt Joule và đồng thời làm biến dạng phân bố từ trường trong vật liệu. Cơ sở lý thuyết và diễn giải vật lý kinh điển về tổn hao dòng xoáy trong vật liệu sắt từ được hệ thống hóa bởi Bertotti (1985). Trong thực tế nghiên cứu vật liệu hấp thụ vi sóng, một tiêu chí chẩn đoán hay dùng là hệ số C_0 [60]:

$$C_0 = \mu''(\mu')^{-2} f^{-1}. \quad (1.5)$$

Nếu C_0 gần như không đổi theo tần số trong một miền nhất định, người ta có thể kết luận rằng tổn hao từ trong miền đó chủ yếu do dòng xoáy. Nếu C_0 biến thiên mạnh, khi đó đỉnh cộng hưởng tạo ra không chỉ do tổn hao dòng xoáy mà còn do cộng hưởng sắt từ, cộng hưởng vách đo men và cộng hưởng trao đổi [61].

Giới hạn Snoek

Trong vật liệu dạng khối, giới hạn Snoek được biểu thị bằng hàm số [62]:

$$(\mu_0' - 1)F_0 = \frac{2}{3} \gamma 4\pi M_s, \quad (1.6)$$

trong đó, F_0 là tần số cộng hưởng sắt từ; γ là tỷ số hồi chuyển và $4\pi M_s$ là độ từ hóa bão hòa. Việc đồng thời đạt μ' rất lớn và tần số cộng hưởng cao là khó khả

thi do ràng buộc giữa từ độ bão hòa, dị hướng từ và bản chất từ tính của vật liệu. Các nghiên cứu và phân tích thực nghiệm đối với ferrite đa tinh thể cho thấy giới hạn Snoek đóng vai trò quan trọng đối với vật liệu từ khi hoạt động ở tần số cao. Để tăng độ từ thẩm lên vùng tần số GHz cao hơn, vật liệu thường phải điều chỉnh đặc trưng cấu trúc, hình thái; do đó, hiện nay nhiều hướng nghiên cứu chuyển sang phát triển cấu trúc dị thể nhằm tăng dị hướng từ và vật liệu tổ hợp nhằm khai thác đồng thời tổn hao từ: cộng hưởng sắt từ, cộng hưởng trao đổi và tổn hao dòng xoáy và tổn hao điện môi để tối ưu phối hợp trở kháng và tổn hao trong dải 1 - 18 GHz [63, 64].

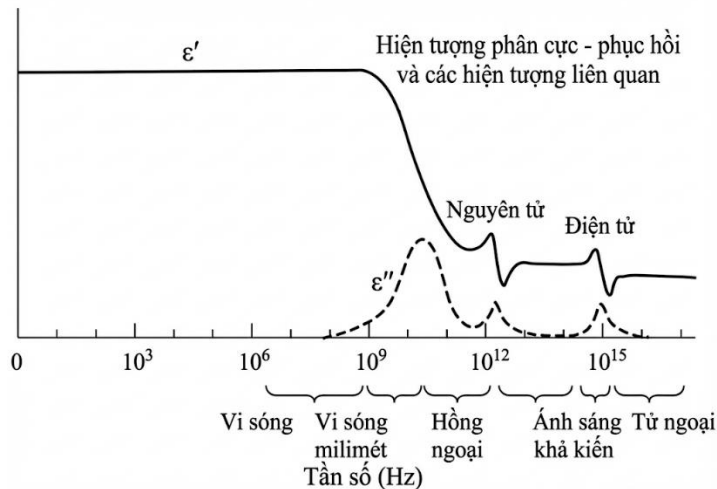
1.1.2 Cơ chế tổn hao điện môi

Đặc tính điện môi của vật liệu thường được mô tả bởi hằng số điện môi phức [51]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega), \quad (1.7)$$

$$\tan \delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}, \quad (1.8)$$

trong đó ε' là phần thực của hằng số điện môi, phản ánh khả năng tích trữ năng lượng điện trường, còn ε'' là phần ảo của hằng số điện môi, biểu thị mức tiêu tán năng lượng. Về bản chất, ε'' trong vật liệu hấp thụ sóng điện từ thường là tổng hợp của tổn hao do dẫn điện và tổn hao do phân cực - phục hồi (polarization relaxation). Đặc tính hấp thụ vi sóng không chỉ phụ thuộc việc tăng ε'' mà còn gắn chặt với cơ chế phân cực ở nhiều thang (nguyên tử - khuyết tật - vi cấu trúc) để tạo tổn hao mạnh nhưng vẫn duy trì phối hợp trở kháng phù hợp [65, 66]. Sự thay đổi của hằng số điện môi phức theo tần số trường điện từ đặt vào được chỉ ra trong Hình 1.2.



Hình 1.1. Phổ hằng số điện môi phụ thuộc tần số [66]

Tổn hao do dẫn điện

Khi vật liệu có độ dẫn điện σ , thành phần dòng dẫn tạo ra công suất Joule, đóng góp vào phần ảo của điện môi theo dạng gần đúng [67]:

$$\varepsilon''_{cond}(\omega) \approx \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}, \quad (1.9)$$

trong đó ε''_{cond} là phần ảo tương đương do dẫn điện, biểu diễn tổn hao nhiệt Joule dưới dạng tổn hao điện môi, quan hệ này cho thấy nếu σ gần như không đổi theo tần số, thì ε''_{cond} có xu hướng giảm theo $1/\omega$ khi tần số tăng lên vùng GHz. Tuy nhiên, trong vật liệu không trật tự, vật liệu tổ hợp nhiều pha hoặc có mạng dẫn cục bộ, $\sigma_{ac}(\omega)$ thường tuân theo quy luật mũ Jonscher, mô tả sự phụ thuộc theo tần số của độ dẫn xoay chiều trong nhiều vật liệu điện môi, bán dẫn (gồm ferrite, perovskite, polymer, vật liệu vô định hình...), đặc biệt khi cơ chế dẫn chi phối bởi dịch chuyển của hạt tải:

$$\sigma_{ac}(\omega) = \sigma_{dc} + A\omega^s \quad (0 < s < 1), \quad (1.10)$$

trong đó $\sigma_{ac}(\omega)$ là độ dẫn tổng ở tần số góc ω ; σ_{dc} là độ dẫn một chiều, không phụ thuộc vào tần số. Từ đó làm cho tổn hao điện môi thể hiện dạng tán sắc theo tần số thay vì suy giảm đơn giản. Cơ sở của đáp ứng điện môi - độ dẫn theo tần số được Jonscher chỉ ra từ rất sớm và đến nay vẫn là khung diễn giải phổ biến khi phân tích σ_{ac} , ε' , ε'' của vật liệu hấp thụ/che chắn sóng điện từ [68].

Trong thiết kế vật liệu hấp thụ, dẫn điện tăng giúp tăng tổn hao (tăng ε''), nhưng nếu σ quá lớn sẽ gây lệch phối hợp trở kháng (trở kháng vật liệu khác xa so với trở kháng của không khí), làm tăng phản xạ tại bề mặt và giảm năng lượng đi vào bên trong. Vì vậy, xu hướng thiết kế là tăng dẫn điện có kiểm soát kết hợp với phân cực liên diện để vừa tăng tổn hao vừa hạn chế phản xạ [69].

Tổn hao do phân cực - phục hồi

Trong trường xoay chiều, các cơ chế phân cực (điện tử, ion, lưỡng cực định hướng, phân cực không gian) không phản ứng tức thời mà tồn tại độ trễ pha, tạo ε'' với một quá trình phục hồi Debye lý tưởng [70]:

$$\varepsilon''(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (1.11)$$

trong đó τ là hệ số phục hồi, ε_∞ là hằng số điện môi tần số cao ($\omega \rightarrow \infty$) và ε_s là hằng số điện môi khi $\omega \rightarrow 0$. ε'' đạt cực đại gần $\omega\tau \approx 1$. Thực tế vật liệu hấp thụ thường có nhiều hệ số phục hồi do nhiều nguyên nhân gây phân cực đồng

thời (khuyết tật, nhóm chức, liên diện, biên hạt...), vì vậy, phổ ε'' thường xuất hiện các đỉnh hoặc dải phức hồi rộng. Các công trình tổng quan gần đây hệ thống hóa rõ các dạng phân cực chủ đạo trong hấp thụ sóng điện từ gồm: phân cực lưỡng cực, phân cực không gian (Maxwell - Wagner - Sillars - MWS) và phân cực khuyết tật [71].

Cơ chế tổn hao điện môi trong vật liệu từ

Trong vùng tần số vi sóng, tổn hao điện môi của ferrite/vật liệu tổ hợp chứa ferrite thường đáng kể do cấu trúc đa tinh thể, khuyết tật và mặt phân cách giữa các pha. Vật liệu ferrite này thường có độ dẫn tốt hơn và biên hạt kém dẫn hơn. Dưới điện trường xoay chiều, điện tích có xu hướng tích tụ tại vùng kém dẫn (biên hạt), tạo phân cực không gian MWS. Do đó, ở vùng tần số thấp - trung bình, ε' và ε'' có thể lớn; khi tăng tần số, điện tích không kịp dịch chuyển - tích tụ, nên xuất hiện tán sắc điện môi (giảm ε' , thay đổi ε''). Điều này phù hợp với mô hình Koops, coi ferrite như cấu trúc hai lớp “hạt dẫn / biên hạt cách điện”, giải thích phổ điện môi phụ thuộc tần số của ferrite [72].

Trong spinel ferrite, cơ chế dẫn - điện môi thường liên hệ với sự dịch chuyển electron giữa các trạng thái hóa trị (điển hình Fe^{2+}/Fe^{3+} ở vị trí bát diện) và/hoặc dịch chuyển của lỗ trống giữa các cation, hình thành cặp lưỡng cực điện và đóng góp vào tổn hao khi điện trường đảo chiều. Các khuyết tật (thiếu Ôxi), biến dạng cấu trúc mạng tinh thể, tạp chất... tạo sự phân cực do khuyết tật gây ra, góp phần mở rộng dải phức hồi và tăng giá trị phần ảo của hằng số điện môi ε'' [73, 74].

Khi ferrite được ghép với carbon (graphene/carbon nano dạng ống) hoặc polymer dẫn, số lượng liên diện tăng mạnh (oxide - carbon, oxide - polymer), làm tăng phân cực MWS; đồng thời mạng dẫn tạo kênh tổn hao truyền dẫn. Tuy nhiên, cần cân bằng để tránh quá dẫn điện khiến phản xạ mạnh, do đó các thiết kế hiệu quả thường hướng đến sự phối hợp đồng thời: liên diện dày đặc (tăng phức hồi phân cực); dẫn điện mức vừa phải (tăng ε'' nhưng vẫn phối hợp trở kháng) và thêm tổn hao từ để tăng suy hao tổng.

1.2 Các hệ vật liệu từ hấp thụ sóng điện từ

Vật liệu hấp thụ sóng điện từ (Electromagnetic wave - EMW) với các đặc tính mỏng, nhẹ, dải tần rộng và hấp thụ mạnh ngày càng nhận được sự chú ý vì khả năng ứng dụng thực tế. Để có thể phát triển vật liệu mới hấp thụ EMW, các thông số khác nhau được sử dụng trong thiết kế vật liệu có vai trò quan

trọng [75, 76]. Những vật liệu này có thể cung cấp các đặc tính hấp thụ mạnh, dải tần số rộng, mật độ thấp và mỏng. Ngày càng có nhiều nhà nghiên cứu kết hợp các vật liệu khác nhau, một vật liệu tổ hợp mới có thể được thiết kế có hiệu suất hấp thụ sóng điện từ tuyệt vời ở dải tần GHz. Việc lựa chọn vật liệu có đặc tính bảo vệ nhiễu sóng điện từ (Electromagnetic Interference - EMI) tốt phụ thuộc vào một số thông số, chẳng hạn như đặc tính điện môi, độ dẫn điện và tính chất từ [77]. Bằng cách kết hợp lớp đệm điện môi và từ tính, khả năng dập tắt dao động điện-từ của sóng tới khi đi vào các vật liệu này có thể được cải thiện để đạt được sự hấp thụ tối đa năng lượng điện từ [78].



Hình 1.2. Các đặc tính mong muốn của vật liệu hấp thụ EMW [79]

Cho đến nay, việc đạt được tất cả các đặc tính mong muốn của vật liệu hấp thụ EMW được thể hiện trong Hình 1.2, đây được coi là một thách thức lớn để nghiên cứu các loại vật liệu trong các ứng dụng hấp thụ vi sóng [79, 80]. Một số nghiên cứu gần đây đã tìm cách khắc phục hạn chế này, hầu hết các nhà nghiên cứu đã khám phá việc thiết kế các chất hấp thụ mới kết hợp với các vật liệu từ tính mạnh như khoáng chất có từ tính và ferrite và các vật liệu điện môi như vật liệu gốc carbon và polyme dẫn điện, dẫn đến hiệu quả hoạt động nâng cao vật liệu hấp thụ EMW.

Các vật liệu hấp thụ điện môi như chất bán dẫn và oxit có ưu điểm là hằng số điện môi thấp, phối hợp trở kháng tốt nhưng khả năng gây tổn hao từ thấp [69, 81]. Hầu hết vật liệu hấp thụ vi sóng được chế tạo từ bột từ tính như ferrite, niken, coban và các vật liệu tổn hao điện môi như ống nano carbon và

polyme dẫn điện [82]. Nhiều nghiên cứu đã kết luận rằng vật liệu carbon là loại vật liệu hấp thụ sóng điện từ và có tính cách điện. Vật liệu carbon tinh khiết có tính chất hấp thụ yếu do sự tổn hao từ tính thấp và hệ số phản xạ cao [83]. Để giảm bớt khuyết điểm này, các nhà nghiên cứu đã sử dụng phương pháp mạ điện, kết tủa hoặc phủ lên bề mặt vật liệu carbon để nạp các hạt từ tính như sắt carbonyl, Fe_3O_4 , Ni và Fe-Co nhằm tăng cường đặc tính hấp thụ của vật liệu [84-86].

Vật liệu tổn hao từ như ferrite (spinel, hexaferrite...), bột sắt carbonyl (CIP), hợp kim Fe/Co/Ni, vật liệu từ dẫn xuất dựa trên khung hữu cơ - kim loại... có ưu thế tạo μ'' đáng kể (cộng hưởng FMR, tổn hao dòng xoáy, tổn hao vách đô-men ở tần số thấp hơn...), qua đó hỗ trợ giảm chiều dày. Tuy nhiên chúng thường gặp hạn chế khối lượng riêng cao, oxy hóa/ổn định nhiệt, và ràng buộc Snoek làm suy giảm từ thẩm ở miền GHz nếu không có thiết kế vi cấu trúc phù hợp. Vì thế, vật liệu lai điện môi - từ được xem là hướng chủ đạo để đạt hiệu năng cao nhờ khả năng cân bằng điện - từ và điều chỉnh trở kháng thông qua thiết kế thành phần đa pha, đa giao diện.

Đối với vật liệu có kích thước nano mét, đặc trưng cấu trúc và hình thái đóng vai trò quan trọng trong các tính chất của vật liệu [87]. Các hạt có hình thái khác nhau có diện tích bề mặt riêng, trường dị hướng, v.v. khác nhau, dẫn đến sự khác biệt về hiệu ứng giao diện, trường khử từ và các thông số khác. Khi kích thước hạt đạt đến thang nanomet, nó gây ra các hiệu ứng lượng tử có thể dẫn đến sự phân tách các mức năng lượng đồng thời sẽ hình thành một mức năng lượng mới, điều này cũng dẫn đến sự thay đổi đặc trưng hấp thụ năng lượng vi sóng của vật liệu; đồng thời, khi vật liệu có kích thước nano mét xuất hiện các khuyết tật trong cấu trúc mạng tinh thể, vật liệu có thể bị thay đổi khả năng phân cực trong trường sóng điện từ, có thể góp phần tăng cường khả năng hấp thụ sóng điện từ [88, 89]. Sự thay đổi các thông số hình thái và kích thước của vật liệu gây ra tác động quan trọng đến các tính chất hấp thụ sóng điện từ của nó. Cho đến nay, một số cấu trúc hình thái các vật liệu hấp thụ sóng điện từ như: cấu trúc lõi - vỏ [90], cấu trúc rỗng [91-93], cấu trúc bột xốp [94, 95], hình quả đậu [96]...

1.2.1 Vật liệu từ mềm hấp thụ sóng điện từ

Vật liệu từ mềm được đặc trưng bởi lực kháng từ H_c nhỏ, dễ từ hóa và khử từ dưới tác dụng của từ trường ngoài yếu, đồng thời có thể duy trì đáp ứng

từ đáng kể trong vùng tần số cao. Đối với hấp thụ sóng điện từ vùng GHz, ưu điểm của vật liệu từ mềm không chỉ nằm ở khả năng tạo tổn hao từ thông qua cộng hưởng sắt từ, cộng hưởng trao đổi, chuyển động vách đômen hoặc tổn hao dòng xoáy, mà còn ở khả năng điều chỉnh độ từ thẩm nhằm cải thiện phối hợp trở kháng. Tuy nhiên, nếu chỉ tăng tổn hao mà không kiểm soát trở kháng, vật liệu có thể phản xạ mạnh tại bề mặt, làm giảm hiệu quả hấp thụ tổng thể. Vì vậy, xu hướng nghiên cứu hiện nay là thiết kế vật liệu từ mềm dưới dạng tổ hợp từ - điện môi, trong đó pha từ đảm nhiệm vai trò tổn hao từ, còn pha điện môi/dẫn điện được sử dụng để điều chỉnh ϵ' , ϵ'' , tăng phân cực giao diện và tối ưu hóa năng lượng điện từ vào bên trong vật liệu [97- 106].

Trong các ferrite spinel, hệ Ni - Zn ($\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$) là một trong những họ vật liệu được các nhà nghiên cứu quan tâm cho mục đích hấp thụ vi sóng nhờ: M_s và μ' tương đối cao; tần số cộng hưởng tự nhiên nằm trong vùng GHz; điện trở suất cao và tính chất của vật liệu thay đổi linh hoạt theo tỷ lệ Ni/Zn và chất pha trộn [97-99]. Vật liệu Ni-Zn là ferrite spinel có cấu trúc AB_2O_4 , trong đó Ni^{2+} , Zn^{2+} và Fe^{3+} phân bố trên các vị trí bát diện (B) và tứ diện (A), trong đó Zn^{2+} ưu tiên chiếm vị trí (A), Ni^{2+} ưu tiên vị trí (B). Tùy vào phương pháp tổng hợp (sol - gel, đồng kết tủa, cơ - hóa (mechanical alloying), phương pháp glycine - nitrate, v.v.) và điều kiện xử lý nhiệt, sự phân bố ion cation trên các nút mạng có thể thay đổi, kéo theo thay đổi M_s , H_c và $\mu(f)$ [100].

Các nghiên cứu trên thế giới gần đây chỉ ra rằng, ferrite từ mềm có thể đạt RL_{\min} từ -20 đến -60 dB với chiều dày lớp phủ từ 1-5 mm trong dải tần 2-18 GHz khi được tối ưu hóa cấu trúc, kích thước hạt và phối hợp với pha điện môi hoặc carbon dẫn [53]. Aherrao và Singh đã tổng hợp và tổng quan các ferrite spinel dạng nano, cho thấy việc giảm kích thước hạt xuống dưới 100 nm và tạo hình thái rỗng, xấp gộp phần làm tăng diện tích bề mặt, tăng số lượng tâm tán sắc, đồng thời điều chỉnh μ' , μ'' theo hướng có lợi cho hấp thụ vi sóng [101]. Các ferrite tổ hợp với polymer hoặc carbon (graphene, CNT) được chứng minh giúp mở rộng dải tần hấp thụ nhờ kết hợp tổn hao từ và tổn hao điện môi [53].

Cũng trong hệ vật liệu từ mềm hấp thụ sóng điện từ vùng GHz, hợp kim FeCo nhờ độ từ hóa bão hòa cao, giới hạn Snoek lớn, giúp duy trì đáp ứng từ tốt ở vùng vi sóng; tuy nhiên FeCo “đơn pha” thường gặp bất lợi: phối hợp trở kháng kém do thiếu cơ chế tổn hao điện môi và độ dẫn cao gây phản xạ mạnh; dễ oxy hóa; mật độ lớn, từ đó làm giảm tiêu chí “mỏng - nhẹ - rộng - hấp thụ

mạnh”. Vì vậy, hướng tiếp cận hiệu quả là lai hóa FeCo với pha carbon (C vô định hình/ graphitized carbon/ graphite/graphene, graphene oxit dạng khử), tạo nên hệ từ - điện môi có thể “điều chỉnh” đồng thời μ_r và ϵ_r , từ đó tối ưu hấp thụ trong dải C - X - Ku (xấp xỉ 4 -18 GHz) [102]. Về hình thái của hệ vật liệu FeCo-C, các cấu trúc thường gặp gồm: hạt lõi - vỏ FeCo@C; FeCo trên cơ sở graphene/rGO; FeCo bọc graphene đơn lớp; FeCo trang trí carbon graphitized dạng vi cầu/khung xốp 3D; và hệ đa pha (ví dụ như ferrite/FeCo-C nanosheets) để mở rộng dải tần và giảm bề dày lớp hấp thụ [103].

Các đóng góp chính dẫn tới khả năng hấp thụ của hệ vật liệu này là do tổn hao dẫn điện, graphene/graphitized carbon tạo mạng dẫn, chuyển năng lượng EMW thành nhiệt (Joule) [104]; hệ đa giao diện FeCo/C, FeCo/graphene, C/khuyết tật... tạo tích tụ điện tích tại biên pha dưới trường xoay chiều, sinh ϵ'' đáng kể: khuyết tật, biên hạt, nhóm chức (đặc biệt rGO) làm tăng khả năng phục hồi, góp phần mở rộng băng hấp thụ [103, 104]. Bên cạnh đó cộng hưởng sắt từ và cộng hưởng trao đổi trong FeCo là nguồn suy hao từ quan trọng trong vùng GHz. FeCo dẫn điện mạnh tạo tổn hao dòng xoáy, vỏ carbon/graphene có thể vừa giúp điều chỉnh trường cục bộ, vừa tạo “phân mảnh dẫn điện” để kiểm soát hiệu ứng này, đồng thời tăng khả năng phối hợp trở kháng [105, 106].

Từ các phân tích trên, hai nhóm vật liệu FeCo-C và MFe_2O_4 được lựa chọn để đạt được hai mục tiêu khác nhau. Hệ FeCo-C được lựa chọn cho mục tiêu mở rộng và tăng cường hấp thụ dải rộng nhờ sự kết hợp giữa tổn hao từ mạnh của FeCo và tổn hao điện môi của pha carbon. Bên cạnh đó, hệ MFe_2O_4 , tiêu biểu là $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ và $MgFe_2O_4$, được lựa chọn cho mục tiêu điều khiển đặc tính hấp thụ bằng từ trường ngoài nhờ tính từ mềm, điện trở suất cao, tổn hao dòng xoáy thấp và độ từ thẩm phụ thuộc vào trạng thái từ hóa.

1.2.2 Vật liệu từ cứng hấp thụ sóng điện từ

Vật liệu từ cứng (permanent magnets) có lực kháng từ lớn (H_c cao), đường trễ rộng, thích hợp cho các ứng dụng nam châm vĩnh cửu. Đối với mục tiêu hấp thụ sóng điện từ, ưu điểm của vật liệu từ cứng là tần số cộng hưởng sắt từ có thể mở rộng lên vùng tần số rất cao (tới hàng chục - hàng trăm GHz) nhờ trường dị hướng lớn [107].

Các hệ hexaferrite M-type như $BaFe_{12}O_{19}$, $SrFe_{12}O_{19}$, La - Sr - M... là đại diện điển hình của vật liệu từ cứng trên nền oxide; chúng có M_s tương đối cao, H_c lớn và độ ổn định hóa học, nhiệt cao, phù hợp cho môi trường khắc

nghiệt (nhiệt độ, bức xạ, ăn mòn) [97]. Namai và cộng sự đã tổng hợp ϵ - $\text{Rh}_x\text{Fe}_2-x\text{O}_3$ - một ferrite từ cứng có H_c tới 31 kOe, biểu hiện hấp thụ sóng tần số millimet (lên tới ~ 209 GHz), mở ra hướng ứng dụng mới cho các hệ vật liệu từ cứng trong vùng tần số cao [107].

Ở dải tần 8 - 18 GHz, các nghiên cứu về $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ cho thấy khi điều chỉnh kích thước hạt, hình thái (dạng tấm, dạng vảy) và tỉ lệ trong vật liệu tổ hợp với polymer hoặc ferrite từ mềm, vật liệu có thể đạt RL_{\min} dưới - 30 dB với băng thông 3 - 5 GHz trong khi chiều dày lớp hấp thụ khoảng 1,5 - 3 mm [108]. Tuy nhiên, việc sử dụng vật liệu từ cứng thuần thường gặp hạn chế về phối hợp trở kháng (μ' lớn nhưng ϵ' không tương xứng), cũng như khối lượng riêng tương đối cao. Do đó, xu hướng hiện nay là phát triển vật liệu tổ hợp “từ cứng - từ mềm” kết hợp pha hexaferrite với ferrite từ mềm (Ni - Zn, Co - Zn...) để tận dụng đồng thời ưu điểm của cả hai pha: pha cứng với trường dị hướng lớn, tổn hao từ mạnh và pha mềm để điều chỉnh [98, 109].

1.2.3 Vật liệu từ cứng - từ mềm

Vật liệu từ cứng - từ mềm là hệ vật liệu đa pha, gồm pha từ cứng (có dị hướng từ tinh thể lớn, lực kháng từ H_c cao) kết hợp với pha từ mềm (có độ từ hóa bão hòa M_s cao nhưng H_c nhỏ), trong đó các pha được tổ chức ở thang nano nhằm hình thành tương tác trao đổi tại biên pha [110]. Trong vật liệu tổ hợp từ cứng - từ mềm, mô men từ của pha mềm có xu hướng quay trước dưới tác dụng của trường ngoài, nhưng do tương tác trao đổi làm pha mềm bị ràng buộc quay dần theo pha cứng. Các hệ $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{CoFe}_2\text{O}_4$, $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Fe}_3\text{O}_4$... đã được nghiên cứu rộng rãi, cho thấy tương tác trao đổi giữa hai pha có thể mở rộng phổ cộng hưởng, dẫn tới dải tần hấp thụ rộng hơn và RL_{\min} đạt giá trị nhỏ hơn [111, 112].

Tuy nhiên, hạn chế đối với hệ vật liệu này là khó tạo phối hợp trở kháng, độ dẫn điện cao dẫn đến phản xạ mạnh, tổn hao dòng xoáy lớn, dẫn tới độ dày lớn và dải tần hẹp [113].

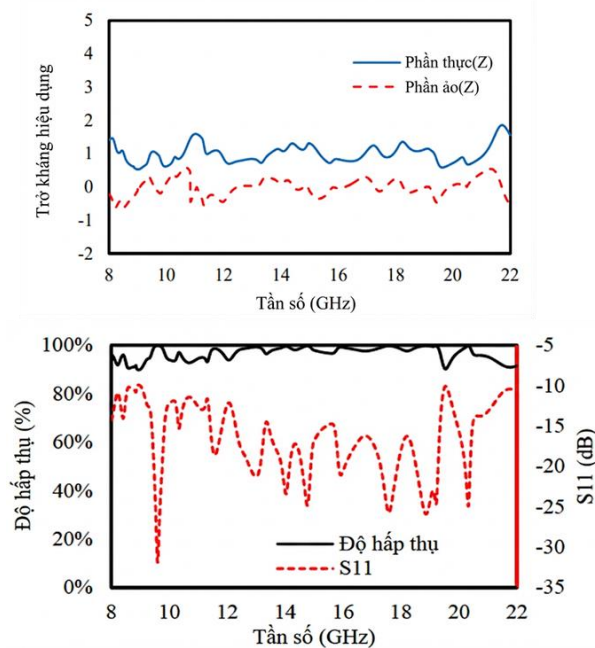
1.3. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ

1.3.1 Hiện tượng phối hợp trở kháng

Về bản chất vật lý, khả năng hấp thụ của MA được hình thành từ sự tương tác giữa hiện tượng cộng hưởng điện từ cường độ cao và điều kiện tối ưu hóa trở kháng trong các cấu trúc nhân tạo. Thông qua việc bố trí tuần hoàn các phần

tử kim loại, trở kháng đầu vào của vật liệu được điều chỉnh tiệm cận với trở kháng của không khí, dẫn đến việc triệt tiêu gần như hoàn toàn sóng phản xạ.

Để tạo điều kiện xuất hiện các cộng hưởng điện và cộng hưởng từ, MA thường được thiết kế dưới dạng cấu trúc ba lớp kiểu “sandwich”. Cụ thể, một lớp điện môi được chèn ở giữa hai lớp kim loại và đóng vai trò lớp đệm. Lớp kim loại phía trên được tạo bởi các phần tử cộng hưởng bố trí tuần hoàn. Ở phía dưới, lớp kim loại có thể là một tấm kim loại liên tục để ưu tiên hấp thụ theo một hướng, hoặc được tạo hình theo mô-típ tuần hoàn tương tự lớp trên để thực hiện cơ chế hấp thụ theo hai hướng.



Hình 1.3. Phối hợp trở kháng và phổ hấp thụ của vật liệu biến hóa [114]

Trong MA, đại lượng hấp thụ thường được biểu diễn theo bảo toàn năng lượng [115]:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega), \quad (1.12)$$

trong mô phỏng được tính toán bằng các tham số tán xạ: $R(\omega) = |S_{11}(\omega)|^2$ và $T(\omega) = |S_{21}(\omega)|^2$, với cấu trúc có tấm kim loại nền đủ dày, truyền qua gần như triệt tiêu $T(\omega) \approx 0$, do đó $A(\omega) = |S_{21}(\omega)|^2$. Nói cách khác, để có độ hấp thụ tuyệt đối, tức độ hấp thụ gần 100% thì phản xạ cần triệt tiêu hoàn toàn, có nghĩa là xảy ra phối hợp trở kháng trên bề mặt vật liệu MA. Trong dải tần số GHz, khi một sóng phẳng tới vuông góc bề mặt vật liệu/cấu trúc hấp thụ, mức phản xạ tại

biên được quyết định bởi độ lệch trở kháng giữa môi trường tới (thường là không khí).

Để mở rộng dải tần hấp thụ mà vẫn đảm bảo Z_{in} tiệm cận với Z_0 , các hướng thiết kế hay gặp gồm: dùng nhiều phần tử kích thước khác nhau hoặc cấu trúc lai để tạo nhiều đỉnh hấp thụ (đa tần) rồi làm chùng chập các đỉnh từ đó hình thành dải rộng; Tạo chuyển tiếp trở kháng từ không khí vào trong vật liệu (giảm phản xạ kiểu biến áp trở kháng). Hình 1.3 biểu thị phổ phối hợp trở kháng và độ hấp thụ tương ứng của cấu trúc MA trong vùng tần số GHz.

Trong môi trường đồng nhất, tuyến tính, đẳng hướng, sóng điện từ lan truyền được đặc trưng bởi trở kháng ($Z(\omega)$) [116]:

$$Z(\omega) = \sqrt{\frac{\mu(\omega)}{\varepsilon(\omega)}}, \quad (1.13)$$

trong đó $\mu(\omega)$ và $\varepsilon(\omega)$ là độ từ thẩm và hằng số điện môi (có thể là đại lượng phức đối với vật liệu có tổn hao). Đối với không khí/ không gian tự do, trở kháng Z_0 xấp xỉ $\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ bằng 377 Ω . Vì vậy, phối hợp trở kháng là làm cho $Z_{in} \sim Z_0$, hay phần thực xấp xỉ Z_0 và phần ảo xấp xỉ 0.

Một cách mô hình hóa trực quan MA là coi hệ như một đoạn đường truyền (lớp điện môi) bị kết thúc bởi lớp kim loại nền, đồng thời được tải bởi một trở kháng bề mặt do bề mặt vật liệu biến hóa tạo ra. Bề mặt vật liệu biến hóa có thể được mô hình bằng mạch tương đương dạng RLC: phần tử kim loại tạo ra cảm kháng (L), khe hở tạo ra dung kháng (C), còn tổn hao ohmic của kim loại và tổn hao điện môi được quy cho điện trở tương đương (R). Khi đó, quanh tần số cộng hưởng $\omega_0 \approx 1/\sqrt{LC}$, trở kháng bề mặt có dạng [117]:

$$Z_{surface}(\omega) \approx R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}), \quad (1.14)$$

trong đó $Z_{surface}$ là trở kháng bề mặt cấu trúc từ phía sóng tới.

Với cấu trúc MA có tấm phản xạ kim loại và lớp điện môi có độ dày d có trở kháng:

$$Z_d(\omega) = -jZ_0 \cot(\beta d), \quad (1.15)$$

trong đó: $Z_m = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$, $\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$. Khi đó, trở kháng vào từ không khí:

$$Z_{in}(\omega) = \frac{Z_{surface}(\omega)Z_d(\omega)}{Z_{surface}(\omega) + Z_d(\omega)}. \quad (1.16)$$

Cơ chế hấp thụ cực đại thường được thực hiện bằng cách lựa chọn hình học và vật liệu để thành phần ảo của Z của $Z_{in}(\omega)$ được khử gần về 0 và phần thực tiến về Z_0 . Khi năng lượng đã đi vào cấu trúc, tổn hao đủ lớn sẽ đảm bảo năng lượng bị tiêu tán bên trong vật liệu dưới dạng tổn hao điện môi và ohmic [118].

Tổn hao Ohmic phát sinh trong các thành phần kim loại do dòng điện cảm ứng gây ra, có thể liên hệ với phần năng lượng bị tiêu tán trên “điện trở tương đương” của mạch cộng hưởng cộng hưởng LC. Ở dải tần từ vài THz trở xuống, kim loại thường được coi như chất dẫn gần lý tưởng, vì vậy phần lớn năng lượng tổn hao được ghi nhận chủ yếu trong lớp điện môi. Ngược lại, với các MA làm việc ở tần số cao, tổn hao điện môi và tổn hao dẫn trong kim loại (biểu hiện dưới dạng nhiệt Joule) trở thành hai cơ chế tiêu tán năng lượng chi phối.

Để chứng minh định lượng “phối hợp trở kháng”, thay vì chỉ mô tả định tính theo S_{11} , nhiều nghiên cứu truy hồi trực tiếp trở kháng chuẩn hóa $Z(\omega) = Z_{in}(\omega)/Z_0$ từ S_{11} , S_{21} . Công thức truy hồi được Smith và cộng sự phát triển, trong đó $Z(\omega)$ được xác định từ các tham số phản xạ và truyền qua của mẫu hữu hạn [119].

$$Z(\omega) = \sqrt{\frac{(1 + S_{11}^2(\omega) - S_{21}^2(\omega))}{(1 - S_{11}^2(\omega) - S_{21}^2(\omega))}}. \quad (1.17)$$

Khi cấu trúc có tấm nền kim loại liên tục, S_{21} rất nhỏ, phối hợp trở kháng khi phần thực $Z(\omega)$ xấp xỉ 1 và phần ảo gần bằng 0.

Từ các phân tích trên có thể khẳng định: đối với cấu trúc hấp thụ MA có tấm nền kim loại liên tục, điều kiện hấp thụ cao trong dải GHz về bản chất là điều kiện giảm phản xạ tại mặt vào thông qua phối hợp trở kháng, tức $Z_{in}(\omega) \rightarrow Z_0$. Lớp kim loại tuân hoàn cộng hưởng đóng vai trò điều chỉnh đáp ứng điện - từ (hoặc trở kháng bề mặt hiệu dụng) nhằm đưa phần thực của trở kháng vật liệu tiệm cận 377Ω và phần ảo tiệm cận 0, trong khi các cơ chế tổn hao (điện môi/từ/ohmic) đảm bảo năng lượng trường bị tiêu tán thay vì tái bức xạ. Việc truy hồi $Z(\omega)$ từ S_{11} , S_{21} là công cụ định lượng quan trọng để chứng minh phối hợp trở kháng và giải thích đỉnh/băng hấp thụ của cấu trúc.

1.3.2 Hiện tượng giao thoa triệt tiêu

Cấu trúc MA có độ hấp thụ cao thường được mô tả theo hai cách: phối hợp trở kháng và giao thoa triệt tiêu phản xạ. Lý thuyết giao thoa nhấn mạnh

rằng, phản xạ tổng tại mặt vào cấu trúc không chỉ là phản xạ một lần mà là tổng chồng chập của nhiều thành phần phản xạ phát sinh do đa phản xạ trong không gian giữa bề mặt cấu trúc cộng hưởng và lớp kim loại phản xạ phía dưới. Xét sóng điện từ tới vuông góc từ không khí vào bề mặt vật liệu biến hóa (mặt phân cách không khí - điện môi). Bề mặt vật liệu biến hóa đóng vai trò như một “mặt phản xạ một phần”, đặc trưng bởi các hệ số tán xạ phức: hệ số phản xạ $r_{12}(\omega)$ và truyền qua $t_{12}(\omega)$ theo chiều từ không khí vào điện môi; tương tự, khi sóng quay trở lại từ phía điện môi ra không khí, bề mặt vật liệu biến hóa có hệ số $r_{21}(\omega)$ và $t_{21}(\omega)$. Trong khi đó, tấm kim loại liên tục có thể xem là phản xạ gần như toàn phần với độ phản xạ gần bằng -1, tức biên độ xấp xỉ 1 và pha đảo 180° (trong trường hợp lý tưởng). Mô hình phản xạ và giao thoa trong cấu trúc MA được biểu thị trong Hình 1.4.

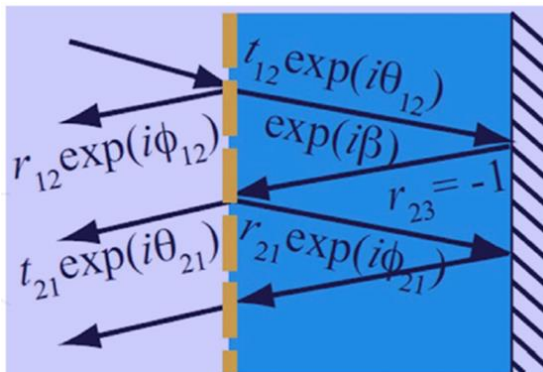
Xét MA có cấu trúc gồm: cấu trúc tuần hoàn phía trên có hệ số phản xạ, lớp điện môi có độ dày d và tấm phản xạ phía dưới cùng, khi đó, hằng số truyền lan phức được biểu thị: $\gamma = \alpha + j\beta$, trong đó β là hằng số pha và α mô tả tổn hao trong điện môi. Như vậy, hệ số lan truyền một chiều trong lớp điện môi là $e^{-\gamma d}$, và tái phản xạ quay lên được biểu thị [118]:

$$e^{-2\gamma d} = e^{-2\alpha d} e^{-j2\beta d}, \quad (1.18)$$

trong đó, hệ số $e^{-j2\beta d}$ quyết định pha giao thoa, còn $e^{-2\alpha d}$ quyết định suy giảm biên độ của phản xạ bậc cao.

Phản xạ đo được tại mặt vào là tổng của: phản xạ trực tiếp tại bề mặt vật liệu biến hóa và các phản xạ thứ cấp (do hiện tượng phản xạ nhiều lần bên trong vật liệu rồi thoát ra ngoài qua bề mặt vật liệu). Tổng chồng chập này có thể được biểu thị như sau:

$$\tilde{r}(\omega) = \tilde{r}_{12}(\omega) - \frac{\tilde{t}_{12}(\omega)\tilde{t}_{21}(\omega)e^{2i\tilde{\beta}}}{1 + \tilde{r}_{21}(\omega)e^{2i\tilde{\beta}}}. \quad (1.19)$$



Hình 1.4. Phản xạ và giao thoa trong cấu trúc hấp thụ MA [118]

Có thể nói rằng, giao thoa triệt tiêu chỉ đảm bảo phản xạ ngoài nhỏ, nhưng để hấp thụ thực sự cao thì năng lượng đã đi vào lớp vật liệu phải được tiêu tán bởi các cơ chế tổn hao (tổn hao ohmic trên kim loại, tổn hao điện môi hoặc tổn hao từ). Tổn hao được phản ánh bởi α thông qua $e^{-2\alpha d}$: khi tổn hao đủ lớn, các phản xạ thứ cấp bị suy giảm nhanh, làm quá trình triệt tiêu ổn định hơn và năng lượng chuyển hoá thành nhiệt thay vì quay lại thoát ra ngoài.

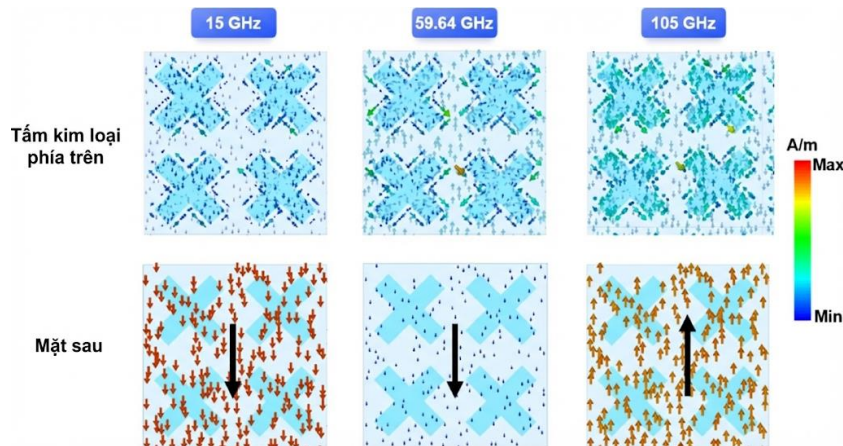
1.3.3 Cơ chế cộng hưởng trong cấu trúc vật liệu biến hóa

Cộng hưởng điện - từ trong cấu trúc MA

Cộng hưởng điện xuất hiện khi thành phần điện trường E của sóng tới kích thích mạnh các phần tử cộng hưởng của cấu trúc MA. Khi đó, điện tích bề mặt tích lũy mạnh ở các khe hở và tạo điện dung tương đương C, đồng thời dòng điện cảm ứng chạy dọc đường dẫn tạo điện cảm tương đương L dẫn đến hình thành cộng hưởng kiểu mạch LC, với tần số xấp xỉ [120]:

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (1.20)$$

Cơ chế này tạo ra đáp ứng kiểu Lorentz/Drude-Lorentz cho $\epsilon_{\text{eff}}(\omega)$; Cộng hưởng điện giúp tạo tổn hao Joule (chuyển thành nhiệt năng), đồng thời khiến cho điều kiện phối hợp trở kháng được thỏa mãn, từ đó dẫn đến hấp thụ sóng điện từ trong cấu trúc [121, 122]. Ví dụ về cộng hưởng điện và từ biểu thị phân bố dòng điện trên bề mặt cấu trúc cộng hưởng bằng kim loại hấp thụ đa dải tần và mặt sau của tấm phản xạ được trình bày trong Hình 1.5 [123]. Tại tần số 15 GHz và 105 GHz, dòng điện song song và cùng hướng, cộng hưởng điện gây ra đỉnh hấp thụ và tại 59,64 GHz, dòng điện song song ngược hướng, cộng hưởng từ gây ra đỉnh hấp thụ.

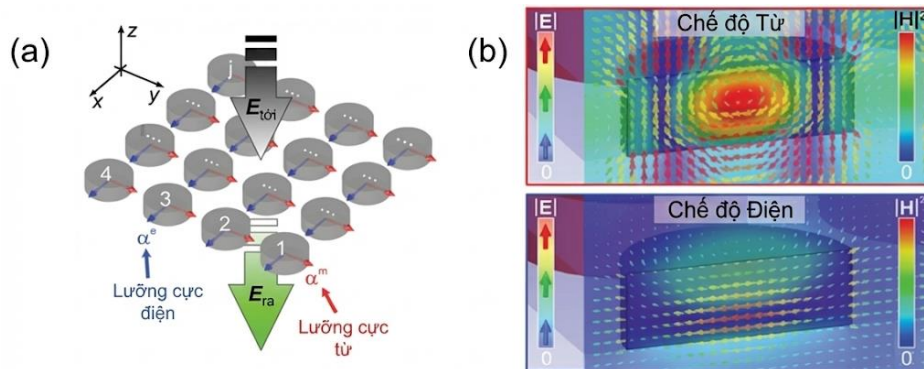


Hình 1.5. Phân bố dòng điện trên bề mặt cấu trúc và mặt sau tấm phản xạ tại các tần số khác nhau của đỉnh cộng hưởng [123]

Cộng hưởng từ xảy ra khi thành phần từ trường H kích thích phân tử cộng hưởng trong cấu trúc. Cộng hưởng từ thường hình thành do dòng bề mặt ngược chiều giữa lớp cộng hưởng phía trên và tấm phản xạ phía dưới, tạo momen từ và đáp ứng cộng hưởng từ góp phần hình thành đỉnh hấp thụ [124]. Cộng hưởng từ điều chỉnh trở kháng của cấu trúc để đưa Z_r về gần 1 (gần với trở kháng của không khí), nhờ đó năng lượng đi vào cấu trúc nhiều hơn trước khi bị phản xạ [121].

Cộng hưởng điện môi trong MA

Khác với MA dựa trên kim loại, MA điện môi khai thác dòng dịch chuyển trong các phân tử cộng hưởng điện môi có chiết suất cao (Si, TiO_2 , gốm điện môi, ferroelectric/ceramic...). Khi kích thước phân tử tương đương thỏa điều kiện cùng bậc với bước sóng trong vật liệu, các mode Mie xuất hiện, trong đó hai mode thấp nhất thường là lưỡng cực điện (Electric Dipole - ED) và lưỡng cực từ (Magnetic Dipole - MD). MD được tạo bởi dòng dịch chuyển tuần hoàn, còn ED gắn với phân bố điện tích dịch chuyển theo hướng kích thích. Trong một số dải tần, MA điện môi tạo ra đồng thời độ điện thẩm có giá trị âm và độ từ thẩm có giá trị âm, từ đó hình thành các đỉnh hấp thụ [125]. Ví dụ về cộng hưởng điện môi tạo cộng hưởng điện và từ của cấu trúc hình trụ dẹt được trình bày trong Hình 1.6.

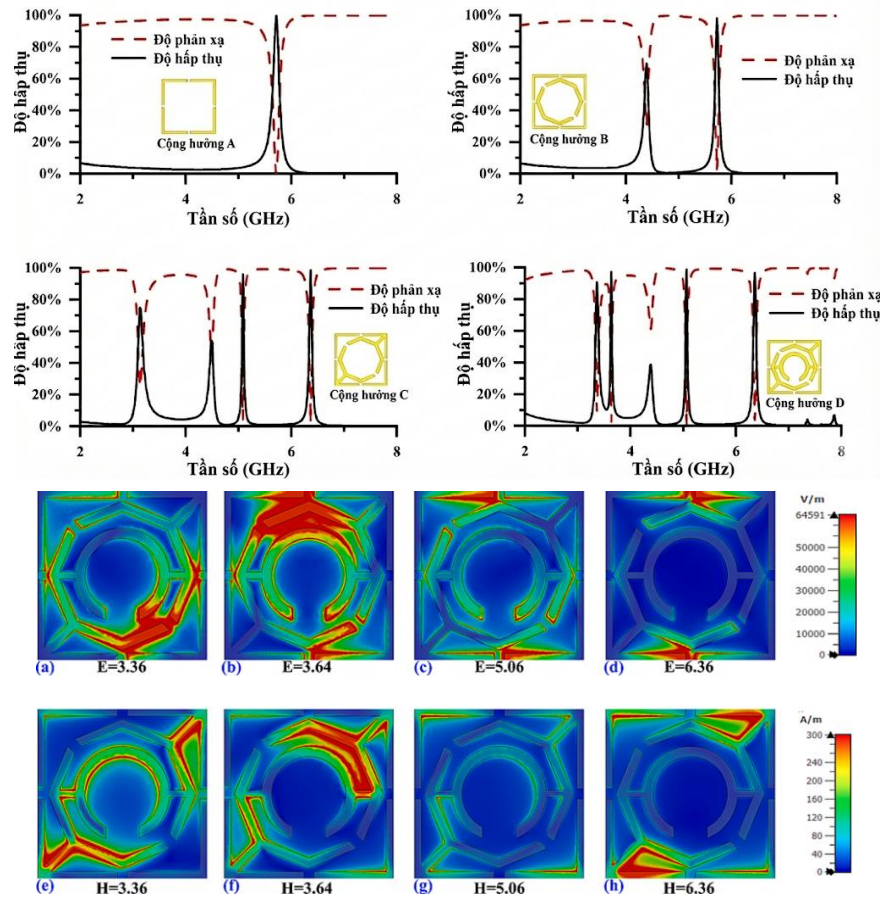


Hình 1.6. Cộng hưởng điện môi trong cấu trúc MA [125].

Cộng hưởng bậc cao trong MA

Trong mạch tương đương, hiện tượng cộng hưởng được thiết lập bởi điện cảm và điện dung, cho phép năng lượng tới được lưu trữ và sau đó tiêu tán thông qua tổn hao điện trở và điện môi ở tần số cộng hưởng. Bằng cách sử dụng các cấu trúc đa dạng, một số nghiên cứu đã quan sát thấy hiện tượng hấp thụ đa dải tần dựa trên cộng hưởng bậc cao [126]. Hình 1.7 trình bày phổ hấp thụ cấu

trúc cộng hưởng bậc cao và phân bố điện trường và từ trường tương ứng tại các đỉnh cộng hưởng.



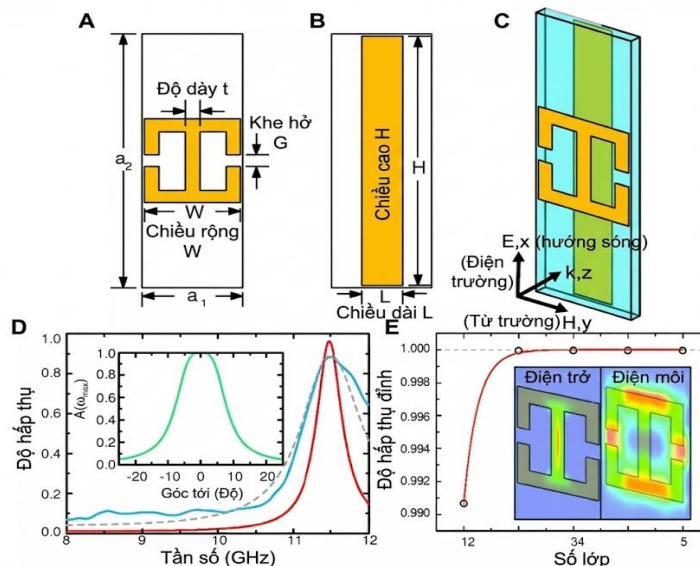
Hình 1.7. Phổ hấp thụ của cấu trúc MA cộng hưởng bậc cao và phân bố điện trường E và từ trường H trên cấu trúc tại các đỉnh hấp thụ [126]

1.3.4 Các cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ

Vật liệu hấp thụ EM là nhóm vật liệu được lựa chọn hoặc thiết kế có chủ đích nhằm làm suy giảm năng lượng của sóng điện từ khi tương tác với bề mặt, thông qua việc giảm phản xạ ở mặt vào và hạn chế truyền qua ra phía sau, để năng lượng tới được chuyển hóa thành nhiệt (hoặc các dạng năng lượng khác) trong vật liệu/cấu trúc. Khi đề cập đến vật liệu hấp thụ EMW, khái niệm này thường gắn liền với các ứng dụng giảm khả năng bị phát hiện, đặc biệt trong các hệ thống quân sự. Từ những ý tưởng ban đầu xuất hiện vào những năm 50 của thế kỷ XX, công nghệ tàng hình đã phát triển nhanh và được triển khai trên nhiều trang thiết bị quân sự hiện đại như máy bay tàng hình, tiêm kích, oanh tạc cơ và tàu chiến, từ đó tạo ra yêu cầu ngày càng cao cho hệ radar trong việc phát hiện và nhận dạng mục tiêu.

Tuy nhiên, không chỉ trong lĩnh vực quân sự - quốc phòng mà cả trong dân dụng (che chắn nhiễu sóng điện từ, tương thích điện từ, bảo vệ thiết bị),

một vật liệu hấp thụ “tốt” thường được kỳ vọng đạt độ hấp thụ cao đồng thời duy trì dải tần rộng. Đây là một đòi hỏi khó đối với vật liệu tự nhiên, bởi các cơ chế suy hao thường gắn với tính chọn lọc theo tần số và điều kiện phối hợp trở kháng. Đối với các cấu trúc hấp thụ truyền thống kiểu lớp điện trở đặt trước tấm kim loại, thiết kế kinh điển thường đòi hỏi chiều dày lớp hấp thụ xấp xỉ một phần tư bước sóng để tạo điều kiện triệt phản xạ. Khi làm việc ở các dải có bước sóng dài (điển hình là vi sóng), yêu cầu “ $\frac{1}{4}$ bước sóng” kéo theo lớp hấp thụ dày và nặng, không phù hợp với xu thế mỏng - nhẹ - thu nhỏ của các hệ thống hiện đại. Trước những giới hạn đó, các cấu trúc hấp thụ dựa trên MA đã trở thành một hướng tiếp cận quan trọng. Ở giai đoạn đầu, nhiều nghiên cứu tập trung vào mục tiêu điều chỉnh được tần số hấp thụ, mở rộng dải tần và hình thành đa dải thông qua thiết kế phần tử cộng hưởng và cấu hình [127-130]. Trong đó, các MA đa băng thường được hiện thực bằng cách sử dụng nhiều phần tử cộng hưởng (hoặc nhiều ô cộng hưởng khác nhau) và tổ hợp theo dạng đồng phẳng để tạo ra nhiều cộng hưởng đặc trưng, sau đó tổng hợp thành phổ hấp thụ có nhiều cực đại [131-134]. Tùy theo khả năng hấp thụ, MA có thể được chia thành ba nhóm chính: đơn đỉnh, đa đỉnh và hấp thụ dải rộng.

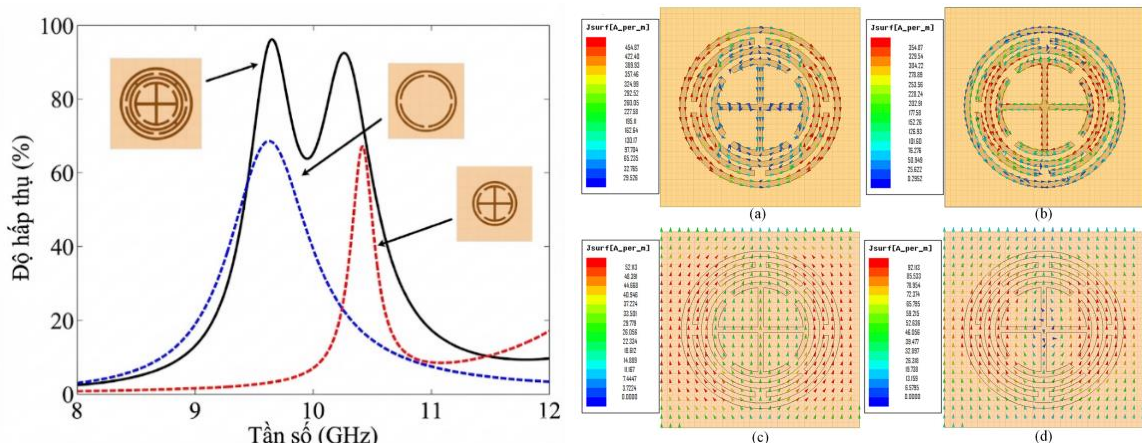


Hình 1.8. Sơ đồ cấu trúc MA và phổ hấp thụ, tổn hao năng lượng tại đỉnh cộng hưởng [19]

MA được nhắc đến rộng rãi bắt nguồn từ công trình đề xuất của Landy và cộng sự (2008) [19] (Hình 1.8) trong đó cấu trúc được thiết kế dựa trên cấu trúc cộng hưởng kim loại trên nền điện môi và tấm kim loại phản xạ phía dưới để triệt tiêu truyền qua và tối ưu phản xạ tại mặt vào. Từ nền tảng đó, bằng cách thay đổi kích thước hình học của phần tử cộng hưởng và hình dạng/đối xứng

của lớp kim loại trên, có thể chủ động điều khiển vị trí và số lượng dải hấp thụ xuất hiện trong phổ. Song song với các thiết kế đa băng, các nghiên cứu cũng chuyển mạnh sang MA dải tần rộng, vì đây là yêu cầu then chốt trong nhiều ứng dụng thực tế. Để mở rộng dải tần số hấp thụ, hai hướng thiết kế thường được sử dụng. Thứ nhất là hướng tổ hợp đồng phẳng: nhiều mẫu kim loại/phần tử cộng hưởng được bố trí trong cùng một mặt phẳng, tạo ra các cộng hưởng gần nhau và có thể chồng lấn, từ đó hình thành dải hấp thụ rộng với mức hấp thụ cao. Thứ hai là hướng xếp chồng theo chiều dọc: nhiều lớp cộng hưởng được xếp theo phương pháp tuyến, tạo ra nhiều điều kiện cộng hưởng và cơ chế ghép nối khác nhau dọc theo bề dày, nhờ đó mở rộng dải hấp thụ hiệu quả. Hai ý tưởng này (đồng phẳng và xếp chồng) là nền tảng của nhiều thiết kế MA dải rộng được công bố trong các nghiên cứu kể trên, đồng thời cũng là cơ sở để luận án lựa chọn và phát triển cấu trúc phù hợp với mục tiêu hấp thụ và điều khiển phổ ở dải GHz.

Trong những nghiên cứu tiếp theo, Ghosh và cộng sự [133] đề xuất MA từ các vòng liên kết (Hình 1.9). Đặc tính hấp thụ của cấu trúc được đưa ra bởi mô hình mạch RLC tương đương của nó, theo đó độ hấp thụ tối đa là do sự phối hợp trở kháng gây ra. Sự hấp thụ băng hẹp kép được hình thành do có nhiều bộ vòng. Xét toàn bộ cấu trúc, mức hấp thụ cực đại 96% và 92,50% lần lượt xảy ra ở 9,66 và 10,26 GHz.

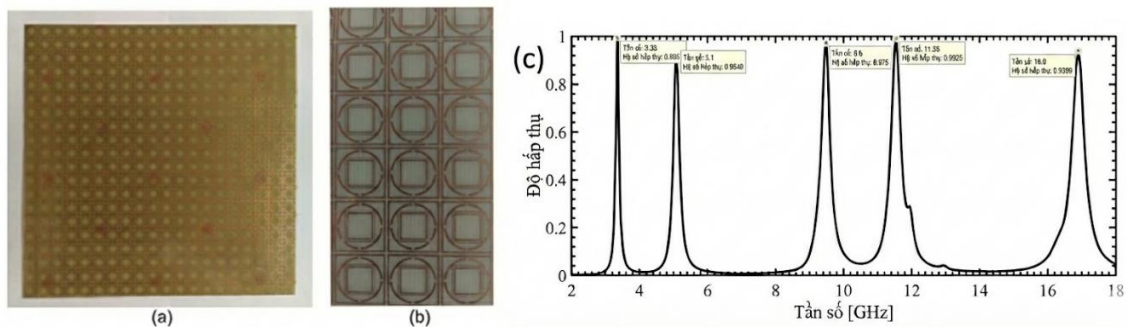


Hình 1.9. Cấu trúc cộng hưởng từ các vòng liên kết và phân bố dòng điện bề mặt tại các đỉnh cộng hưởng [133].

Phân tích phân bố dòng điện bề mặt ở tần số hấp thụ 9,66 và 10,26 GHz của cấu trúc cho thấy các dòng điện được phân bố trong tập hợp bên ngoài của phần tử vòng tròn ở tần số 9,66 GHz, trong khi ở tần số cao hơn 10,26 GHz, các dòng điện rõ rệt hơn ở tập hợp bên trong. Các dòng điện bề mặt song song

ngược ở trên và dưới này tạo thành một vòng tuần hoàn xung quanh từ trường tới và gây ra cộng hưởng từ, trong khi trường điện tới được liên kết với lớp kim loại tuần hoàn trên cùng. Ở tần số cộng hưởng, cả cộng hưởng điện và từ đều đóng góp cho hấp thụ.

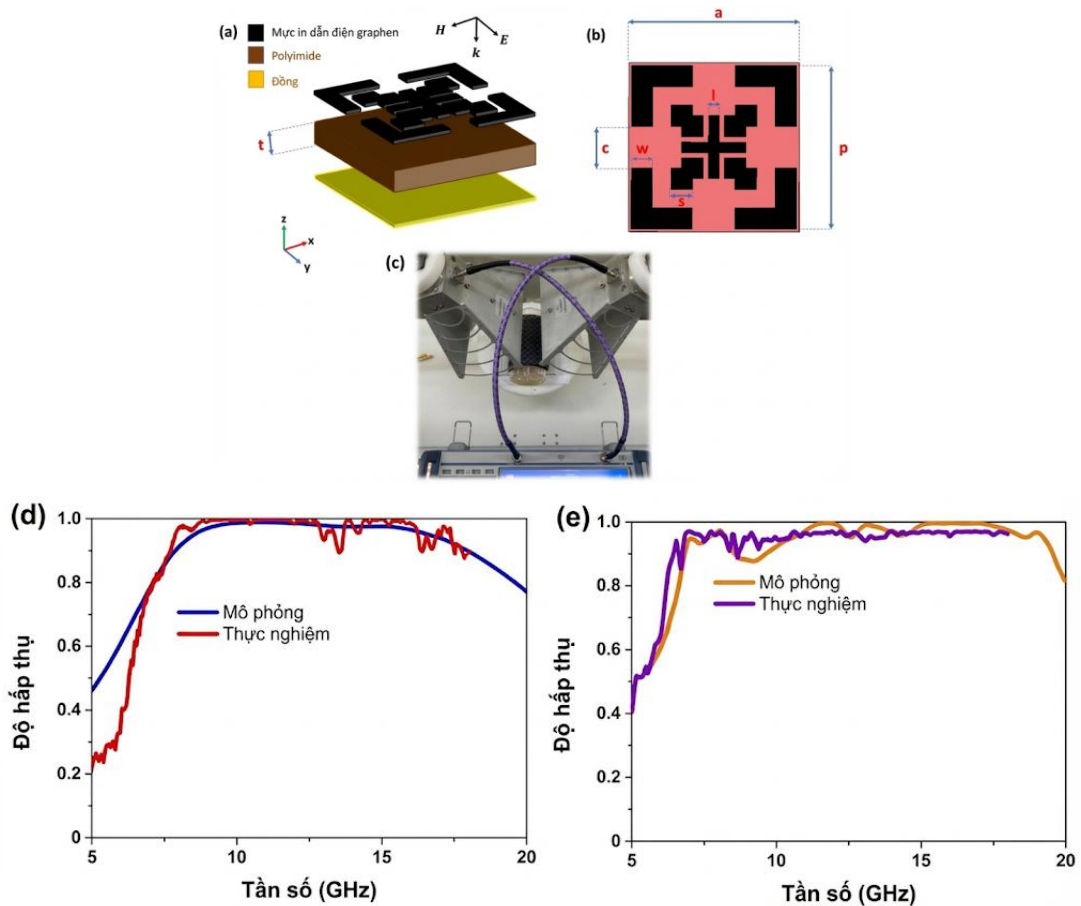
Một ví dụ điển hình cho cấu trúc MA hấp thụ đa đỉnh có thể nói đến nghiên cứu của Garg và cộng sự [119] đã đề xuất cấu trúc có năm đỉnh cộng hưởng với khả năng hấp thụ hơn 90% trong phạm vi từ dải tần S đến dải tần Ku để giảm tiết diện radar và các ứng dụng trên không khác. Cấu trúc được thiết kế trên nền FR-4 giá rẻ có độ dày 1 mm tương đương với $\lambda/17,75$ cho thấy bản chất siêu mỏng của nó. Tính đối xứng gấp bốn lần của thiết kế dẫn đến độ không nhạy phân cực và cung cấp độ ổn định góc lên tới 60° . Các đặc tính đa dải tần thu được bằng cách kết hợp ba cấu trúc cộng hưởng có hình dạng hình học khác nhau trong một cấu trúc duy nhất (Hình 1.10). Hiệu suất của MA được nghiên cứu về độ hấp thụ, các thông số vật liệu, phối hợp trở kháng, độ không nhạy phân cực và góc tới xiên.



Hình 1.10. (a-b) Sơ đồ cấu trúc vật liệu biến hóa và (c) phổ hấp thụ đa đỉnh [129].

Các hướng nghiên cứu nhằm cải thiện đặc tính hấp thụ đồng thời mở rộng dải tần làm việc của MA đã được triển khai khá đa dạng, từ tối ưu hình học phân tử đến lựa chọn vật liệu nền và vật liệu dẫn điện môi. Chẳng hạn, Lê Văn Long và cộng sự [135] đã phát triển một FBMA ba lớp từ mực in dẫn điện graphene (dùng thay thế cho cấu trúc kim loại cộng hưởng thông thường), lớp điện môi và tấm kim loại phản xạ. Kết quả nghiên cứu tạo ra cấu trúc có phổ hấp thụ dải tần rộng, với dải tần số từ 7,88 đến 18,01 GHz có độ hấp thụ trên 90%; tương ứng băng thông tuyệt đối 10,13 GHz và băng thông tương đối FBW đạt 78,25%. Kết quả tương đồng và nhất quán giữa mô phỏng và thực nghiệm, chứng tỏ mô hình thiết kế và tham số vật liệu sử dụng có độ tin cậy cao. Ngoài trạng thái phẳng, công bố còn khảo sát khả năng duy trì hấp thụ khi mẫu bị uốn

cong, phản ánh tính ứng dụng trong các bề mặt cong (lớp phủ linh hoạt). Với bán kính uốn 40 mm, phổ hấp thụ mô phỏng vẫn duy trì mức trên 90% trong khoảng 6,70 - 19,80 GHz, tương ứng với FBW là 98,88%. Kết quả thực nghiệm trong điều kiện uốn cong cũng cho xu hướng phù hợp và khá tương đồng với kết quả mô phỏng, cấu trúc vẫn giữ được hiệu quả ghép năng lượng và cơ chế tổn hao trên dải rộng ngay cả khi chịu biến dạng hình học [Hình 1.11(b)].



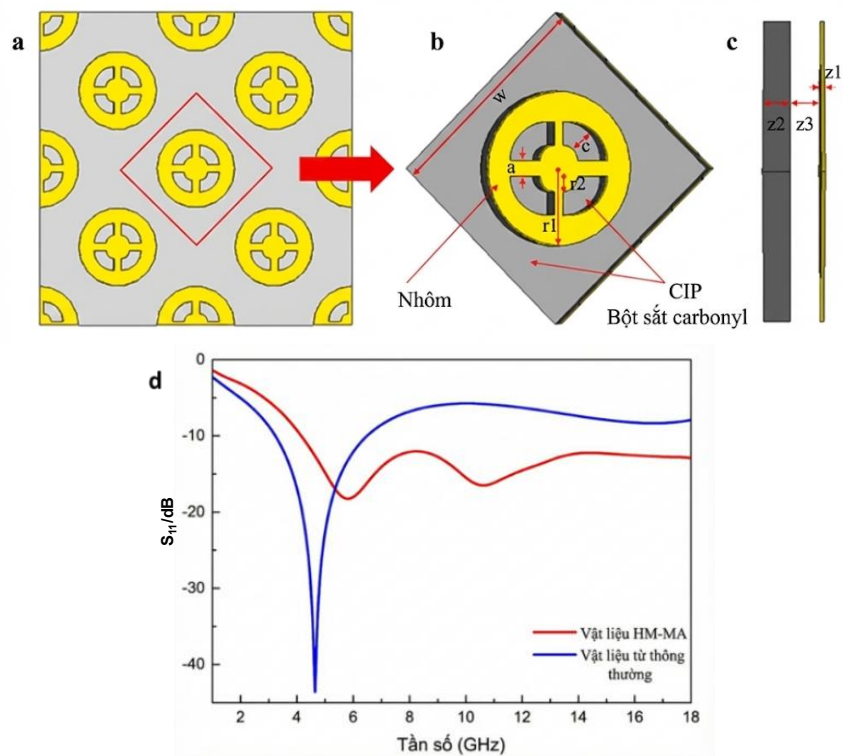
Hình 1.11. (a-c) Sơ đồ cấu trúc FBMA sử dụng mực in graphene, bố trí hệ đo và (d-e) phổ hấp thụ mô phỏng và thực nghiệm của cấu trúc ở trạng thái phẳng và uốn cong [135].

1.4. Tổ hợp vật liệu (từ - vật liệu biến hóa) hấp thụ sóng điện từ

MA thông thường có phổ hấp thụ đơn đỉnh hoặc đa đỉnh, phổ hấp thụ hẹp do bản chất cộng hưởng LC của các cấu trúc kim loại. Bên cạnh đó, vật liệu từ thường có tổn hao dải rộng, tuy nhiên khó thu được độ hấp thụ cao nếu độ dày mỏng. Trên cơ sở đó, các nhà nghiên cứu đã tích hợp vật liệu từ vào cấu trúc MA để cải thiện và mở rộng phổ hấp thụ trên cơ sở cộng hưởng của cấu trúc MA và tổn hao của vật liệu từ. Vật liệu từ tích hợp vào MA sẽ giúp CM-MA phối hợp trở kháng tốt hơn trên dải rộng, thay vì chỉ phối hợp trở kháng

xung quanh tần số cộng hưởng của MA đơn lẻ. Bên cạnh đó, các MA cấu trúc kim loại – điện môi – kim loại truyền thống vốn có đặc tính hấp thụ cố định, việc tích hợp thêm các vật liệu thông minh như vật liệu chuyển pha, vật liệu có thông số điện-từ biến đổi, mang lại khả năng điều chỉnh chủ động. Đặc biệt, khi sử dụng vật liệu từ, phổ hấp thụ của MA có thể được kiểm soát thông qua từ trường ngoài. Nguyên lý điều khiển dựa trên cơ sở độ từ thẩm hiệu dụng của vật liệu từ có thể thay đổi dưới tác động của từ trường, khiến cho tần số hoặc độ hấp thụ của CM-MA có thể biến đổi. Khả năng điều khiển chủ động bằng từ trường sẽ tạo ra sự linh hoạt tối ưu cho các ứng dụng trong thực tiễn.

Các nghiên cứu nhằm mở rộng dải tần hoạt động và giảm độ dày của vật liệu từ tại các vùng tần số L (1-2 GHz), S (2 - 4 GHz), C (4 - 8 GHz), X (8 - 12 GHz), Ku (12 - 18 GHz) đã được nghiên cứu, bao gồm các nghiên cứu sử dụng phân tử linh kiện ngoại vi, cấu trúc đa lớp [136] [137] [138].

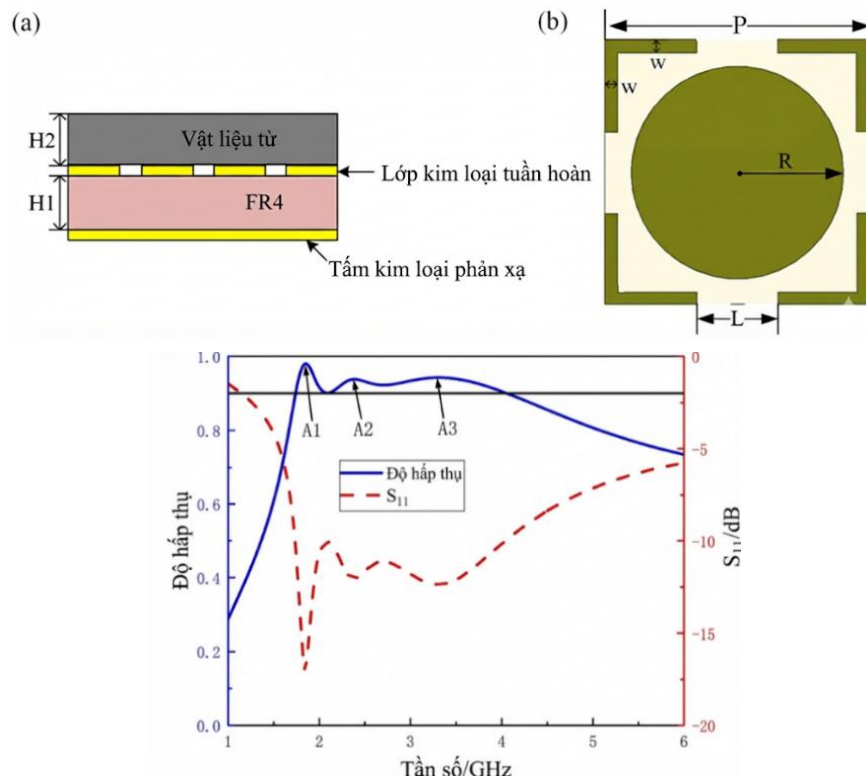


Hình 1.12. (a-c) Cấu trúc CM-MA (d) phổ tổn hao phản xạ của cấu trúc so với vật liệu CIP thông thường [139]

Cho đến nay, việc đồng thời tối ưu độ mỏng và độ rộng dải hấp thụ của các cấu trúc CM-MA hấp thụ EMW trong vùng GHz vẫn là bài toán khó và còn nhiều thách thức. Trong một công trình gần đây vào năm 2023 của Wanqiao và cộng sự [139] đã đề xuất thiết kế cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu từ sắt carbonyl, kết quả cho dải tần hấp thụ rộng 13,40 GHz, dao động từ 4,60 đến 18

GHz với độ dày lớp vật liệu CIP là 3,50 mm, cải thiện đáng kể so với CIP thông thường khi chỉ có băng thông hấp thụ 3,20 GHz (từ 3,50 - 5,70 GHz) (Hình 1.12). Cơ chế tổn hao phản xạ cũng được phân tích bằng sự phân bố dòng điện bề mặt và điện trường. Tổn hao phản xạ của cấu trúc đạt -20dB tại tần số 6,10 GHz và -16,30 dB tại 10,80 GHz. Cấu trúc đạt được hiệu suất hấp thụ dải tần rộng bằng sự kết hợp cộng hưởng điện của vật liệu và cộng hưởng của các đơn vị cấu trúc.

Năm 2024, Shou và cộng sự [140] đã đề xuất cấu trúc sử dụng vật liệu từ được chế tạo từ sắt carbonyl trộn với cao su theo tỷ phần phù hợp có độ dày mỏng hấp thụ sóng điện từ trong vùng tần số S-band (Hình 1.13). Cấu trúc gồm 3 lớp với lớp trên cùng là vật liệu từ, lớp giữa gồm vòng tròn và các cấu trúc hình chữ L tại các cạnh được in trên tấm vật liệu điện môi FR-4 và lớp dưới cùng là tấm phản xạ từ đồng. Cấu trúc có độ hấp thụ trên 90% sóng điện từ trong dải tần số từ 1,73 - 4,04 GHz. Tổng độ dày của lớp hấp thụ khoảng 3,40 mm, tương ứng $0,02\lambda$, trong đó độ dày của lớp CIP chỉ là 1,5mm.



Hình 1.13.a) Sơ đồ cấu trúc CM-MA, b) cấu trúc cộng hưởng và (c) phổ hấp thụ của cấu trúc trong vùng tần số S-band [140].

Hầu hết các nghiên cứu về CM-MA cho hấp thụ dải rộng hiện nay chủ yếu khai thác vật liệu từ dưới dạng tấm phủ bên trên MA. Đối với cấu trúc dạng tấm phủ, cấu trúc cộng hưởng kim loại cho độ hấp thụ cao, phổ hấp thụ hẹp,

vật liệu từ tích hợp vào cấu trúc góp phần thay đổi trở kháng và bổ sung tổn hao cho cấu trúc tổng thể, qua đó tăng cường độ hấp thụ của vật liệu và mở rộng dải tần số hấp thụ của cấu trúc. Một ưu điểm quan trọng của cấu trúc sử dụng vật liệu từ dưới dạng tấm phủ là tính khả thi cao trong quá trình chế tạo và đánh giá thực nghiệm. Tuy nhiên, từ kết quả của các nghiên cứu có thể thấy, độ dày tổng thể của cấu trúc vẫn còn lớn. Do đó, việc tối ưu hóa, giảm độ dày của cấu trúc vẫn là hướng nghiên cứu được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm. Bên cạnh đó, hướng nghiên cứu CM-MA sử dụng vật liệu từ dưới dạng cấu trúc cộng hưởng thay vì kim loại đến nay vẫn còn hạn chế, chưa có nhiều nghiên cứu. Khi đó ngoài việc khai thác tổn hao nội tại, vật liệu từ ở dạng cấu trúc sẽ sinh ra các đỉnh cộng hưởng dạng Mie, mà không cần đến cấu trúc cộng hưởng kim loại. Điều này hứa hẹn góp phần mở rộng vùng hấp thụ của CM-MA so với vật liệu từ đơn lẻ.

Ngoài ra, hướng nghiên cứu sử dụng tác động ngoại vi, trong đó có từ trường ngoài vào các cấu trúc CM-MA cũng đang được các nhà khoa học quan tâm, mang đến khả năng điều khiển dải tần số hấp thụ. Các vật liệu từ (ferrite spinel, hexaferrite, YIG, hợp kim FeCo, v.v.) có đặc trưng cộng hưởng sắt từ FMR khi chịu tác dụng của từ trường ngoài, tần số cộng hưởng thay đổi theo hàm số [141]:

$$\omega_{\text{FMR}} \approx \gamma(H_0 + H_{\text{aniso}}), \quad (1.21)$$

trong đó γ là tỷ số hồi chuyển từ, H_0 là từ trường ngoài, H_{aniso} là từ trường dị hướng nội tại.

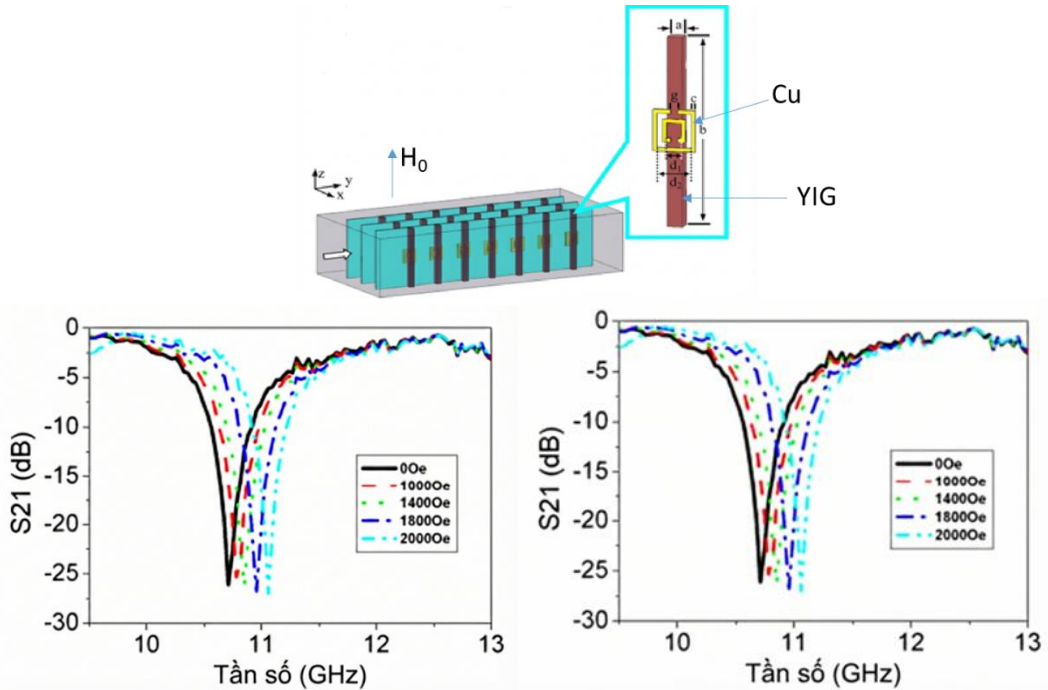
Quanh tần số FMR, phần ảo của độ từ thẩm μ'' tăng mạnh, thể hiện tổn hao từ lớn là một điều kiện thuận lợi cho hấp thụ vi sóng. Ở dải 1 - 18 GHz, nhiều loại ferrite truyền thống có FMR rơi vào băng S - C - X, có thể điều chỉnh bằng H_0 để lựa chọn dải hấp thụ mong muốn [142].

Khi nghiên cứu vật liệu biến hóa có tích hợp vật liệu từ, biên độ và tần số hấp thụ của cấu trúc CM-MA phụ thuộc đáng kể vào sự biến đổi độ từ thẩm hiệu dụng của vật liệu từ. Đối với từng hệ vật liệu từ, độ từ thẩm hiệu dụng sẽ có các hàm tương ứng khác nhau, ví dụ đối với vật liệu ferrite magie độ từ thẩm hiệu dụng μ_{eff} theo tần số và giá trị từ trường được biểu diễn bằng công thức sau [32]:

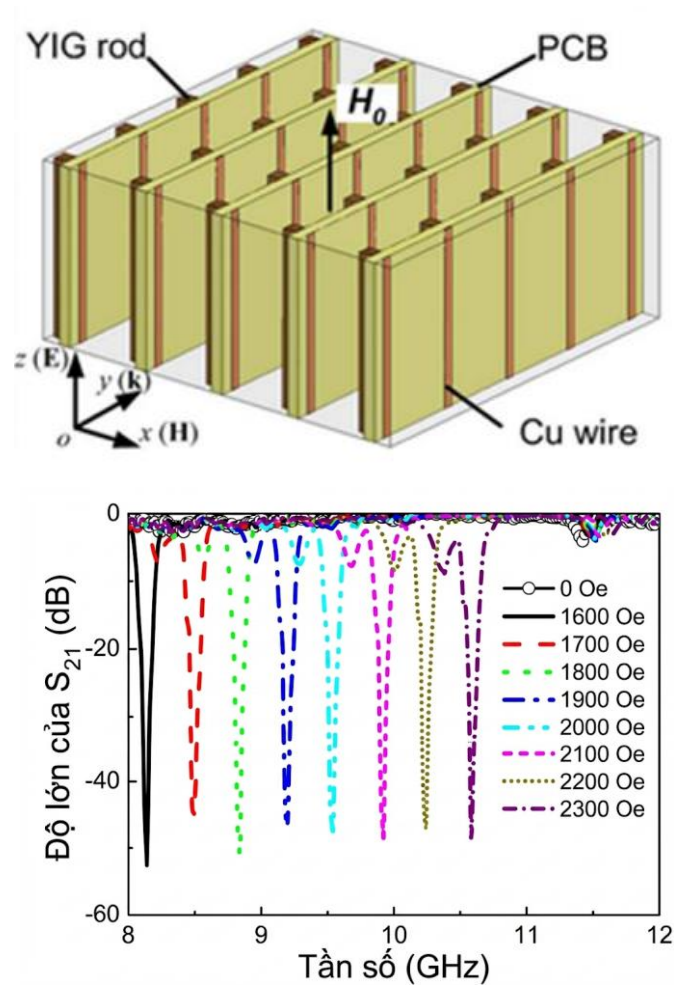
$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\omega_m}{\frac{\omega^2}{\omega_0 + \omega_m} - \omega_0 - j\alpha\omega\left(\frac{\omega^2}{(\omega_0 + \omega_m)^2} + 1\right)}, \quad (1.22)$$

ở đây $\omega_0 = \gamma H_0$ là tần số cộng hưởng sắt từ với hệ số hồi chuyển từ $\gamma = 1.759 \times 10^{11} \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$, tần số đặc trưng của vật liệu ferrite $\omega_m = 4\pi M_s \gamma$ và sự suy giảm của tuế sai sắt từ $\alpha = \gamma \Delta H / 2\omega$; ΔH là độ rộng cộng hưởng.

Các nghiên cứu áp dụng từ trường ngoài lên CM-MA bắt đầu từ năm 2008, khi Kang [31] đã đề xuất vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm điều khiển được bằng từ trường (Hình 1.14). Trong thiết kế này, các thanh ferrite YIG (yttrium iron garnet) được tích hợp với cấu trúc cộng hưởng vòng hở. Bằng cách khai thác cộng hưởng sắt từ của YIG để chủ động điều chỉnh độ từ thẩm hiệu dụng của môi trường, điện cảm tương đương L_{LLL} của cấu trúc cộng hưởng vòng hở có thể được điều chỉnh liên tục, từ đó đạt được dịch tần theo cả hai chiều, liên tục và thuận nghịch. Cụ thể, khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 0 - 2000 Oe, tần số cộng hưởng dịch chuyển từ 10,71 GHz lên 11,06 GHz và trong khoảng 3200-6000 Oe, tần số cộng hưởng dịch chuyển từ 10,42 GHz đến 10,86 GHz.



Hình 1.14. Sơ đồ cấu trúc MA sử dụng vật liệu YIG và phổ cộng hưởng dịch chuyển theo hai chiều tại các từ trường khác nhau [31].

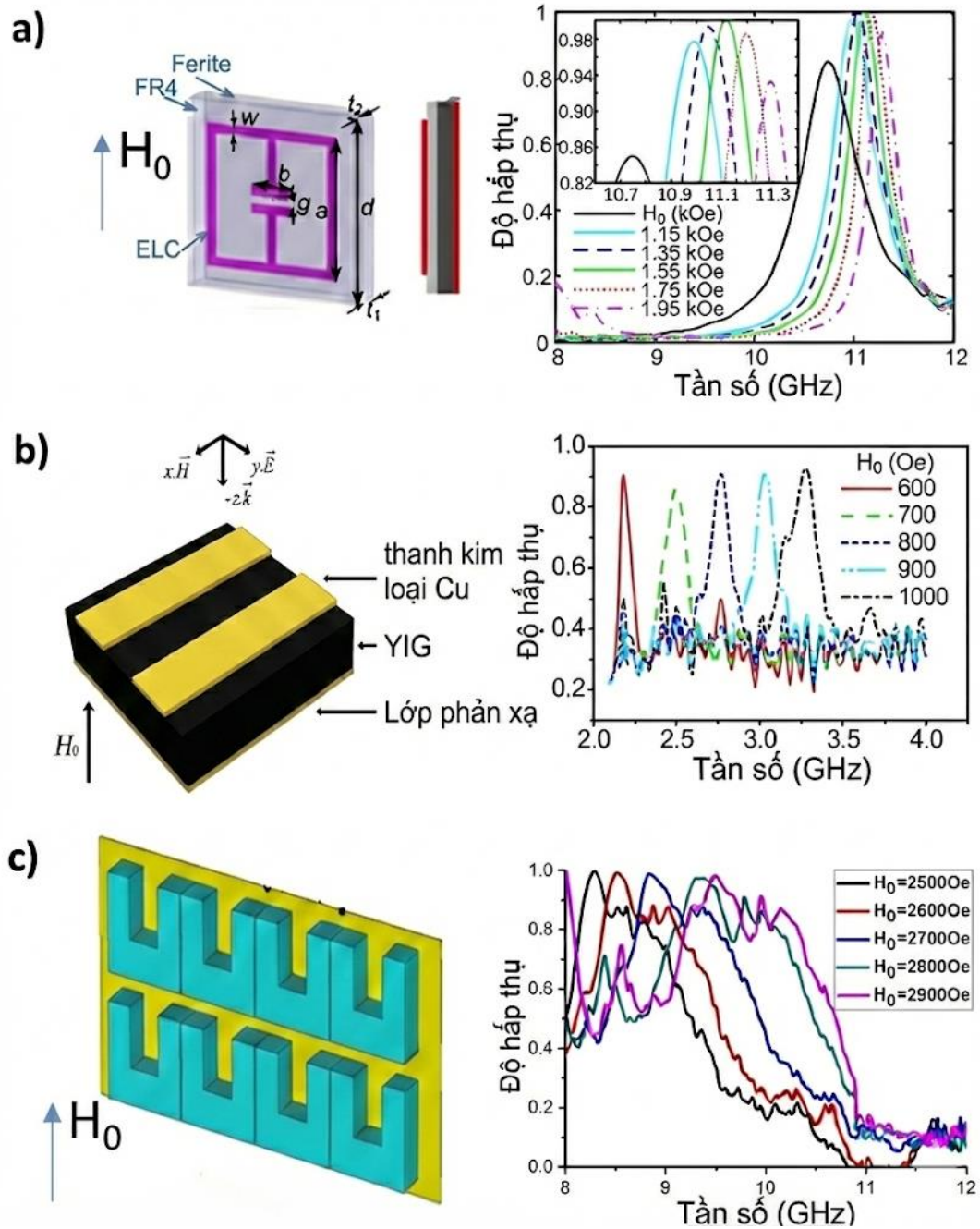


Hình 1.15. Sơ đồ cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu YIG và phổ cộng hưởng của cấu trúc khi thay đổi giá trị từ trường tác động [143]

Tiếp đó, năm 2009, Zhao và cộng sự [143] đã kết hợp các thanh ferrite YIG với dây kim loại, hiện thực hóa khả năng điều khiển tần số cộng hưởng bằng từ trường như thể hiện trong Hình 1.15. Trong cấu trúc này, khi một từ trường được áp theo phương song song với các thanh ferrite và tăng từ 1600 Oe lên 2300 Oe, tần số cộng hưởng dịch chuyển từ 8,20 GHz lên 10,70 GHz, tương ứng với tốc độ điều chỉnh 3,50 GHz/kOe.

Hình 1.16 trình bày các kết quả nghiên cứu điều khiển tần số hấp thụ của cấu trúc CM-MA, trong đó Huang và cộng sự (2014) đã tổng hợp và thực nghiệm một cấu trúc CM-MA sử dụng ferrite trên cơ sở magie (TT1-390) có khả năng điều chỉnh tần số hoạt động trong dải tần X [32]. Khi tăng H_0 , đỉnh hấp thụ tại tần số gần 10 GHz dịch tần rõ rệt, đồng thời độ hấp thụ đạt 0,98 tại nhiều giá trị H_0 khác nhau. Năm 2016, Li và cộng sự đã đề xuất cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ hoạt động trong vùng tần số từ 0,20 - 7,60 GHz, sử dụng tấm ferrite YIG làm lớp nền. Bằng thực nghiệm thay đổi H_0 từ

600 Oe đến 1000 Oe, phổ hấp thụ của cấu trúc dịch chuyển từ tần số 2,2 GHz đến 3,2 GHz, đồng thời giữ độ hấp thụ cao [27]. Wei Li và cộng sự (2019) bằng việc sử dụng cấu trúc hình chữ U từ vật liệu ferrite (YIG) đã tạo ra cấu trúc có độ hấp thụ trên 70% trong dải tần từ 8,40 GHz đến 9,40 GHz dưới từ trường tác dụng tới H_0 tăng dần từ 2700 đến 2900 Oe [144].



Hình 1.16. Sơ đồ cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu ferrite và phổ hấp thụ dịch chuyển tại các giá trị từ trường H_0 khác nhau [27, 32, 144].

Từ các nghiên cứu trên, có thể nhận thấy, nghiên cứu điều khiển tính chất hấp thụ của CM-MA thông qua từ trường ngoài vẫn chưa có nhiều nghiên cứu

được thực hiện, hệ vật liệu từ tích hợp vào cấu trúc CM-MA trong điều khiển tính chất hấp thụ còn hạn chế, chủ yếu tập trung sử dụng vật liệu $MgFe_2O_4$ và YIG, một số hệ vật liệu từ khác phù hợp (có lực kháng từ nhỏ) để điều khiển như Ni-Zn ferrite chưa được nghiên cứu. Ngoài ra, các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào điều khiển tần số hấp thụ đơn đỉnh, khả năng điều khiển độc lập biên độ của cấu trúc CM-MA trong khi vẫn giữ tần số cộng hưởng và điều khiển tần số hấp thụ của cấu trúc có phổ hấp thụ đa đỉnh còn chưa được quan tâm, nghiên cứu rộng rãi.

Đối với tình hình nghiên cứu trong nước:

Tại Việt Nam, các hướng nghiên cứu chủ yếu tập trung vào phát triển vật liệu từ đơn lẻ hoặc MA sử dụng cấu trúc cộng hưởng kim loại hấp thụ sóng điện từ. Hướng nghiên cứu về vật liệu hấp thụ/chắn sóng điện từ được quan tâm sớm do nhu cầu giảm phản xạ radar, giảm nhiễu điện từ, bảo vệ thiết bị điện-điện tử trong cả dân sự và quân sự - quốc phòng. Các hướng nghiên cứu về vật liệu ferrite, vật liệu dẫn điện, composit nền polyme, cấu trúc nhiều lớp/gradient đã được thực hiện và phát triển cho thấy hiệu quả hấp thụ sóng điện từ trong vùng tần số GHz [37-39]. Các đơn vị nghiên cứu trong Bộ Quốc phòng như Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga đã triển khai các nhiệm vụ khoa học và công nghệ theo hướng vật liệu chức năng cho khả năng hấp thụ sóng điện từ. Tại viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, hướng polyme dẫn điện và nanocomposit được phát triển và là nền tảng cho các nghiên cứu hấp thụ/chắn sóng, bao gồm chế tạo vật liệu dựa trên polypyrrole, polyanilin, gia cường carbon black để mở rộng băng hấp thụ [145, 146]. Các luận án nghiên cứu về vật liệu từ hấp thụ sóng điện từ như hệ vật liệu nano $Ni_{0,8}Zn_{0,2}Fe_2O_4$ (năm 2021) của NCS. Lương Thị Quỳnh Anh, nano ferrite (năm 2018) của NCS. Trần Quang Đạt, vật liệu tổ hợp điện môi/ Fe_3O_4 của NCS. Nguyễn Đăng Cơ (năm 2025), tổ hợp vật liệu điện môi $La_{1,5}Sr_{0,5}NiO_4$ với các hạt nano từ của NCS. Chu Thị Ánh Xuân (năm 2018) và polyme dẫn chứa ferocen và spinel ferit” của NCS Hoàng Anh Tuấn (năm 2010) đã được triển khai thực hiện.

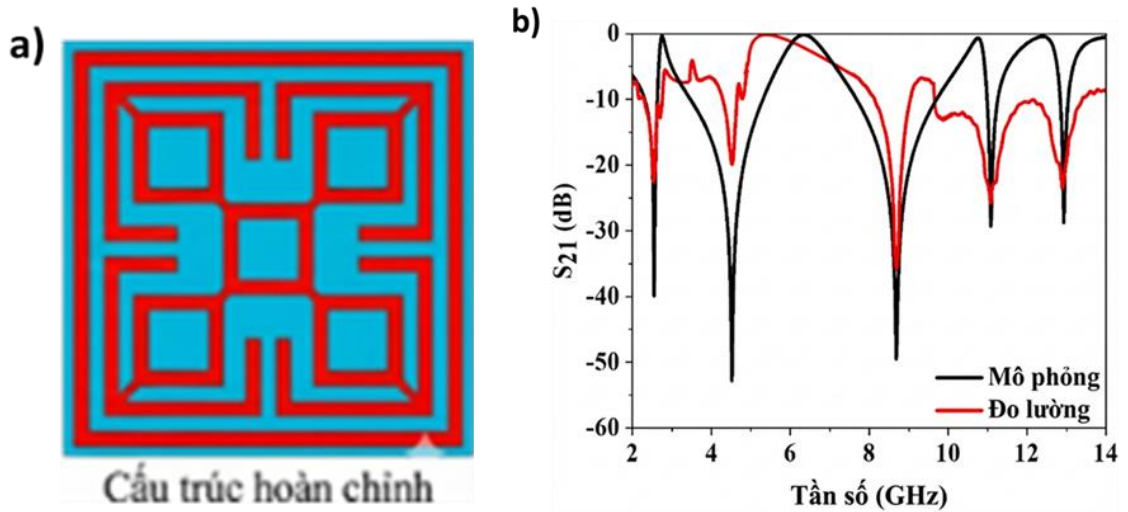
Đối với lĩnh vực MA, tại Viện Khoa học Vật liệu, nhóm nghiên cứu do GS.TS. Vũ Đình Lâm xây dựng và phát triển đã đạt những thành tích đáng ghi nhận, bao gồm các nghiên cứu cơ bản và ứng dụng về MA [33-36], các nghiên cứu thực hiện từ mô phỏng - thiết kế - đo đạc thực nghiệm và đi đến ứng dụng,

các hướng nghiên cứu của nhóm đa dạng bao gồm: truyền dẫn năng lượng không dây, cảm biến khí, hiệu ứng giam giữ sóng điện từ, vật liệu chiết suất âm.... Bên cạnh đó, một số nhóm nghiên cứu tại Việt Nam cũng đã triển khai các hướng nghiên cứu về MA như nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Trần Mạnh Cường tại Đại học Sư phạm Hà Nội; Nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Nguyễn Thị Quỳnh Hoa tại Đại học Vinh; Nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Nguyễn Thị Hiền tại Đại học Thái Nguyên, các nghiên cứu cơ bản và ứng dụng của vật liệu biến hóa của các nhóm nghiên cứu này chủ yếu tập trung thiết kế, mô phỏng vật liệu ở vùng tần số GHz và THz [147, 148].

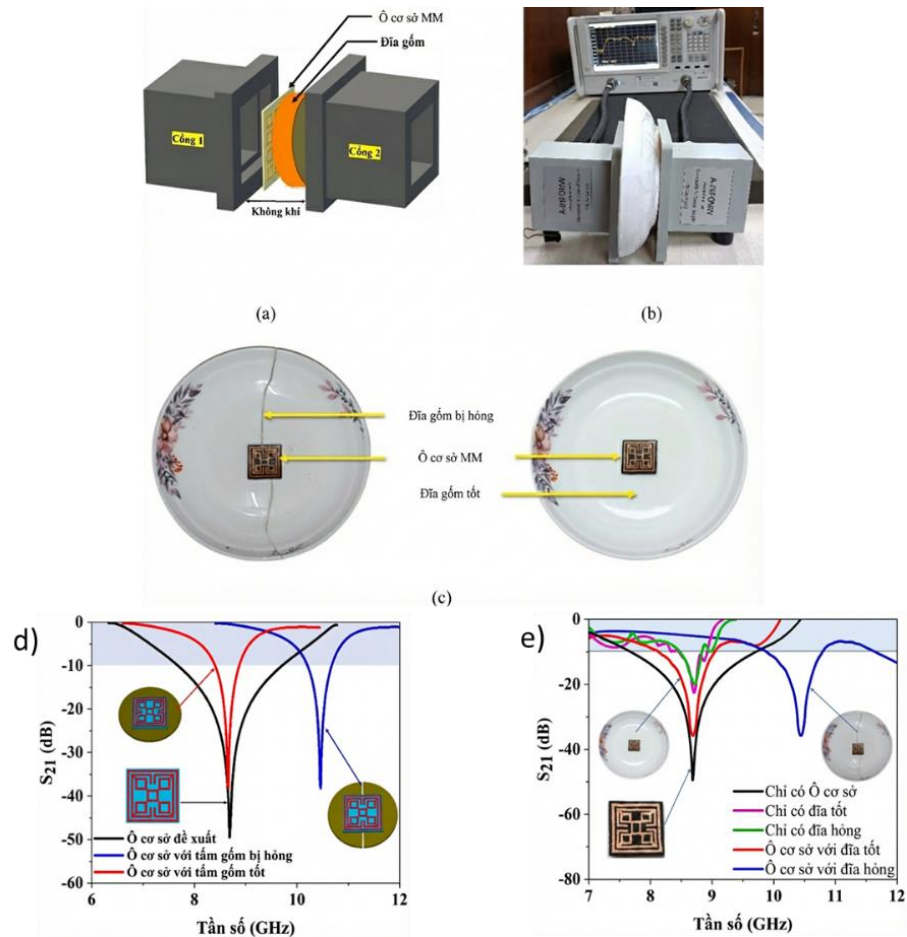
Các luận án về vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ đã được nghiên cứu nhiều như MA hấp thụ đa dải tần rộng vùng GHz của NCS Đinh Hồng Tiệp (năm 2018), MA hấp thụ sóng điện từ đẳng hướng trên cơ sở kết hợp với graphene của NCS. Trần Văn Huỳnh (năm 2022), MA hấp thụ sóng điện từ dải rộng tích hợp phần tử tổn hao của NCS. Nguyễn Thị Kim Thu (năm 2023), điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ bằng tác động ngoại vi của NCS. Lê Văn Long (năm 2023)... Tuy nhiên, hướng nghiên cứu chế tạo và điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ của tổ hợp vật liệu nền vật liệu từ và vật liệu biến hóa là hướng nghiên cứu mới, và không trùng lặp với các nghiên cứu trước đây.

1.5. Một số ứng dụng tiêu biểu của tổ hợp vật liệu (từ - vật liệu biến hóa)

Vật liệu CM-MA là một vật liệu mới, đóng góp sự đa dạng về thành phần vật liệu và dải tần hấp thụ điện từ rộng hơn. Trong lĩnh vực điện tử, CM-MA được sử dụng để giảm sự hiện diện của nhiễu sóng điện từ (EMI). Trong lĩnh vực quân sự - quốc phòng, CM-MA được sử dụng để phủ hoặc sơn lên các thiết bị, phương tiện quốc phòng như máy bay tàng hình, tàu chiến và quần áo quân đội, đặc biệt là quân ở mặt trận canh gác; ứng dụng trong thiết kế vỏ bọc/ tấm chắn EMI cho thiết bị điện tử quân sự, nơi cần vừa che chắn bức xạ, vừa không tăng quá nhiều khối lượng, cũng như cảm biến [149]. Ngoài ra, CM-MA dùng để làm lớp lót tường phòng máy, khoang thiết bị, vỏ tủ điện để giảm phản xạ và bức xạ rò trong dải tần từ 1 - 18 GHz; tạo tấm panel mỏng nhẹ hơn vật liệu ferrite truyền thống nhưng vẫn đạt suy hao lớn nhờ cộng hưởng của vật liệu biến hóa và tổn hao trong vật liệu từ [150, 151].



Hình 1.17. a) Cấu trúc CM-MA sử dụng Mn-Zn ferrite; b) phổ thông số phản xạ mô phỏng và thực nghiệm của MA [152]



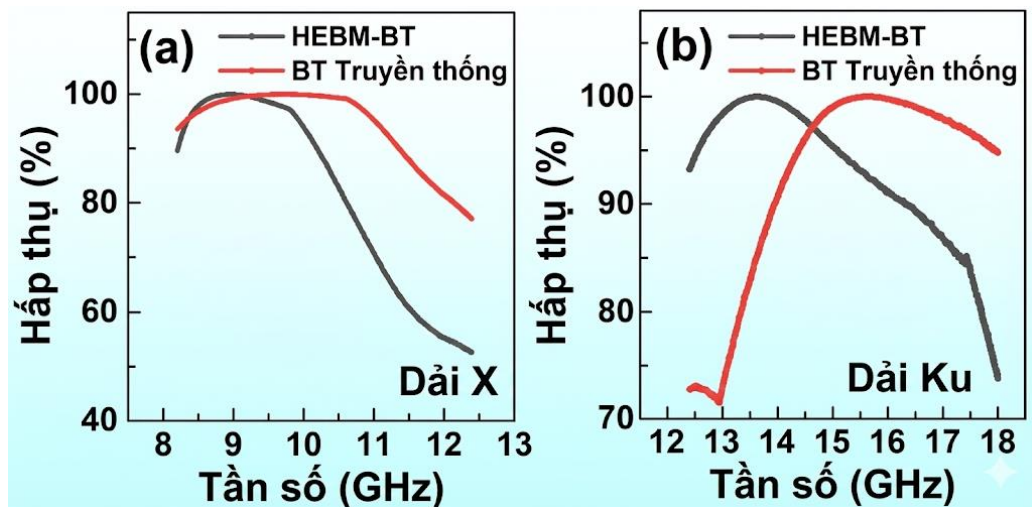
Hình 1.18. (a) Sơ đồ 3D của hệ đo thực nghiệm (b) Cấu hình đo để phân tích hiệu suất cảm biến (c) MM với các tấm gốm và phổ phản xạ của cấu trúc và (d-e) phổ phản xạ cấu trúc khi đặt trên đĩa gốm vỡ và tốt [152].

Năm 2024, Chowdhury và nhóm nghiên cứu [152] đã thiết kế cấu trúc vật liệu biến hóa penta-band dựa trên ferrite Mn-Zn dùng cho cảm biến không dây và hằng số điện môi, ứng dụng cho phát hiện hư hỏng gốm sứ. Cấu trúc đề

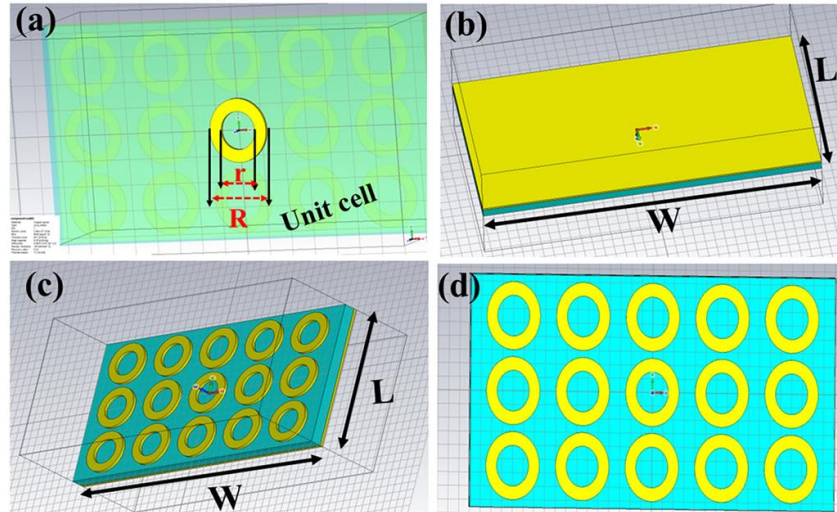
xuất được đặt trên chất nền dựa trên $Mn_x Zn_{(1-x)} Fe_2O_4$ với độ dày 1,62 mm và hằng số điện môi tương đối là 5,9. Hình 1.17 thể hiện cấu trúc hình học của ô đơn vị được đề xuất và thiết lập mô phỏng của ô cơ sở được đề xuất. Lớp đồng được sử dụng trong thiết kế có độ dày 0,035 mm. Cấu trúc có đỉnh cộng hưởng tại các tần số 2,54 GHz; 4,53 GHz; 8,68 GHz; 11,08 GHz và 12,91 GHz. Kết quả đánh giá đặc trưng phản xạ của cấu trúc khi đặt trên đĩa gốm bị hỏng và đĩa gốm tốt được trình bày trong Hình 1.18, cho thấy, khi đặt CM-MA lên đĩa gốm bị hỏng, đỉnh cộng hưởng của cấu trúc bị dịch chuyển tần số.

Nghiên cứu gần đây vào năm 2025 của D. Das và cộng sự [153] đã nghiên cứu cấu trúc hấp thụ dựa trên bari titanat ($BaTiO_3$ -BT) được tổng hợp bằng hai phương pháp là nghiền cơ năng lượng cao (High-Energy Ball Milling HEBM-BT) và kỹ thuật phản ứng pha rắn truyền thống (BT) để giải quyết các vấn đề EMI. Các cấu trúc trên cơ sở BT này có triển vọng ứng dụng giảm thiểu EMI và nâng cao hiệu quả cuộn cảm chip đa lớp, cung cấp khả năng che chắn sóng điện từ và hỗ trợ các hệ thống anten di động 5G trong các dải tần số cao.

Nhờ phối hợp trở kháng tối ưu đã mang lại giá trị RL xấp xỉ -83,6 dB và -86,1 dB tại các tần số 8,90 GHz và 13,60 GHz đối với cấu trúc sử dụng BT bằng phương pháp HEBM-BT; và khoảng -74,8 dB và -65,2 dB tại 9,7 GHz và 15,6 GHz đối với cấu trúc sử dụng BT bằng phương pháp BT. Cấu trúc dựa trên BT đã được thiết kế và mô phỏng bằng phần mềm CST, với các đỉnh cộng hưởng thể hiện hiệu suất hấp thụ cao. Cụ thể, độ hấp thụ đạt 97,41% tại 9,92 GHz đối với HEBM-BT; và đạt 95,4% tại 16,4 GHz cùng 86,8% tại 17,9 GHz đối với BT truyền thống, tương ứng trong dải tần X và dải tần Ku (Hình 1.19).



Hình 1.19. (a) phổ hấp thụ của cấu trúc theo phương pháp HEBM-BT và (b) phương pháp BT truyền thống trong vùng tần số X và Ku [153]



Hình 1.20. Cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu BT [153]

Cấu trúc CM-MA được thiết kế 3 lớp, lớp phản xạ đồng, lớp BT ở giữa và cấu trúc cộng hưởng vòng tròn ở phía trên, sơ đồ cấu trúc được trình bày trong Hình 1.20.

Hiệu quả che chắn sóng tổng (total shielding effectiveness - SE_T), phát sinh từ sự kết hợp của các cơ chế hấp thụ (shielding absorption - SE_A) và phản xạ (shielding reflection - SE_R) và phản xạ nhiều lần (multiple reflections - SE_M) được biểu diễn bằng phương trình:

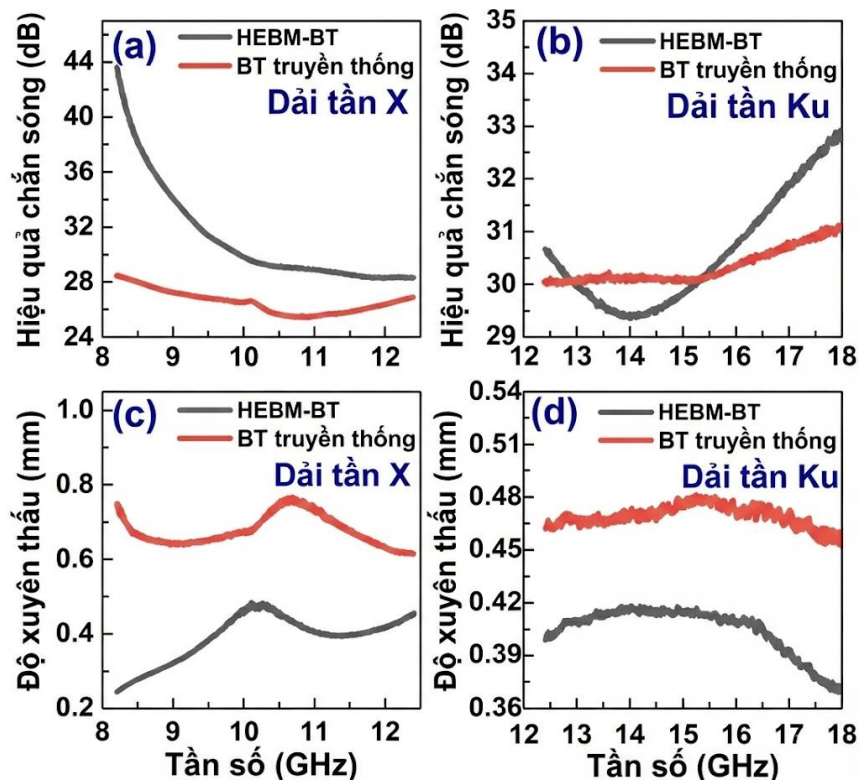
$$SE_T = SE_A + (SE)_R + (SE)_M . \quad (1.23)$$

Trong nghiên cứu này, hiệu quả che chắn do phản xạ nhiều lần (SE_M) có thể được bỏ qua vì độ dày của chúng lớn hơn độ sâu xuyên thấu (skin depth) - công suất tín hiệu sóng điện từ xuyên qua bề mặt vật liệu giảm xuống còn 37% của bức xạ vi sóng tới trong dải tần X và Ku. Do đó, hiệu quả che chắn tổng (SE_T), như đã nêu trong phương trình (1.23), có thể được biểu diễn tiếp như sau: $SE_T = SE_A + (SE)_R$

Hình 1.21 (a -b) cho thấy giá trị hiệu quả che chắn tổng (SE_T) đáng kể của cấu trúc sử dụng BT từ phương pháp HEBM-BT và BT truyền thống trên toàn bộ dải tần 8 - 18 GHz. Giá trị SE_T cực đại khoảng 43,8 dB và 33,1 dB được quan sát tại tần số tương ứng là 8,2 GHz và 17,9 GHz đối với BTO từ phương pháp HEBM-BT trong hai dải tần, tương ứng. Nghiên cứu này đã xác định được giá trị SE_T đáng kể, và điều này được quy cho tác động kết hợp của SE_A và SE_R trên toàn bộ dải tần 8 - 18 GHz. Giá trị δ được xác định bởi tần số (f) của tín hiệu tác dụng, độ từ thẩm (μ) của vật liệu và độ dẫn điện (σ) của nó. Đại lượng này có thể được biểu diễn như sau [152]:

$$\delta = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2} = \frac{8.68 \cdot \text{độ dày}}{SE_A}. \quad (1.24)$$

Độ xuyên thấu trong dải tần X được xác định lần lượt là 0,24 mm và 0,61 mm đối với cấu trúc sử dụng HEBM và BT truyền thống, cung cấp bằng chứng đáng tin cậy về hiệu ứng che chắn do cơ chế hấp thụ. Trong dải tần 12,4 - 18 GHz, độ sâu thẩm thấu được đo lần lượt là 0,36 mm và 0,45 mm đối với gốm HEBM và BT truyền thống, qua đó khẳng định che chắn chủ yếu do hấp thụ. Các giá trị δ nhỏ khiến vật liệu trở thành ứng viên triển vọng cho các ứng dụng công nghệ. Vì vậy, HEBM-BT đóng vai trò như tác nhân hạn chế sự xuyên thấu của bức xạ điện từ, chủ yếu thông qua cơ chế hấp thụ.



Hình 1.21. Sự thay đổi theo tần số của hiệu quả che chắn: (a, b) SE_T và (c, d) độ sâu thẩm thấu của gốm $BaTiO_3$ chế tạo bằng HEBM và gốm $BaTiO_3$ chế tạo bằng phương pháp truyền thống trong băng X và băng Ku [37]

1.6. Kết luận chương 1

Luận án đã hệ thống hóa bức tranh toàn cảnh về tình hình nghiên cứu vật liệu hấp thụ sóng điện từ, bao gồm vật liệu từ truyền thống, vật liệu biến hóa và đặc biệt là cấu trúc tổ hợp CM-MA. Đã làm rõ xu hướng nghiên cứu tích hợp vật liệu từ vào cấu trúc MA nhằm nâng cao hiệu quả hấp thụ và khả năng điều chỉnh chủ động. Thêm vào đó, các cơ chế cộng hưởng, nguyên lý phối hợp trở kháng cũng đã được bàn luận và phân tích để làm rõ cơ chế hấp thụ của một

số CM-MA. Đồng thời, chương này cũng đã tổng hợp các cấu trúc CM-MA điển hình cùng tiềm năng ứng dụng thực tiễn của chúng. Tuy nhiên, hiện nay các nghiên cứu về sử dụng vật liệu từ trong cấu trúc MA với vai trò như cấu trúc cộng hưởng còn hạn chế và tối ưu độ dày tổng thể của CM-MA cũng cần được nghiên cứu. Đối với việc điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ của CM-MA, các nghiên cứu điều khiển biên độ hấp thụ và điều khiển hấp thụ đa đỉnh còn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Đây là các vấn đề sẽ được tập trung nghiên cứu giải quyết trong luận án. Cụ thể trong Chương 3, luận án lựa chọn vật liệu từ nền FeCo dưới dạng cấu trúc cộng hưởng và tấm phủ để thu được CM-MA hấp thụ dải rộng. Trong chương 4, luận án lựa chọn vật liệu từ nền MFe_2O_4 để điều khiển biên độ và tần số hấp thụ đa đỉnh của CM-MA.

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để thực hiện các mục tiêu nghiên cứu của luận án, cần xây dựng một hệ phương pháp phù hợp, bao gồm cả mô phỏng lý thuyết, chế tạo mẫu và đánh giá thực nghiệm các đặc trưng điện từ của vật liệu và cấu trúc CM-MA. Vì vậy, Chương 2 trình bày các phương pháp nghiên cứu được sử dụng trong luận án, từ phương pháp mô phỏng và tính toán trở kháng đến các phương pháp chế tạo vật liệu từ, chế tạo cấu trúc MA, tích hợp vật liệu từ lên cấu trúc MA, cũng như các kỹ thuật đo đạc đặc trưng hình thái, đặc trưng từ của vật liệu từ và tính chất hấp thụ sóng điện từ của cấu trúc CM-MA. Các phương pháp này là cơ sở để thiết kế, tối ưu, chế tạo và kiểm chứng thực nghiệm các cấu trúc tổ hợp vật liệu được nghiên cứu trong các chương tiếp theo.

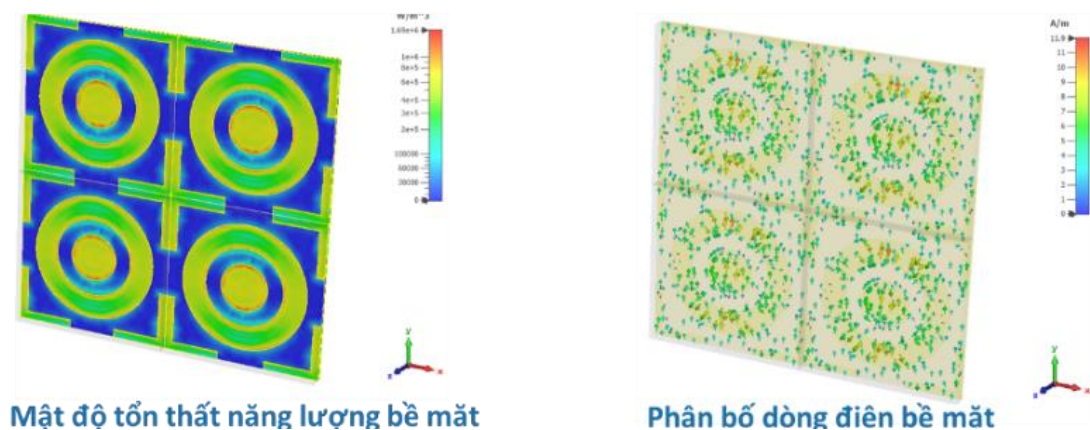
2.1 Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

2.1.1 Phương pháp mô phỏng

Trong những năm gần đây, sự bùng nổ của năng lực tính toán hiệu năng cao đã tạo ra bước ngoặt lớn cho việc mô phỏng tương tác giữa sóng điện từ và vật chất, giúp quy trình này trở nên hiệu quả và đạt độ chính xác cao. Chính vì thế, phương pháp mô phỏng số đã trở thành một công cụ không thể thiếu trong nghiên cứu khoa học hiện đại, đặc biệt là lĩnh vực khoa học vật liệu. Vai trò của mô phỏng không chỉ dừng lại ở việc dự báo các tính chất vật lý hay trực quan hóa các cơ chế tương tác phức tạp, mà còn đóng vai trò tiên quyết trong việc định hướng chiến lược nghiên cứu, qua đó tối ưu hóa quy trình và giảm thiểu tối đa các sai số rủi ro trước khi tiến hành thực nghiệm.

Trong lĩnh vực nghiên cứu MM, việc khảo sát tương tác giữa sóng điện từ và vật chất thường được thực hiện thông qua các công cụ mô phỏng số thương mại tiên tiến như CST Microwave Studio [154], HFSS [155] và Comsol Multiphysics [156]. Các nền tảng này cho phép thiết lập mô hình vật liệu dựa trên cấu trúc ô cơ sở (unit cell) - dù ở dạng tuần hoàn hay phi tuần hoàn - trong không gian hai hoặc ba chiều. Bằng cách định nghĩa chính xác các tham số vật lý, cấu hình thí nghiệm ảo và áp dụng các điều kiện biên thích hợp cho ô đơn vị, người nghiên cứu có thể trích xuất đầy đủ các đặc trưng điện từ của hệ vật liệu vĩ mô. Hiện tại, phần mềm CST Microwave Studio đã được trang bị và đưa vào sử dụng tại Phòng Thí nghiệm số, Học viện Khoa học và Công nghệ và Viện Khoa học vật liệu.

Trong luận án, phương pháp lý thuyết được triển khai theo hướng mô phỏng điện từ toàn phần nhằm mô tả trực tiếp tương tác sóng điện từ với hình học vi cấu trúc và vật liệu (điện môi, từ) trong dải tần khảo sát. Công cụ chính được sử dụng là CST Studio Suite, trong đó luận án tập trung vào bộ giải miền tần số - Frequency Domain Solver để thu nhận đáp ứng cộng hưởng và các đại lượng tán xạ với độ chính xác cao. Bộ giải miền tần số trong CST được thiết kế đặc biệt hiệu quả cho các bài toán có tính cộng hưởng rõ rệt, nơi cần mô tả chính xác hình thái trường và đáp ứng tại từng điểm tần số. Ưu điểm của mô phỏng theo phương pháp này: mô phỏng trực tiếp tại các tần số quan tâm giúp nắm bắt tốt vị trí đỉnh cộng hưởng, độ sâu suy giảm phản xạ và phân bố điện trường và từ trường tại cộng hưởng; sử dụng tetrahedral mesh và cơ chế adaptive mesh refinement, thuận lợi khi cấu trúc có chi tiết cong, khe hở nhỏ và khi trường tập trung mạnh tại mép kim loại hoặc vùng tiếp giáp vật liệu. Các ưu điểm trên phù hợp với mục tiêu của luận án là vừa cần mô tả đúng cơ chế (thông qua từ trường và điện trường phân bố), vừa cần đánh giá định lượng (thông qua S_{11} và S_{21} hấp thụ, dải tần...) với độ tin cậy cao.



Hình 2.1. Phân bố dòng điện cùng mật độ tổn hao năng lượng trên bề mặt cấu trúc được mô phỏng bởi CST.

Đầu tiên, các vật liệu được khai báo các thông số điện từ, các thông số hình học được thiết lập hoặc sử dụng thông số có sẵn trong thư viện vật liệu, các điều kiện biên cũng được thiết lập. Với cấu trúc tuần hoàn tương tác với sóng tới, Floquet ports được lựa chọn để mô tả sóng phẳng tới và các bậc nhiễu xạ (khi có), đồng thời cho phép đặt phân cực điện trường ngang TE/ từ trường ngang TM và góc tới theo mong muốn khảo sát. Từ mô phỏng, luận án sử dụng

tham số tán xạ S_{11} và S_{21} làm đại lượng cơ sở để đánh giá phản xạ - truyền qua để tính toán ra độ hấp thụ theo công thức 1.12.

Bên cạnh phổ hấp thụ, luận án khai thác phân bố từ trường H và điện trường E , mật độ dòng bề mặt và vùng tiêu tán năng lượng để làm rõ cơ chế cộng hưởng của cấu trúc, lớp vật liệu đóng góp tổn hao chính và sự biến đổi trường khi thay đổi tham số vật liệu và tham số hình học của ô cơ sở.

2.1.2 Phương pháp tính trở kháng

Trong các cấu trúc MA, cơ chế hấp thụ cao về bản chất gắn với hai điều kiện đồng thời: phối hợp trở kháng với môi trường (thường là không khí) để triệt tiêu phản xạ và tồn tại tổn hao điện môi hoặc từ để tiêu tán năng lượng. Theo Landy và cộng sự, hấp thụ 100% chỉ đạt được khi lớp vật liệu phối hợp trở kháng với môi trường (không gian tự do hoặc không khí) sao cho phản xạ bị triệt tiêu. Vì vậy, trong luận án này trở kháng của CM-MA được xác định từ các tham số tán xạ (S-parameters) thu được trong mô phỏng, làm cơ sở đánh giá mức độ phối hợp trở kháng và luận giải cơ chế hình thành đỉnh hấp thụ. Mô phỏng được thiết lập trong miền tần số, kích thích sóng phẳng theo phương vuông góc bề mặt. Khi đó, mô tả truyền qua theo chiều lan truyền, độ hấp thụ của cấu trúc được xác định theo công thức 2.1, đối với các mẫu nghiên cứu của luận án đều có chưa lớp phản xạ đồng liên tục ở dưới đáy, do đó, truyền qua S_{21} gần như bằng 0 do đó, $A = 1 - S_{21}^2$. Trong điều kiện sóng phẳng tới vuông góc, trở kháng bề mặt có thể suy ra trực tiếp từ hệ số phản xạ Γ , với quy ước $\Gamma = S_{11}$ trở kháng tương đối được tính theo công thức 1.17, trong đó Z_0 là trở kháng môi trường không khí và có giá trị xấp xỉ 377 Ω .

Tiêu chí phối hợp trở kháng của CM-MA được đánh giá thông qua phần thực và phần ảo của Z_r , khi đó $\text{Re}(Z_r)$ tiệm cận bằng 1 và $\text{Im}(Z_r)$ tiệm cận 0.

Thông qua các tham số tán xạ, luận án sử dụng phần mềm Matlab để tính toán trở kháng của vật liệu.

2.2 Một số phương pháp chế tạo và đo đạc đặc trưng vật liệu từ

2.2.1 Phương pháp nghiên cứu cơ năng lượng cao

Nghiên cứu cơ năng lượng cao là một phương pháp tiếp cận vật lý thuộc nhóm các phương pháp nghiên cứu/hợp kim hoá cơ học, trong đó năng lượng cơ học từ chuyển động của bi nghiền được truyền vào bột thông qua va đập, ma sát và lực cắt, tạo ra mức biến dạng dẻo rất lớn và mật độ khuyết tật cao. Khác với nhiều phương pháp tổng hợp hoá học (đòi hỏi môi trường dung môi, kiểm

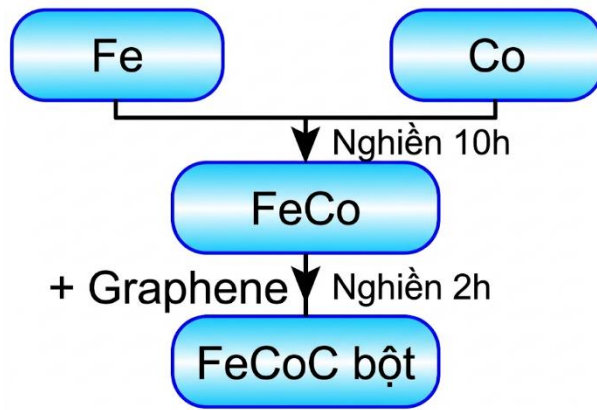
soát pH, tác nhân tạo phức...), nghiền cơ thường được thực hiện theo cơ chế trạng thái rắn, thuận lợi cho việc tinh mịn kích thước hạt, (hoạt hoá bề mặt, và thúc đẩy hình thành các pha cân bằng/phi cân bằng sau xử lý nhiệt.

Các hạt bột liên tục trải qua một chu trình lặp trong suốt quá trình nghiền: hàn nguội - biến cứng/nứt gãy - tái hàn, do các va chạm mạnh giữa các viên bi và bi với thành cối gây ra. Ở giai đoạn đầu, bột có xu hướng dính kết/hàn nguội tạo cụm; khi biến dạng tích lũy tăng, bột bị biến cứng, xuất hiện nứt gãy và tách nhỏ; các mảnh nhỏ tiếp tục tái hàn và bị cắt xé, tạo nên cấu trúc lớp hoặc tổ chức phân tán mịn tùy hệ vật liệu.

Khi nghiền kéo dài, mật độ và biên hạt tăng, kích thước tinh thể có thể giảm xuống thang nano; đồng thời có thể xuất hiện pha vô định hình tùy hệ vật liệu và mức năng lượng đưa vào. Nhiều nghiên cứu cho thấy nghiền bi năng lượng cao có thể tạo hạt tinh thể nano ngay cả với các hợp chất tương đối giòn thông qua cơ chế biến dạng dẻo cục bộ và tái sắp xếp mạng tinh thể.

Hiệu quả nghiền bị chi phối vào thời gian nghiền và nhiều tham số có tương tác, trong đó các tham số chính gồm: tỷ lệ khối lượng bi/bột, tốc độ quay, thời gian nghiền, kích thước và vật liệu bi/cối, môi trường nghiền (không khí/Ar/N₂), chế độ nghiền (liên tục hay theo chu kỳ có nghỉ) và phụ gia kiểm soát quá trình nếu cần. Các tham số này quyết định năng lượng riêng đưa vào bột, mức tăng nhiệt cục bộ, và nguy cơ nhiễm bẩn từ bi/cối hoặc oxy hoá trong quá trình nghiền.

Quy trình chế tạo mẫu gồm các công đoạn chính, gồm: Chuẩn bị tiền chất (bột oxit/kim loại theo mục tiêu thành phần), sấy khô; Cân theo hợp thức, trộn sơ bộ để giảm sai lệch cục bộ; Nạp bột và bi vào cối, lựa chọn bi/cối phù hợp; Nghiền theo chế độ đã chọn (tốc độ quay, tổng thời gian, chu kỳ nghiền-nghỉ, môi trường khí); Lấy mẫu trung gian để đánh giá mức tinh mịn và trạng thái pha; Xử lý sau nghiền: sàng/lọc, ép viên (nếu cần), và ủ/nung để hoàn thiện pha (đặc biệt với ferrite/spinel cần phản ứng rắn tạo pha).



Hình 2.2. Sơ đồ khối chế tạo vật liệu FeCo-C

Trước khi chế tạo vật liệu, quy trình chế tạo vật liệu được tối ưu hóa các thông số, như khảo sát ảnh hưởng của tốc độ nghiền, tỉ lệ bột/bi và ảnh hưởng của thời gian nghiền đến vật liệu thu được.

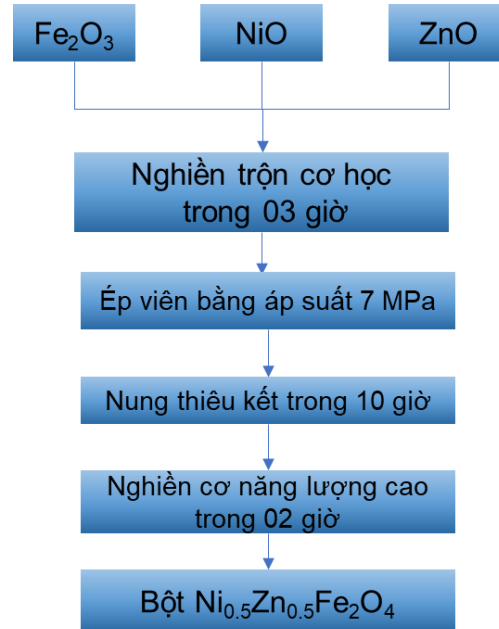
Đối với hệ vật liệu FeCo-C dùng trong Chương 3 của luận án, vật liệu ban đầu được sử dụng là các hóa chất ở dạng bột: Fe, Co, Graphene với độ sạch đạt trên 99.5% của Sigma-Andrich. Trước hết, bột Fe và Co được phối trộn theo tỉ lệ mol 1:1, sau đó nạp vào bình nghiền và nghiền trong 10 giờ nhằm thực hiện quá trình hợp kim hóa, thu được bột hợp kim FeCo. Tiếp theo, bột FeCo được nghiền trộn với graphene theo các tỉ lệ thành phần khảo sát (10-90%) trong 2 giờ. Quá trình nghiền được tiến hành trong môi trường không khí ở nhiệt độ phòng. Để hạn chế quá trình oxy hóa trong điều kiện nghiền không khí, thời gian nghiền được chia thành nhiều chu kỳ ngắn, xen kẽ với các khoảng nghỉ đủ dài nhằm giảm thiểu sự gia tăng nhiệt độ của mẫu trong suốt quá trình nghiền. Môi trường nghiền là không khí, và khí Argon, nhiệt độ nghiền mẫu là nhiệt độ phòng, nghiền trong vòng 10 giờ trở lên với tốc độ nghiền 450 vòng/phút, tỷ lệ bi/bột là 15/1.

Vật liệu $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ sử dụng trong Chương 4 của luận án được chế tạo bằng phương pháp nghiền cơ năng lượng cao kết hợp xử lý nhiệt, theo quy trình được trình bày trong Hình 2.3. Cụ thể, tiến hành chế tạo $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ từ các hóa chất NiO, ZnO, Fe_2O_3 , đầu tiên sấy hóa chất NiO, ZnO, Fe_2O_3 trong thời gian 2 giờ ở nhiệt độ $80^\circ C$. Vật liệu $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ được tạo thành theo phương trình phản ứng sau:



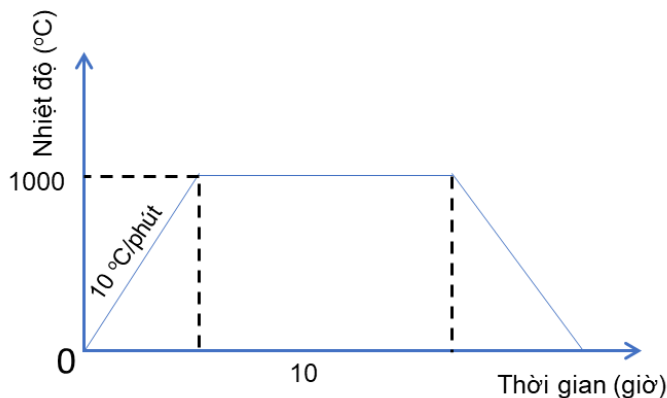
Tiến hành nghiền tay bằng cối mã nã trong thời gian 2 giờ để được hỗn hợp hóa chất được trộn đều. Dem toàn bộ hỗn hợp hóa chất được trộn đều, chia

đều vào trong 2 cối nghiền bi. Tiến hành nghiền cơ năng lượng cao trong thời gian 3 giờ trong không khí. Để hóa chất không bị bám tăng nhiều dưới đáy và xung quanh cối nghiền, sau thời gian nghiền 30 phút, cối nghiền phải được xoay 1 lần. Sau khi nghiền cơ năng lượng cao trong không khí, thu được hỗn hợp bột mịn. Dem ép viên, chuẩn bị tiến hành nung thiêu kết.



Hình 2.3. Sơ đồ khối chế tạo vật liệu $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$

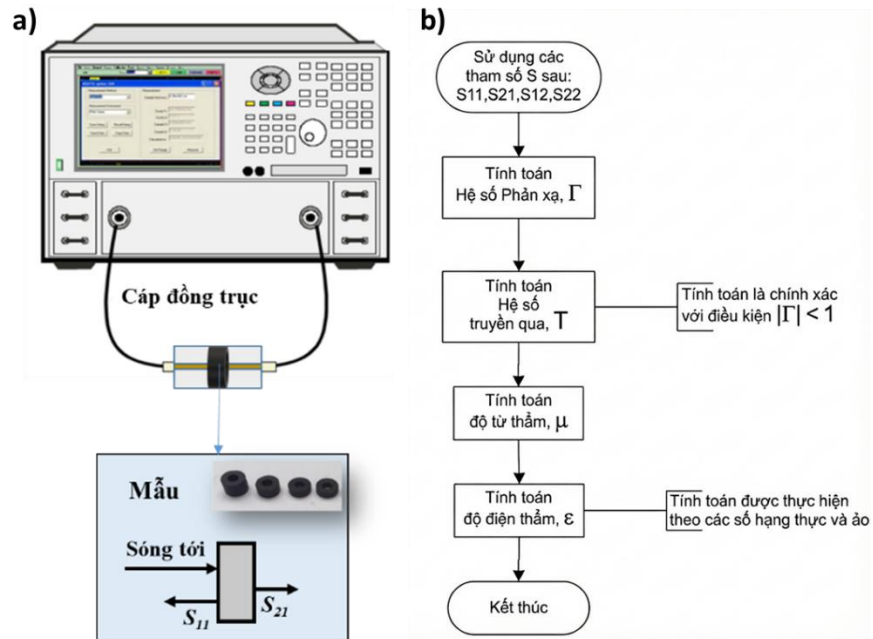
Hỗn hợp bột thu được sau khi nghiền cơ năng lượng cao được ép viên bằng áp suất 7 MPa, sau đó được đem nung thiêu kết (theo tiến trình được trình bày trong Hình 2.4. Tiến hành nung thiêu kết ở nhiệt độ cao $1000^{\circ}C$ trong thời gian 10 giờ theo sơ đồ nung thiêu kết thể hiện trong Hình 2.4, với tốc độ tăng nhiệt $10^{\circ}C/phút$. Sản phẩm cuối cùng là vật liệu $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ được đem nghiền cơ năng lượng cao thời gian 3 giờ trong không khí thu được bột mịn. Bột thu được sẽ tiến hành khảo sát tính chất điện từ, hình thái, thành phần nguyên tố và pha.



Hình 2.4. Sơ đồ nung thiêu kết

2.2.2 Phương pháp đo độ từ thẩm và độ điện thẩm

Các mẫu bột vật liệu từ thu được sẽ được đo các thông số điện thẩm và từ thẩm tại Khoa Hóa - Lý kỹ thuật/ Học viện kỹ thuật Quân sự. Mẫu được đo trên hệ phân tích mạng Keysight PNA-X N5242A. Mẫu bột được trộn với paraffin theo tỷ lệ 30% -40% về khối lượng và tạo thành mẫu hình khuyên với đường kính ngoài 7 mm, đường kính trong 3,04 mm và chiều dày 2 mm (Hình 2.5).



Hình 2.5. a) Sơ đồ hệ phân tích mạng đo thông số điện thẩm và từ thẩm và b) sơ đồ tính toán thông số điện từ

Các thông số S_{11} và S_{21} đo được sẽ sử dụng thuật toán Nicolson-Ross-Wei [157], dựa trên các tham số S_{11} và S_{21} đo được của mẫu thử, các bước để tính hằng số điện môi (ϵ_r) và độ từ thẩm (μ_r) như sau: trước tiên tính các biến trung gian x và Γ , sau đó tính các biến trung gian T và A , và cuối cùng tính ϵ_r và μ_r .

Tham số S_{11} và S_{21} có thể thu được trực tiếp từ máy phân tích mạng (VNA). Hệ số phản xạ Γ và hệ số truyền T được suy ra từ các phương trình sau [157]:

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1-T^2)}{1-\Gamma^2T^2}, \quad (2.2)$$

$$S_{21} = \frac{T(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2T^2}, \quad (2.3)$$

Kết hợp hai phương trình trên để tính biến trung gian x và giải ra hệ số phản xạ Γ và hệ số truyền T .

$$x = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}}, \quad (2.4)$$

$$\Gamma = x \pm \sqrt{x^2 - 1}, \quad (2.5)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma}, \quad (2.6)$$

Độ từ thẩm μ_r và hằng số điện môi ϵ_r được cho bởi:

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{\epsilon_r \mu_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right) = - \left(\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right)^2, \quad (2.7)$$

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{\Lambda(1 - \Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}}, \quad (2.8)$$

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r} \left(\frac{1}{\lambda_c^2} + \frac{1}{\Lambda^2} \right). \quad (2.9)$$

Thông qua phần mềm tính toán Matlab để tính toán phần thực và phần ảo của độ từ thẩm và hằng số điện môi. Kết quả này được sử dụng để định nghĩa giá trị độ điện thẩm và từ thẩm theo tần số của vật liệu từ trong phần mềm mô phỏng CST.

2.2.3 Phương pháp đo từ kế mẫu rung

Trong luận án, các thông số từ tính (đường cong từ trễ M-H, từ độ bão hòa, lực kháng từ) của mẫu được xác định bằng hệ từ kế mẫu rung (vibrating sample magnetometer - VSM) đặt tại Phòng Vật lý vật liệu từ và siêu dẫn, Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. VSM là kỹ thuật đo mômen từ m (hoặc từ hóa M) dựa trên định luật cảm ứng điện từ Faraday: khi một mẫu đã bị từ hóa dao động tuần hoàn gần hệ cuộn thu, từ thông do mômen từ của mẫu xuyên qua cuộn thu biến thiên theo thời gian và tạo ra suất điện động cảm ứng tỉ lệ với mômen từ.

Từ hóa được quy đổi theo khối lượng [158]:

$$\sigma = \frac{m}{m_{\text{mass}}} \text{ (emu/g)}, \quad (2.10)$$

trong đó m_{mass} là khối lượng mẫu.

Quy trình đo mẫu thực hiện theo các bước:

- Chuẩn bị mẫu: mẫu được làm sạch, cân khối lượng, đo kích thước; cố định chắc chắn vào đầu giữ mẫu bằng vật liệu không từ (quartz, nhựa, băng dính không từ...) để tránh rung lệch tâm.

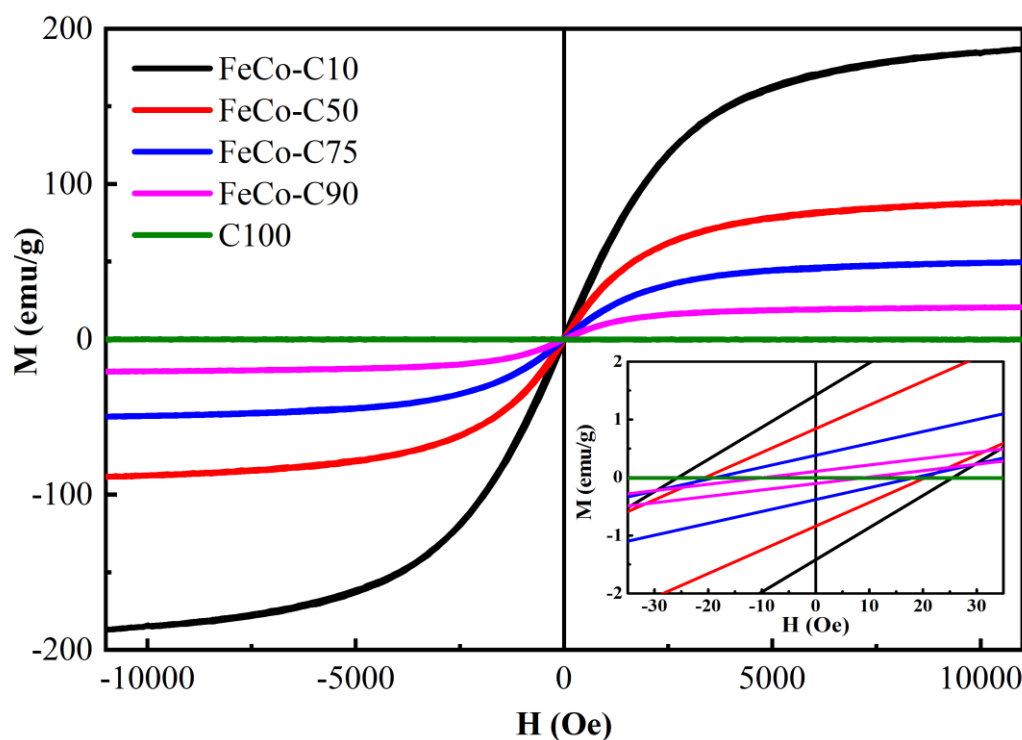
- Căn chỉnh vị trí: dịch chuyển mẫu theo trục rung để tối ưu biên độ tín hiệu (tối đa hóa hệ số ghép C), đồng thời giảm sai số do lệch vị trí so với vùng “đồng đều” của cuộn thu.

- Đo nền và trừ nền: đo giá giữ và vật liệu gắn ở cùng điều kiện để loại bỏ đóng góp tín hiệu không mong muốn, đặc biệt quan trọng khi đo mẫu khối lượng nhỏ.

- Thiết lập chương trình quét trường: quét H theo chu trình tăng - giảm - tăng (hoặc giảm - tăng - giảm) để thu vòng từ trễ $M(H)$; tốc độ quét và bước trường được chọn sao cho đảm bảo thời gian ổn định tín hiệu lock-in và giảm nhiễu.

- Lặp đo/đối chiếu: với một số mẫu đại diện, đo lặp (ít nhất 2 - 3 lần) để đánh giá độ lặp lại.

Kết quả đo đặc trưng từ các mẫu vật liệu FeCo-C theo các tỷ lệ carbon khác nhau được chế tạo và sử dụng trong luận án được trình bày trong Hình 2.6.



Hình 2.6. Đường cong từ trễ $M(H)$ của các mẫu vật liệu FeCo-C 10%, 50%, 75%, 90% và graphene nguyên chất

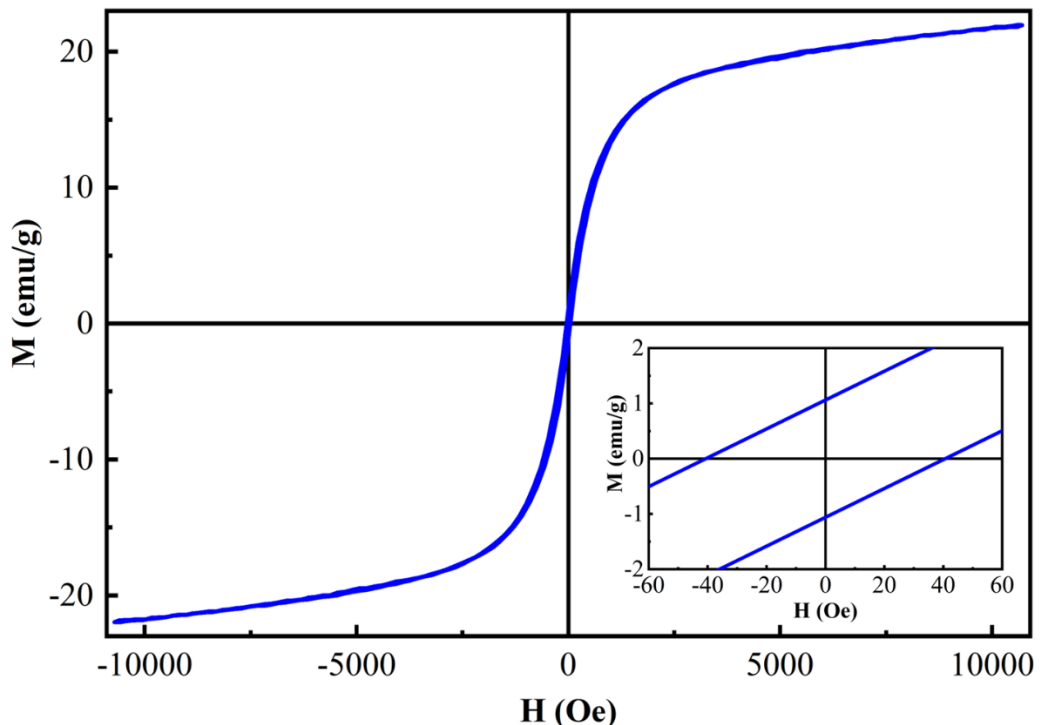
Quan sát Hình 2.6 có thể thấy, các mẫu FeCo-C có vòng từ trễ hẹp, đặc trưng của vật liệu từ mềm. Khi hàm lượng carbon tăng, cả độ từ hóa bão hòa và lực kháng từ đều giảm. Xu hướng này có thể được giải thích bởi hiệu ứng pha loãng từ tính của carbon không từ, làm giảm tỷ phần FeCo mang từ tính trong vật liệu, đồng thời làm suy yếu tương tác trao đổi giữa các hạt từ. Ngoài ra, sự hiện diện của carbon giữa các hạt FeCo cũng làm giảm hiệu ứng kết tụ và giảm các tâm ghim vách đômên hiệu dụng, từ đó làm cho quá trình đảo từ

xảy ra dễ hơn và lực kháng từ giảm. Kết quả được tổng hợp trong Bảng 2.1, có thể thấy rằng, đối với các mẫu vật liệu có tỷ lệ graphene thấp như FeCo-C (10 và 50%) có giá trị lực kháng từ H_c nhỏ, cụ thể là 26 và 20 Oe tương ứng, tuy nhiên độ từ hóa bão hòa tương đối cao là 187 và 88 emu/g. Các mẫu FeCo-C (75%) và FeCo-C (90%) có độ từ hóa bão hòa thấp hơn là 49 và 20 emu/g tương ứng và lực kháng từ H_c lần lượt là 19 và 9 Oe, tuy nhiên khi tỷ lệ graphene tăng, mật độ vật liệu từ giảm, khoảng cách của các hạt FeCo là rời rạc, xa nhau. Dẫn đến, vật liệu FeCo-C không còn nhạy với từ trường.

Bảng 2.1 Tổng hợp thông số lực kháng từ và từ hóa bão hòa của các mẫu vật liệu FeCo-C

STT	Mẫu	M_s (emu/g)	H_c (Oe)
1	FeCo-C (10%)	187	26
2	FeCo-C (50%)	88	20
3	FeCo-C (75%)	49	19
4	FeCo-C (90%)	20	9

Kết quả đo đặc trưng từ của mẫu vật liệu $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ được trình bày trong Hình 2.7.



Hình 2.7. Đường cong từ trễ $M(H)$ của vật liệu $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$

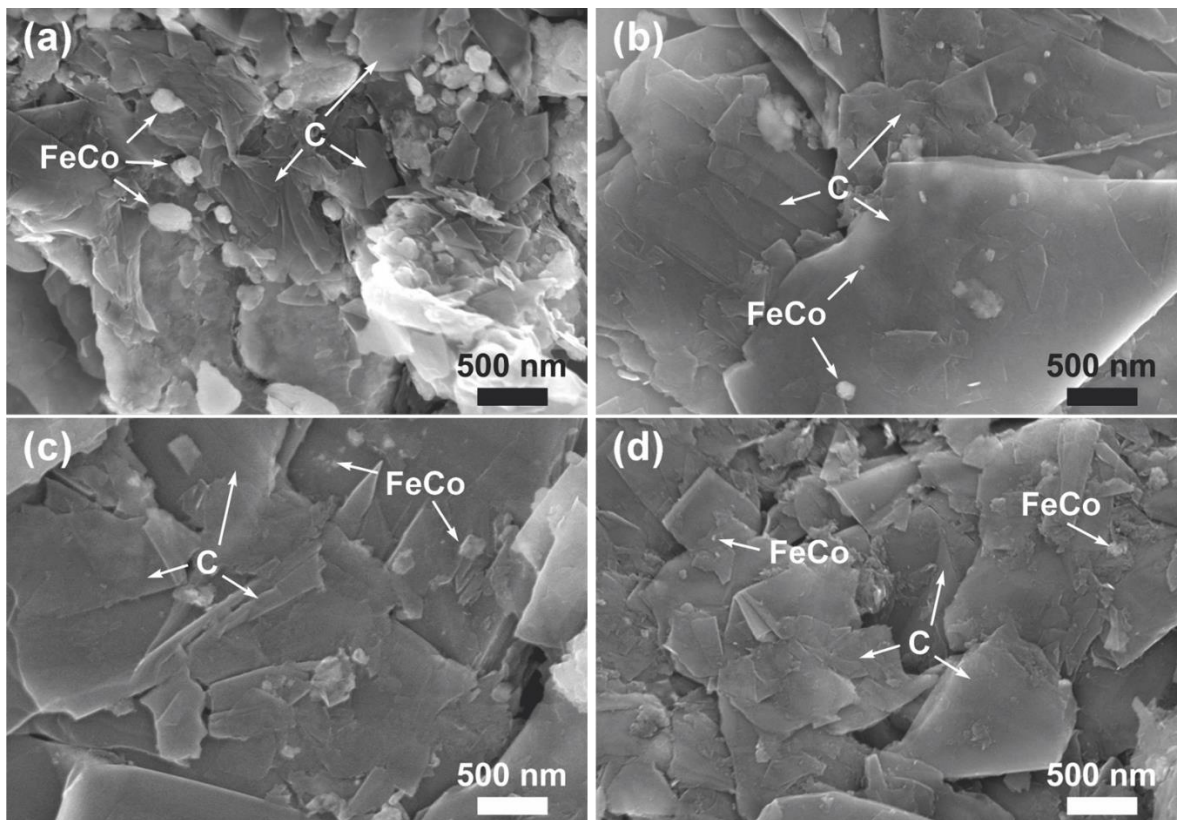
Kết quả cho thấy vật liệu $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ cũng có vòng trễ từ hẹp, có tính sắt từ yếu, gần với thuận từ, với lực kháng từ H_c chỉ 40 Oe và độ từ hóa bão hòa M_s là 22 emu/g. Đặc trưng này phù hợp với bản chất của ferrite spinel Ni-

Zn, trong đó sự phân bố cation giữa các vị trí mạng tinh thể làm cho mômen từ tổng không lớn như ở các hợp kim từ nền kim loại. Với lực kháng từ và từ độ thấp như vậy, vật liệu dễ bị từ hóa và khử từ, phù hợp với mục tiêu nghiên cứu nhằm sử dụng từ trường ngoài để tăng cường khả năng hấp thụ sóng điện từ.

2.2.4 Phương pháp hiển vi điện tử quét

Kính hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscope - SEM) là một trong những công cụ linh hoạt nhất để phân tích các cấu trúc vi mô (micro) và nano. Kỹ thuật SEM cung cấp thông tin về hình thái và thành phần của bề mặt bằng cách thu thập và xử lý các tín hiệu được tạo ra bởi một đầu dò điện tử sắc nét trong một khối lượng tương tác nhất định [159]. Cấu trúc hình thái của vật liệu từ sử dụng trong luận án được nghiên cứu bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM; Hitachi S4800, Nhật Bản) tại Viện Khoa học vật liệu. Trong hệ kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường còn tích hợp hệ EMAX ENERGY (EDX) cho phép phân tích nguyên tố trong vùng có kích thước μm .

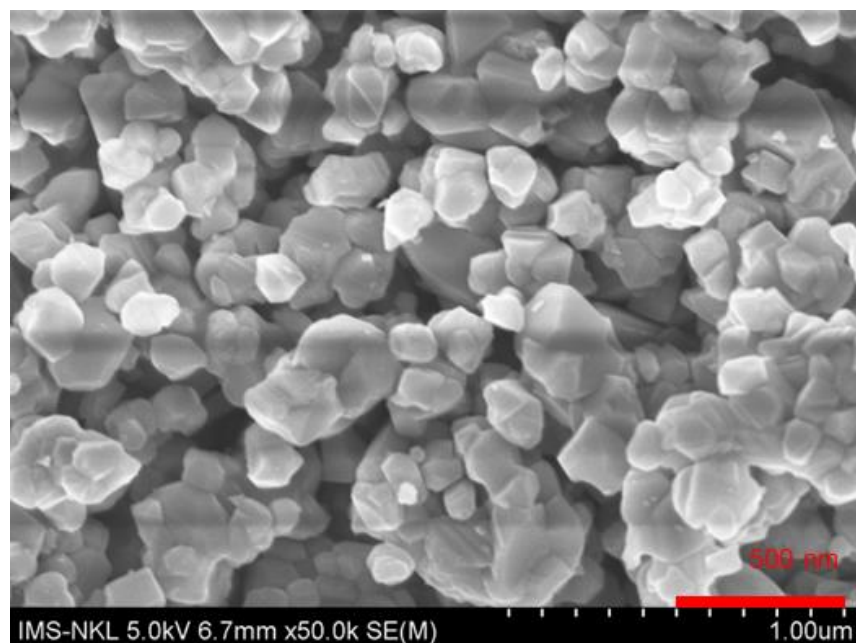
Kết quả phân tích cấu trúc hình thái bề mặt các mẫu composite FeCo-C theo các tỷ lệ carbon khác nhau được trình bày trong Hình 2.8 [160].



Hình 2.8. Ảnh SEM của các mẫu FeCo-C: a) 10%, b) 50%, c) 75% và d) 90%

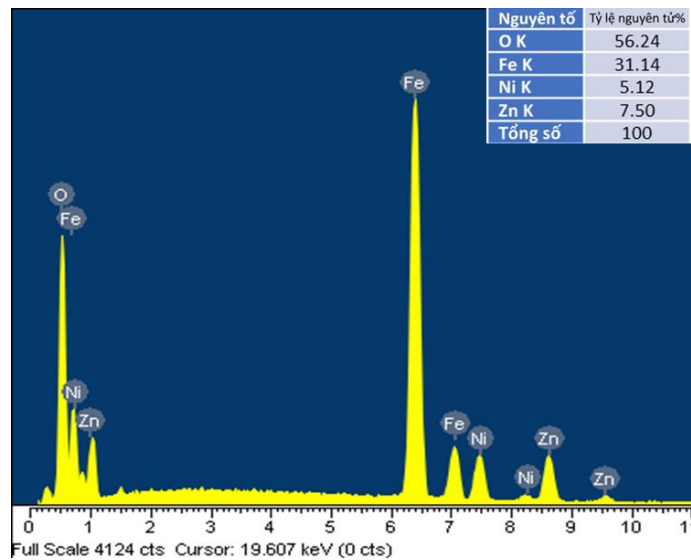
Ảnh SEM của các mẫu FeCo-C với hàm lượng graphen tăng dần cho thấy đặc điểm hình thái chung của hệ vật liệu là sự tồn tại của các cụm hạt FeCo có kích thước micro-nano phân tán tương đối đồng đều trên bề mặt các mảnh graphen dạng tấm, như trình bày trong Hình 2.8(a - d). Khi hàm lượng graphen trong composite tăng lên, mật độ các hạt FeCo quan sát được trên bề mặt graphen giảm dần, đồng thời khoảng cách trung bình giữa các cụm hạt có xu hướng tăng, phản ánh sự suy giảm tương đối của pha từ trong hệ vật liệu. Sự thay đổi này cho thấy graphen đóng vai trò như một khung nền phân tán cho các hạt FeCo. Đặc điểm hình thái này sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến các tính chất hấp thụ điện từ của vật liệu, thông qua việc điều chỉnh tương quan giữa tổn hao từ và tổn hao điện môi, từ đó tác động đến hiệu suất hấp thụ sóng điện từ của hệ composite FeCo-C. Cấu trúc hình thái này tạo điều kiện thuận lợi cho sự lan truyền của sóng điện từ cũng như sự hình thành và dẫn truyền dòng điện bên trong vật liệu. Đối với các vật liệu hấp thụ vi sóng, kiểu cấu trúc như vậy giúp tăng cường hiện tượng tán xạ nhiều lần của sóng điện từ trong khối vật liệu, từ đó làm gia tăng các cơ chế suy hao và nâng cao hiệu quả hấp thụ.

Kết quả phân tích cấu trúc hình thái bề mặt mẫu vật liệu $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ được trình bày trong Hình 2.9 [161].



Hình 2.9. Ảnh SEM của mẫu vật liệu $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

Ảnh SEM của mẫu $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ cho thấy, các hạt trong mẫu có kích thước không đồng nhất, khoảng 100 nm. Nhiều hạt nhỏ bám lên các hạt lớn, trật tự tinh thể có vẻ ngẫu nhiên, có thể do các tương tác vi mô khác nhau gây ra.

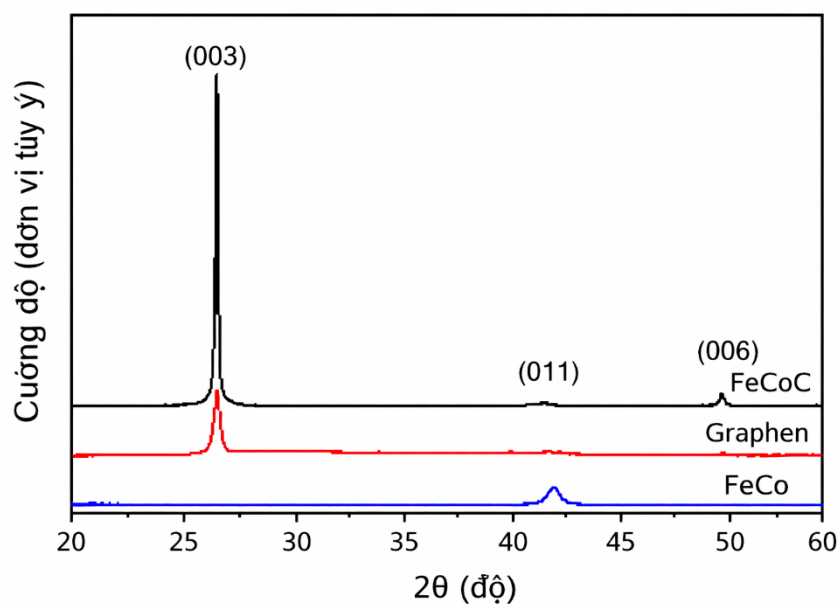


Hình 2.10. Hình ảnh phổ EDX và thành phần nguyên tố của vật liệu $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$

Phân tích thành phần nguyên tố EDX trong Hình 2.10 cho thấy các nguyên tố Ni, Zn, Fe và O có tỉ lệ gần với giá trị danh định, không có tạp chất, phù hợp với các tài liệu [100, 141].

2.2.5 Phương pháp nhiễu xạ tia X

Luận án sử dụng phương pháp nhiễu xạ tia X (X-ray Diffraction XRD) để xác định độ đơn pha (độ tinh khiết) của vật liệu, dữ liệu thu được sẽ được xuất file và xây dựng giản đồ qua phần mềm Origin và so sánh các đỉnh trong giản đồ nhiễu xạ thực nghiệm với các giá trị trong mẫu chuẩn nằm trong cơ sở dữ liệu chuẩn.

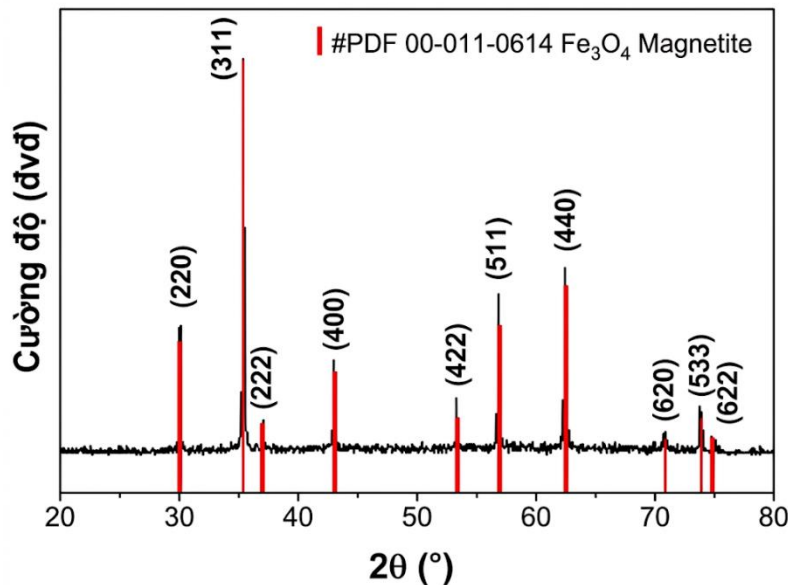


Hình 2.11 Phổ XRD của mẫu FeCo-C (75%)

Kết quả phân tích phổ nhiễu xạ tia X của các mẫu FeCo, graphene và composite FeCo-C (75%), được ghi nhận bằng thiết bị nhiễu xạ tia X Bruker D8 Advance được trang bị tại Viện Hóa học được trình bày trong Hình 2.11. Phổ XRD của mẫu FeCo-C đại diện, thu trong khoảng góc quét 2θ từ 20° đến 60° , cho thấy sự xuất hiện của các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng tại 2θ xấp xỉ $26,6^\circ$ và $54,8^\circ$, tương ứng với các mặt mạng (003) và (006) của graphene, cùng với một đỉnh nhiễu xạ cường độ mạnh tại 2θ xấp xỉ $44,8^\circ$, đặc trưng cho mặt mạng (011) của hợp kim FeCo. Kết quả phân tích XRD khẳng định composite FeCo-C được cấu thành từ hai pha chính là hợp kim sắt - coban và graphene, đồng thời không quan sát thấy các đỉnh nhiễu xạ liên quan đến pha oxit, cho thấy vật liệu không bị oxy hóa trong quá trình tổng hợp. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với quy trình chế tạo đã áp dụng, trong đó quá trình nghiền cơ học được thực hiện với thời gian nghiền ngắn, kết hợp các khoảng nghỉ đủ dài giữa các chu kỳ nghiền nhằm hạn chế sự gia tăng nhiệt độ và giảm thiểu khả năng oxy hóa của vật liệu trong môi trường không khí.

Phổ nhiễu xạ tia X của mẫu $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$ được trình bày trên Hình 2.12 cho thấy sự xuất hiện của các đỉnh nhiễu xạ rõ ràng, sắc nét và có cường độ cao, chứng tỏ các mẫu ferrite pha tạp NiZn đã kết tinh tốt. Pha Ni-Zn ferrite được đặc trưng bởi các đỉnh nhiễu xạ tiêu biểu (220), (311), (511) và (440), xuất hiện lần lượt tại các góc nhiễu xạ $30,1^\circ$, $35,6^\circ$, $57,11^\circ$ và $62,7^\circ$. Chỉ số Miller của từng đỉnh xuất hiện trong cấu trúc đã được xác định từ phổ XRD. Các đỉnh nhiễu xạ này xác nhận sự hình thành cấu trúc spinel lập phương đơn pha cho tất cả các mẫu, không quan sát thấy sự xuất hiện của pha tạp chất hoặc pha thứ cấp. Tất cả các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng đều phù hợp với cấu trúc spinel lập phương của ferrite sắt và trùng khớp tốt với thẻ chuẩn PDF 00-011-0614. Nền phổ tương đối thấp và không xuất hiện các đỉnh nhiễu xạ phụ chứng tỏ mẫu có độ tinh khiết pha cao, không hình thành các pha riêng biệt như NiO, ZnO hay các oxit sắt khác trong giới hạn phát hiện của phép đo XRD. Mặc dù vật liệu đã được pha tạp thêm Ni và Zn, phổ XRD vẫn thể hiện đặc trưng của Fe_3O_4 do bản chất cấu trúc của hệ ferrite dạng spinel. Trong cấu trúc spinel AB_2O_4 , các ion kim loại hóa trị hai và ba phân bố tại các vị trí tứ diện (A) và bát diện (B) trong mạng tinh thể oxy xếp chặt. Các ion Ni^{2+} và Zn^{2+} có bán kính ion gần với Fe^{2+} và Fe^{3+} , do đó có thể thay thế vào các vị trí mạng mà không làm thay đổi kiểu mạng tinh thể cơ bản [162]. Quá trình pha tạp trong trường

hợp này chủ yếu tạo thành dung dịch rắn trên nền cấu trúc spinel, khiến cấu trúc tinh thể vẫn không thay đổi. Ngoài ra, cần lưu ý rằng cấu trúc spinel của Fe_3O_4 , NiFe_2O_4 và ZnFe_2O_4 có sự tương đồng rất lớn về đối xứng tinh thể cũng như vị trí các mặt nhiễu xạ chính, do đó phổ XRD của các hệ ferrite pha tạp thường có dạng tương tự nhau. Sự khác biệt chủ yếu thể hiện ở sự thay đổi nhẹ về cường độ tương đối giữa các đỉnh hoặc sự dịch chuyển nhỏ của góc nhiễu xạ do biến đổi hằng số mạng khi xảy ra thay thế ion. Trong trường hợp mẫu $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$, sự thay thế của Ni^{2+} và Zn^{2+} vào mạng spinel không tạo ra pha tinh thể mới mà chỉ làm thay đổi phân bố cation trong mạng, từ đó ảnh hưởng đến tính chất từ và điện của vật liệu mà không làm thay đổi đáng kể đặc trưng nhiễu xạ.



Hình 2.12 Phổ XRD của mẫu $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

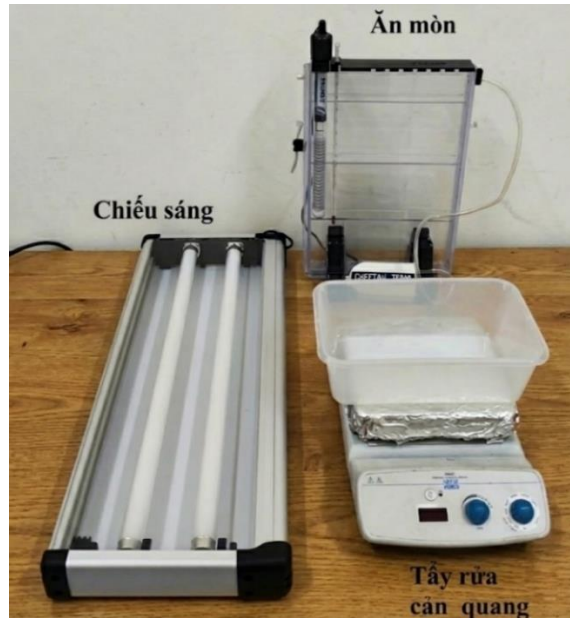
2.3 Phương pháp chế tạo vật liệu biến hóa và tổ hợp vật liệu từ - vật liệu biến hóa

2.3.1 Phương pháp quang khắc chế tạo vật liệu biến hóa

Trong nghiên cứu vật liệu MA hoạt động trong vùng tần số GHz, đặc biệt là đối với cấu trúc ba lớp gồm kim loại-điện môi-kim loại, phần tử cộng hưởng kim loại ở lớp trên cùng (lớp kim loại tuần hoàn) thường có kích thước dưới bước sóng và được bố trí tuần hoàn theo ô cơ sở. Do đó, yêu cầu công nghệ chế tạo cốt lõi là tạo được mẫu hình kim loại chính xác, đồng đều trên diện tích mẫu, đảm bảo sai lệch hình học nhỏ để hạn chế dịch chuyển tần số cộng hưởng. Quang khắc - photolithography là kỹ thuật tạo mẫu hình tiêu chuẩn trong vi chế tạo. Quy trình tổng quát của quang khắc gồm các bước: chiếu sáng sử dụng mặt nạ,

tẩy rửa cảm quang sau biến tính, ăn mòn kim loại tạo thành cấu trúc, chiếu sáng và tẩy rửa phần cảm quang còn lại để hiện hình cấu trúc [122, 163].

Hình 2.13 minh họa hệ thiết bị quang khắc đang được sử dụng tại Viện Khoa học vật liệu, gồm các cụm chức năng chính: nguồn chiếu sáng, hệ bơm-hút, bộ phận chứa dung dịch ăn mòn và bộ phận chứa dung dịch hiện hình.



Hình 2.13. Hệ thiết bị quang khắc tại Viện khoa học vật liệu

Hình 2.14 trình bày 4 bước chính của quy trình chế tạo mẫu vật liệu biến hóa sử dụng phương pháp quang khắc:

Bước 1: Chiếu sáng.

Đặt mặt nạ chứa cấu trúc tuần hoàn lên trên tấm mạch in được phủ cảm quang. Chiếu đèn ánh sáng trắng có công suất 18W cách mặt nạ khoảng 5 cm trong thời gian 5 phút (thời gian chiếu và điều kiện chiếu ảnh hưởng trực tiếp với độ sắc nét và sai số kích thước của cấu trúc). Sau khi chiếu sáng tính chất hóa học của lớp vật liệu cảm quang tại các vùng chịu tác động của ánh sáng sẽ bị biến đổi.

Bước 2: Tẩy rửa chất cảm quang.

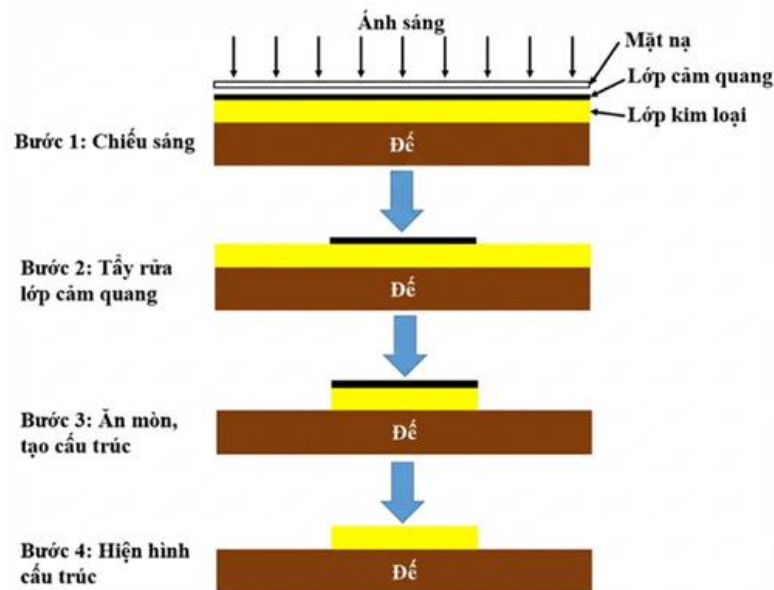
Tấm mạch in sau đó được nhúng vào dung dịch hiện hình chuyên dụng. Đối với kỹ thuật quang khắc sử dụng các tấm mạch in cho chế tạo MA vùng GHz, dung dịch sử dụng có thành phần chính gồm Sodium metasilicate pentahydrate. Dung dịch được gia nhiệt 30°C, tẩy trong thời gian khoảng 3 phút; tại đây, phần cảm quang đã biến tính của tấm mạch in sẽ bị hòa tan và rửa trôi, chỉ giữ lại phần cảm quang tại những khu vực không bị chiếu sáng.

Bước 3: Ăn mòn, tạo cấu trúc.

Sau khi hoàn tất công đoạn hiện ảnh, mẫu được đưa vào môi trường hóa chất ăn mòn dành riêng cho mạch in. Đối với các mẫu MA trong vùng GHz, thành phần chính của dung dịch ăn mòn là Sodium Persulfate với nhiệt độ làm việc của dung dịch được chọn là 40°C. Tấm vật liệu được ngâm trong dung dịch ăn mòn trong thời gian 15 phút. Do phản ứng hóa học xảy ra nên trong quá trình này, các bề mặt kim loại không còn lớp cảm quang che chắn sẽ phản ứng với hóa chất và bị loại bỏ. Quá trình này giúp định hình cấu trúc kim loại của vật liệu biến hóa theo đúng thiết kế ban đầu.

Bước 4: Hiện hình cấu trúc

Để hoàn thiện, quy trình chiếu sáng được lặp lại tương tự như Bước 1, ở đó ánh sáng được chiếu trực tiếp mà không cần sử dụng mặt nạ, nhằm biến tính phần cảm quang còn sót lại. Cuối cùng, mẫu được đưa qua dung dịch tẩy rửa để loại bỏ hoàn toàn lớp màng bảo vệ này, làm lộ rõ cấu trúc cộng hưởng đã chế tạo.



Hình 2.14. Sơ đồ minh họa phương pháp quang khắc chế tạo vật liệu biến hóa.

Các mẫu MA hoạt động trong vùng tần số GHz kích thước thường ở mức milimet, sai số chế tạo cỡ xấp xỉ 0,1 mm có thể phát sinh bởi giới hạn công nghệ quang khắc được sử dụng. Trên thực tế, quá trình chế tạo MA còn có thể có nhiều nguyên nhân khác dẫn đến chênh lệch giữa mô phỏng và đo đạc, chẳng hạn như hệ số hoặc tổn hao điện môi của tấm mạch in không hoàn toàn đúng như giả thiết. Ngoài ra, độ nhám bề mặt của vật liệu cũng là một yếu tố cần lưu

ý, ví dụ như khi phủ vật liệu từ lên MA. Nhám bề mặt nếu xuất hiện có thể sẽ gây ra sai lệch nhỏ đối với tính chất phản xạ của mẫu.

2.3.2 Phương pháp chế tạo tổ hợp vật liệu từ - vật liệu biến hóa

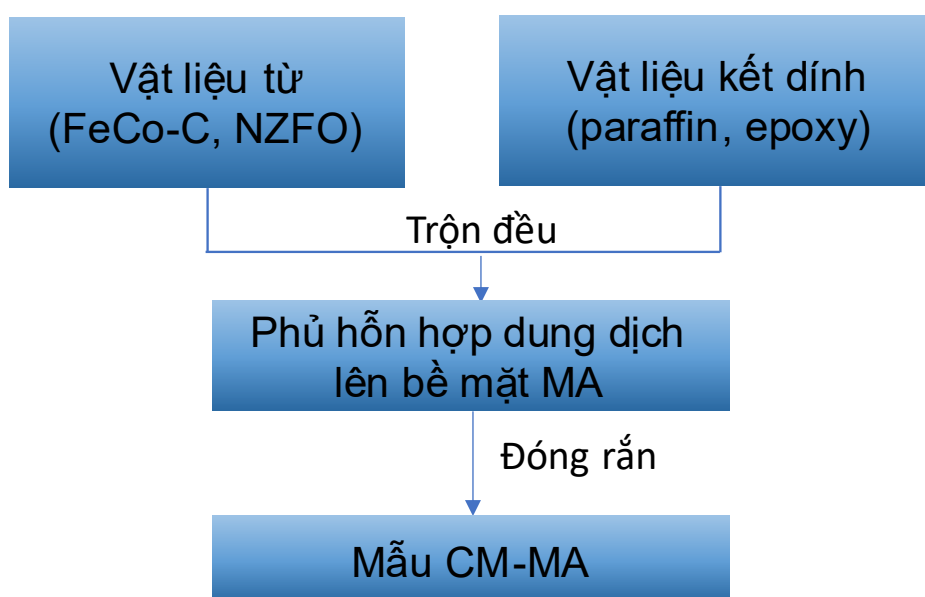
Trong xu hướng chế tạo vật liệu hấp thụ sóng điện từ tổ hợp CM-MA hiện nay, giải pháp kỹ thuật phổ biến là sử dụng các tấm vật liệu từ tính đã được thương mại hóa hoặc chế tạo sẵn ở dạng bột trộn với vật liệu kết dính thành tấm mỏng làm lớp phủ. Trước đó, cấu trúc MA sẽ được định hình và chế tạo thông qua các công nghệ gia công vi mô tiên tiến. Cụ thể, các phương pháp như quang, in trực tiếp mạch điện tử lên bề mặt điện môi, hoặc kỹ thuật in lưới (stencil)... thường được ưu tiên áp dụng nhằm đảm bảo độ chính xác của kích thước hình học [164]. Trong luận án này, MA và vật liệu từ đã được chế tạo trước tiên bằng các phương pháp như đã đề cập ở các phần trên. Tiếp theo vật liệu từ được tích hợp lên MA để hoàn thiện cấu trúc CM-MA. Ở đó, quá trình liên kết đóng vai trò then chốt; các lớp thành phần sẽ được ghép nối thành một khối đồng nhất thông qua việc sử dụng các chất kết dính chuyên dụng như epoxy hoặc paraffin... sau khi đóng rắn sẽ tạo thành dạng các lớp màng mỏng trải phẳng nhằm đảm bảo độ bám dính và tính toàn vẹn của mẫu (Hình 2.15). Cụ thể:

- Đối với các mẫu CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C trong Chương 3 của luận án, vật liệu từ FeCo-C trộn với vật liệu kết dính epoxy, theo tỷ lệ 50% theo khối lượng so với FeCo-C trong điều kiện nhiệt độ phòng, sau đó được tích hợp vào MA bằng khuôn mica với độ dày 1,5 mm, sau thời gian đóng rắn 08 giờ sẽ thu được mẫu CM-MA hoàn chỉnh.

- Đối với mẫu CM-MA sử dụng vật liệu $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ trong Chương 4 của luận án, vật liệu từ $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ được trộn với vật liệu paraffin theo tỷ lệ 40% theo khối lượng so với $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ trong điều kiện được gia nhiệt đến 70 °C, tốc độ gia nhiệt 5 °C/phút, sau khi tạo dung dịch đồng nhất sẽ được tích hợp vào MA bằng khuôn mica với độ dày 1,5mm, trong quá trình hạ nhiệt và đông đặc của hỗn hợp vật liệu, tiến hành đồng thời khuấy trộn liên tục để đảm bảo vật liệu từ được phân bố đồng đều trên bề mặt MA. Sau thời gian đông đặc, sẽ tạo màng phủ trên bề mặt cấu trúc.

Trong các nghiên cứu về hấp thụ của vật liệu từ riêng lẻ, các mẫu vật liệu được chuẩn bị để đo các thông số hằng số điện môi và từ thẩm dưới dạng vòng xuyên bằng cách phối trộn vật liệu từ với sáp paraffin. Do đó, việc lựa chọn phối trộn vật liệu từ được chế tạo với paraffin để chế tạo mẫu CM-MA thực

nghiệm. Ngoài ra, vật liệu paraffin dễ tạo khuôn, thuận lợi cho chế tạo thực nghiệm. Tuy nhiên, sau khi chế tạo thực nghiệm, nhược điểm của paraffin là có dạng sáp, khiến cho tổ hợp vật liệu có độ bền cơ học không cao. Đối với mẫu CM-MA được phối trộn với epoxy, sau khi chế tạo tổ hợp vật liệu, epoxy sẽ có dạng rắn với độ bền cơ học tốt hơn. Tuy nhiên, khả năng tạo khuôn khó và vật liệu từ khó phân tán đều hơn so với paraffin. Trong khuôn khổ nội dung nghiên cứu của luận án, các mẫu CM-MA sử dụng trong Chương 3 và Chương 4 được chế tạo bằng phối trộn với epoxy và paraffin. Ngoài ra, một số vật liệu tiềm năng khác có độ bền cơ học cao như epoxy hai thành phần, polyurethane hoặc polyaniline.

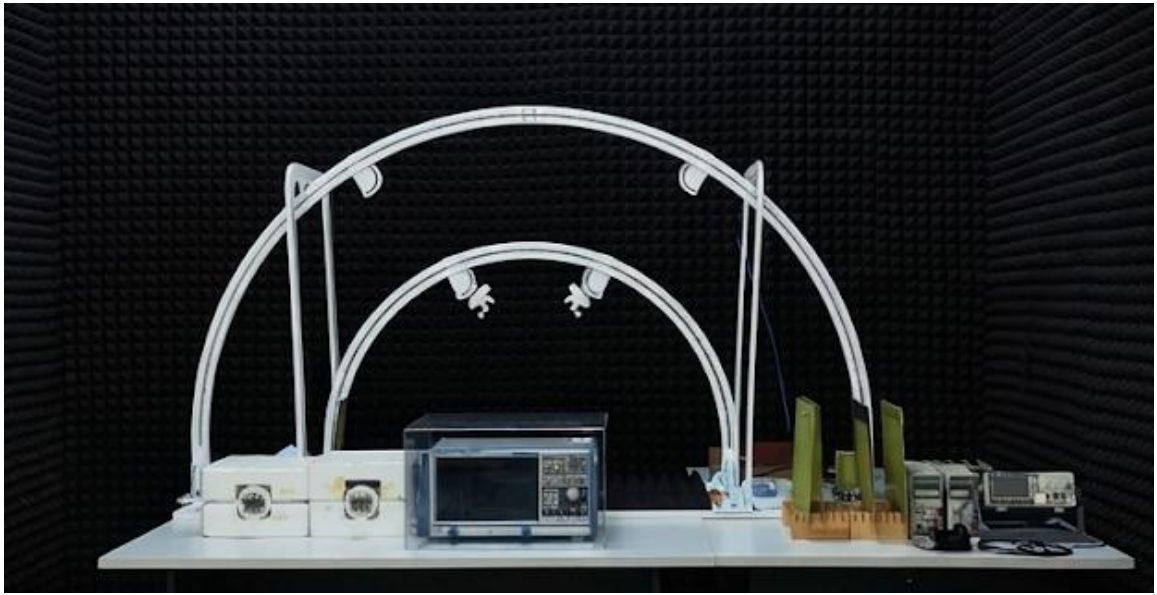


Hình 2.15. Sơ đồ chế tạo mẫu tổ hợp vật liệu CM-MA.

2.4 Phương pháp đo đặc trưng hấp thụ sóng điện từ

Đặc trưng điện từ của cấu trúc CM-MA được đánh giá thông qua các đại lượng phản xạ, truyền qua và hấp thụ theo tần số, góc tới và phân cực bằng hệ phân tích mạng véc tơ (VNA-Véc tơ Network Analyzer) Rohde & Schwarz ZNB20 hoạt động trong vùng tần số từ 1 đến 18 GHz đo không gian tự do được trang bị tại Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Hai ăng-ten thu và phát (Tx/Rx) được nối với hai cổng của VNA, phát - thu sóng phẳng tại vùng đặt mẫu. Mẫu MA được cố định trên giá giữ mẫu; S_{11} và S_{21} được đo theo tần số được trình bày trong Hình 2.16. Cấu hình và khoảng cách ăng-ten sẽ được tùy chỉnh theo thực tế đo đạc. Các sai số hệ thống phát sinh sẽ được xử lý bằng kỹ thuật hiệu chuẩn tín hiệu, đảm bảo độ tin cậy của phép đo.

Số liệu thực nghiệm thu được từ máy phân tích mạng véc tơ (VNA) được trích xuất dưới dạng các tham số tán xạ phức (S-parameters) trong ma trận tán xạ. Về mặt bản chất, các tham số này chứa đựng thông tin đầy đủ về biên độ và pha của tín hiệu khi tương tác với mẫu đo, cụ thể là hệ số phản xạ S_{11} và hệ số truyền qua S_{21} . Dựa trên nguyên lý bảo toàn năng lượng, đặc tính hấp thụ của vật liệu $A(\omega)$ sẽ được xác định thông qua các giá trị năng lượng phản xạ $R(\omega)$ và truyền qua $T(\omega)$ được tính toán từ bình phương mô-đun của các tham số S tương ứng theo công thức 1.12.



Hình 2.16. Máy phân tích mạng véc tơ VNA

Để khảo sát đặc tính phổ phản xạ của CM-MA, luận án sử dụng phương pháp đo trong không gian tự do với hệ thống hai ăng-ten thu-phát độc lập. Trong cấu hình này, một ăng-ten đóng vai trò nguồn phát sóng điện từ tới, trong khi ăng-ten còn lại làm nhiệm vụ thu tín hiệu phản xạ từ bề mặt mẫu. Trong đó, VNA cần hiệu chuẩn phản xạ bằng tấm kim loại (phản xạ bằng 1). Khoảng cách từ mẫu đến ăng-ten được bố trí sao đảm bảo $R = 2D^2/\lambda$, trong đó R là khoảng cách từ ăng-ten đến mẫu, D là đường kính của ăng-ten và λ là bước sóng hoạt động (m). Đường kính ăng-ten của thiết bị VNA ZNB20 là 0,1 m, dải tần số hoạt động của thiết bị VNA ZNB20 là từ 2 đến 18 GHz, tương ứng với bước sóng hoạt động từ 0,017 đến 0,15 m. Từ các thông số trên, khoảng cách từ ăng-ten đến mẫu cần đảm bảo trong khoảng từ 0,13 đến 1,18 m. Đối với các phép đo thực hiện trong khuôn khổ luận án, khoảng cách từ ăng-ten đến mẫu trong khoảng từ 0,5 đến 1 m để giảm thiểu ảnh hưởng của giao thoa giữa các sóng tới

và sóng phản xạ. Các phép đo được thực hiện lặp lại tối thiểu 3 lần, lấy giá trị trung bình, sai số trung bình của phép đo dưới 3%.



Hình 2.17. Sơ đồ bố trí thí nghiệm sử dụng hệ thiết bị VNA đo đặc trưng phản xạ của vật liệu biến hóa

2.5 Kết luận Chương 2

Quy trình nghiên cứu được thiết lập một cách hệ thống, bắt đầu bằng việc chế tạo hệ vật liệu từ thông qua phương pháp nghiền bi năng lượng cao kết hợp nung thiêu kết. Các tham số điện từ thực nghiệm của vật liệu từ sau khi được đo đạc và tính toán sẽ được tích hợp vào phần mềm mô phỏng trường điện từ CST để định nghĩa giá trị độ điện thẩm và từ thẩm theo tần số của vật liệu từ. Thông qua phần mềm, quá trình thiết kế và tối ưu hóa cấu trúc MA được thực hiện, đồng thời các cơ chế vật lý như phổ hấp thụ, phân bố dòng điện, từ trường bề mặt và tổn hao năng lượng của các lớp được phân tích chi tiết. Đặc tính cấu trúc vi mô và pha tinh thể của vật liệu sử dụng được kiểm chứng bằng các phương pháp đặc trưng như hiển vi điện tử quét (SEM) và nhiễu xạ tia X (XRD). Đặc trưng từ (lực kháng từ, độ từ hóa bão hòa) của các mẫu vật liệu FeCo-C và $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ chế tạo được cũng được đo đạc bằng hệ từ kế mẫu rung.

Để thực nghiệm đo đạc các thiết kế mô phỏng, luận án sử dụng phương pháp quang khắc cho việc tạo hình lớp cấu trúc MA và kỹ thuật phủ màng trực tiếp kết hợp chất kết dính đóng rắn (epoxy, paraffin) cho các lớp vật liệu từ. Cuối cùng, đặc tính hấp thụ sóng điện từ của các mẫu CM-MA chế tạo được kiểm chứng thực nghiệm trên hệ thống phân tích mạng VNA trong không gian

tự do. Kết quả đo đạc thực tế được so sánh đối chứng chặt chẽ với kết quả mô phỏng nhằm khẳng định độ tin cậy của thiết kế nghiên cứu.

CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU VẬT LIỆU HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ DẢI RỘNG DỰA TRÊN TỔ HỢP VẬT LIỆU TỪ FeCo-C VÀ VẬT LIỆU BIẾN HÓA

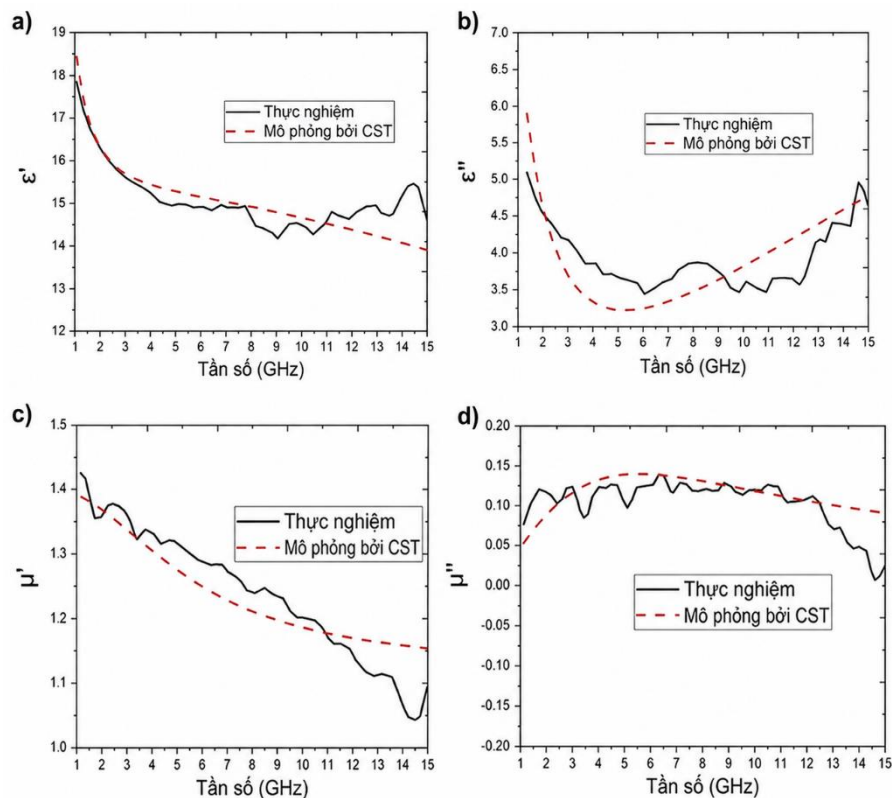
Trong các vật liệu hấp thụ sóng điện từ hiện nay, tổ hợp vật liệu từ - điện môi trên cơ sở kim loại/ferromagnet-carbon được xem là hướng nghiên cứu hiệu quả nhờ khả năng kết hợp đồng thời tổn hao từ và tổn hao điện môi. Trong đó, hợp kim FeCo được quan tâm đặc biệt do có từ độ bão hòa, độ từ thẩm cao và tần số cộng hưởng tự nhiên nằm trong vùng vi sóng, phù hợp cho hấp thụ dựa trên các cơ chế tổn hao từ. Tuy nhiên, FeCo ở dạng khối hoặc hạt đơn lẻ còn tồn tại các hạn chế như khối lượng riêng lớn, dễ oxy hóa và trở kháng chưa phù hợp với không khí, nên khó đạt đồng thời yêu cầu mỏng, nhẹ và hấp thụ dải rộng [165]. Việc kết hợp FeCo với carbon để tạo vật liệu tổ hợp FeCo-C là giải pháp phù hợp nhằm khắc phục các hạn chế này. FeCo tạo tổn hao từ mạnh và đáp ứng tốt trong vùng GHz, trong khi carbon bổ sung tổn hao điện môi, hỗ trợ phân tán pha từ, hạn chế kết tụ, nâng cao độ bền hóa học, cơ học và cho phép điều chỉnh tính chất vật liệu theo tỷ phần pha. Tuy vậy, phần lớn các hệ FeCo-C hiện nay mới chỉ cho hấp thụ tối ưu trong những dải tần tương đối hẹp, với băng thông hấp thụ hiệu quả thường khoảng 5 - 8 GHz ở một độ dày nhất định. Trong bối cảnh các hệ thống radar, thông tin và cảm biến hiện đại hoạt động đa băng, yêu cầu hấp thụ sóng điện từ trong vùng 1 - 18 GHz ngày càng trở nên cấp thiết. Vì vậy, việc mở rộng vùng hấp thụ của vật liệu FeCo-C về cả phía tần số thấp và tần số cao, đồng thời vẫn bảo đảm độ dày nhỏ và khối lượng thấp, là vấn đề có ý nghĩa thực tiễn. Gần đây, hướng tích hợp trực tiếp vật liệu tổn hao mạnh vào cấu trúc MA được xem như giải pháp hiệu quả để kết hợp ưu điểm của cả hai: “tổn hao nội tại mạnh” của FeCo-C và “đặc trưng cộng hưởng” của MA. Việc nghiên cứu mở rộng vùng tần số hấp thụ của vật liệu FeCo-C trong vùng GHz thông qua tối ưu cấu trúc vi mô, điều chỉnh tham số điện từ và đặc biệt là tích hợp chúng vào các cấu trúc MA là hết sức cần thiết, góp phần xây dựng hệ tổ hợp vật liệu FeCo-C - MA mỏng - nhẹ, hấp thụ mạnh và dải tần rộng, đáp ứng các yêu cầu ứng dụng trong dân sự và quốc phòng - an ninh hiện đại.

3.1 Vật liệu biến hóa sử dụng vật liệu từ như cấu trúc cộng hưởng

3.1.1 Thiết kế tổ hợp vật liệu sử dụng cấu trúc cộng hưởng FeCo-C

Trong mục này, luận án sử dụng thông số hằng số điện môi và độ từ thẩm

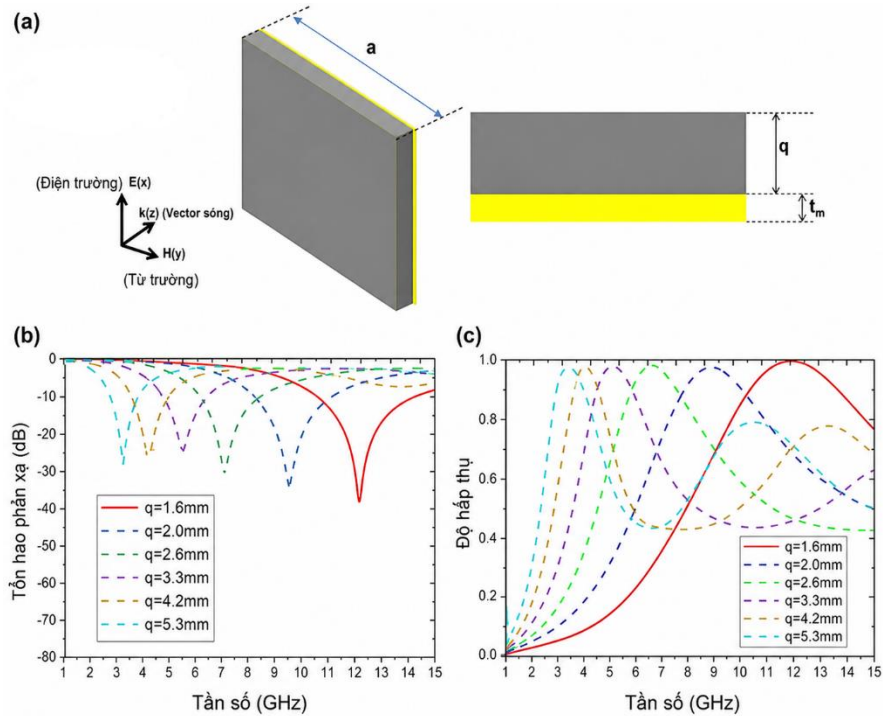
vật liệu từ FeCo-C do Xiaogang Su và cộng sự chế tạo [166] để đề xuất thiết kế cấu trúc của CM-MA. Các kết quả nghiên cứu sử dụng cấu trúc này của luận án đã được công bố trong tạp chí quốc tế uy tín [167]. Vật liệu FeCo-C được chế tạo bằng phương pháp khử trong dung dịch gồm muối 0,37g $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ và 0,96g $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ trong nước, phân tán trong ethanol bằng siêu âm, phản ứng xảy ra ở 78°C ; sau đó nhỏ 20 ml dung dịch $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ và 2,47g NaOH để khử tạo FeCo bám trên graphite; bột FeCo-C thu được bằng nam châm, rửa nhiều lần. Vật liệu FeCo-C có độ từ hóa bão hòa M_s là 163,8 emu/g và lực kháng từ H_c là 122 Oe.



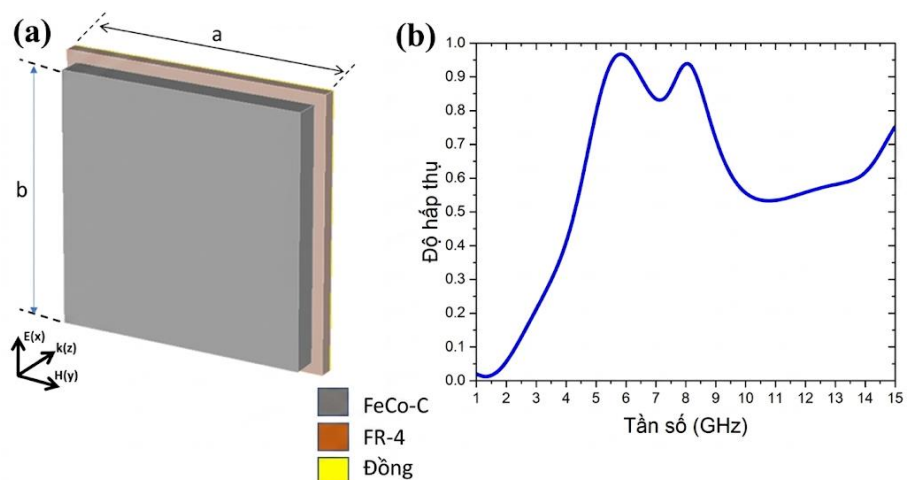
Hình 3.1. Đồ thị phụ thuộc vào tần số của: (a-b) hằng số điện môi (phần thực và phần ảo) và (c-d) độ từ thẩm (phần thực và phần ảo) của FeCo-C. Đường nét liền là kết quả thực nghiệm được công bố trong [166] và đường nét đứt là kết quả mô phỏng của luận án.

Thông qua các kết quả thực nghiệm, các giá trị hằng số điện môi (phần thực và phần ảo) và độ từ thẩm (phần thực và phần ảo) phụ thuộc vào tần số của vật liệu FeCo-C do Xiaogang Su và cộng sự chế tạo được luận án sử dụng cho mô phỏng được thể hiện trong Hình 3.1. Trong mục này, vật liệu từ được sử dụng với vai trò như cấu trúc cộng hưởng trong cấu trúc CM-MA. Ý tưởng của cấu trúc này là thay thế lớp cấu trúc cộng hưởng kim loại thông thường bằng cấu trúc cộng hưởng sử dụng vật liệu từ, nhằm vừa khai thác được cộng

hường Mie của ô cơ sở vừa kết hợp tiêu tán năng lượng thông qua tổn hao của vật liệu từ để mở rộng phổ hấp thụ. Đầu tiên, các phổ phản xạ và hấp thụ của lớp FeCo-C [Hình 3.2 (a)] trên tấm đồng có độ dày $t_m = 0,036$ mm thay đổi theo độ dày vật liệu FeCo-C (q) từ 1,6 đến 5,3mm [Hình 3.2 (b) và (c)]. Kết quả mô phỏng phù hợp với kết quả được trình bày trong tài liệu [166], lớp FeCo-C cho phổ hấp thụ đơn đỉnh và đỉnh hấp thụ có xu hướng dịch về tần số thấp khi tăng độ dày q của lớp vật liệu FeCo-C.

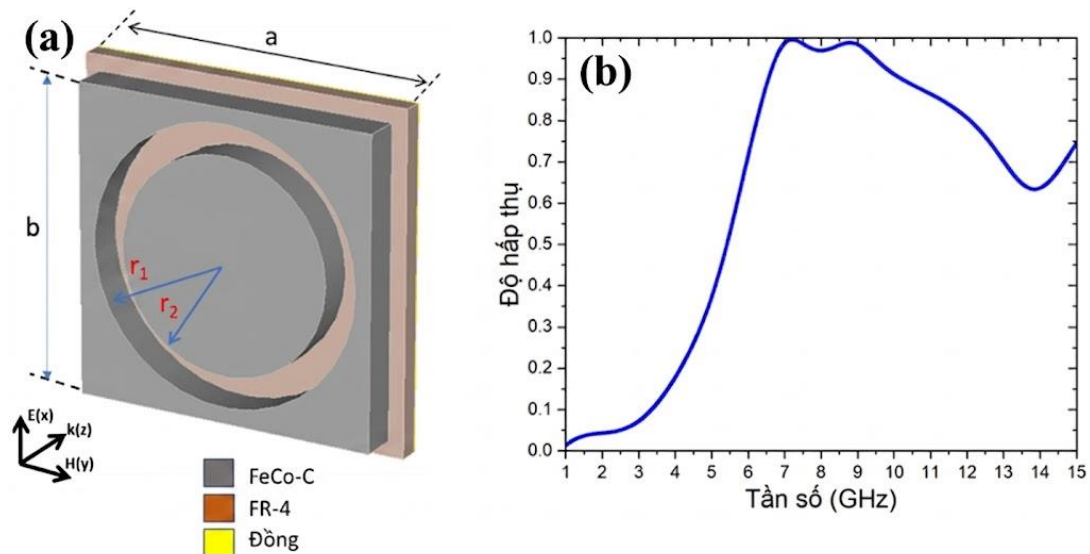


Hình 3.2. (a) Cấu trúc FeCo-C với tấm đồng, (b) kết quả mô phỏng phổ tổn hao phản xạ và (c) phổ hấp thụ thay đổi theo độ dày của tấm vật liệu FeCo-C.



Hình 3.3. (a) Cấu trúc CM-MAI với lớp trên cùng FeCo-C hình vuông, (b) phổ hấp thụ của cấu trúc.

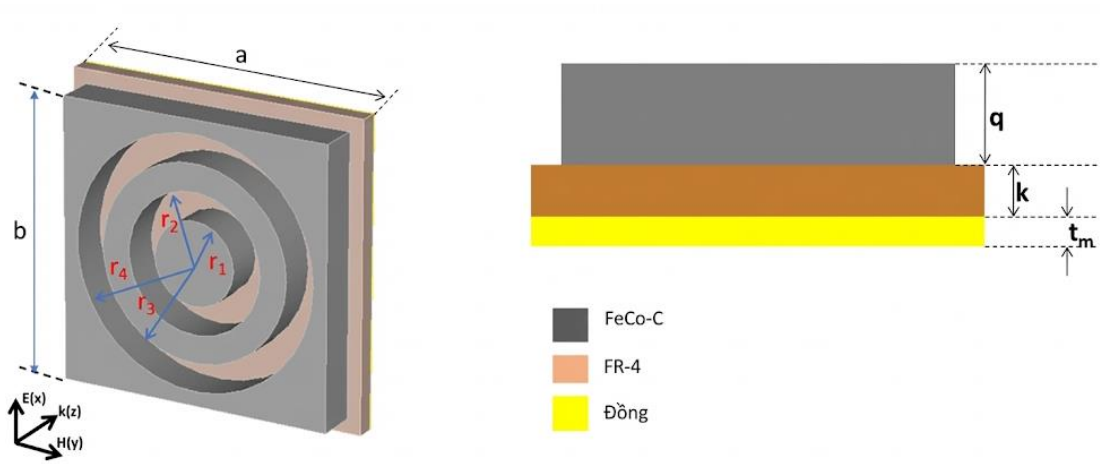
Để đưa ra được cấu trúc tối ưu cuối cùng, các quá trình tối ưu hóa cấu trúc được thực hiện thông qua ba loại cấu trúc: (1) cấu trúc hình vuông, (2) cấu trúc hình vuông có đục một lỗ vòng tròn và (3) cấu trúc hình vuông có đục hai lỗ vòng tròn. Đầu tiên, cấu trúc đơn giản CM-MA1 được đề xuất, gồm 3 lớp: tấm đồng liên tục ở phía dưới, lớp điện môi FR-4 ở giữa và lớp trên cùng là cấu trúc hình vuông FeCo-C [Hình 3.3 (a)]. Trong thiết kế này, CM-MA1 cho phổ hấp thụ hai đỉnh ở 5,80 và 8,04 GHz với độ hấp thụ 96,80% và 94% tương ứng, như được trình bày trong Hình 3.3 (b).



Hình 3.4. (a) Cấu trúc CM-MA2 với lớp trên cùng FeCo-C hình vuông có vòng đục lỗ, (b) kết quả mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc.

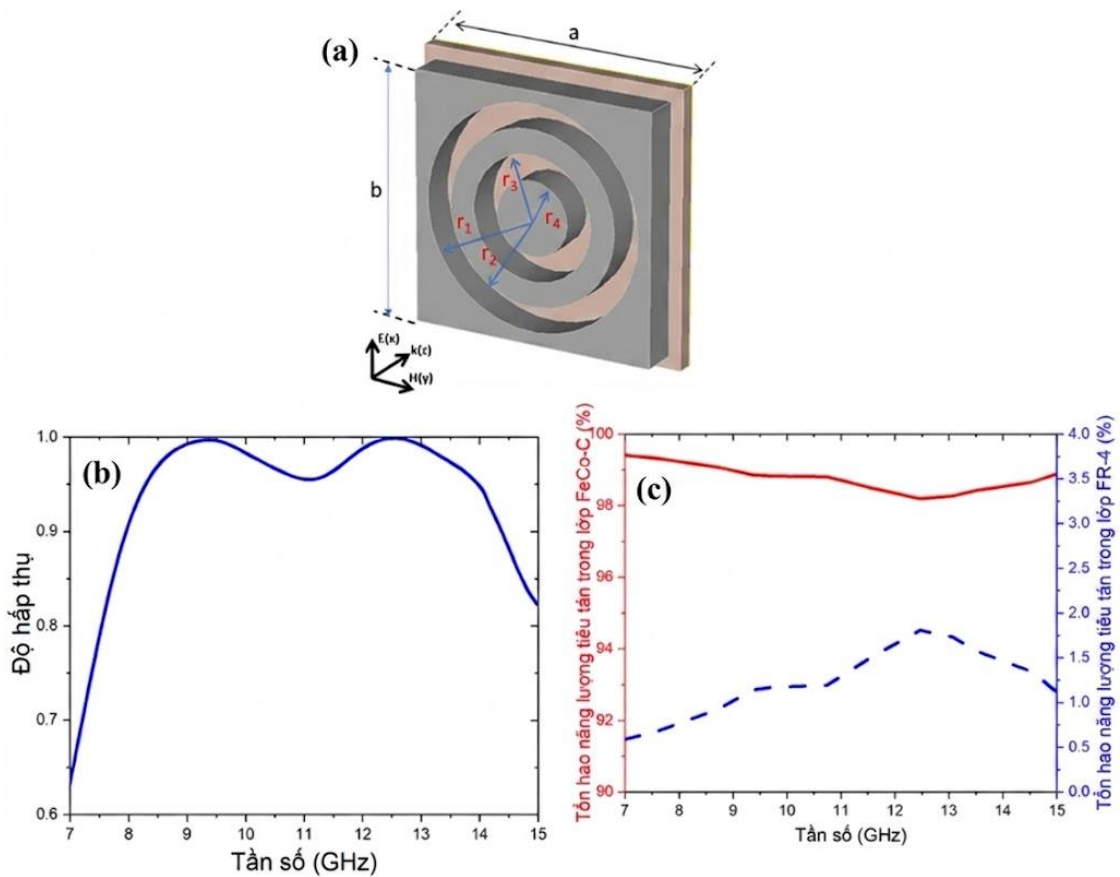
Để mở rộng dải tần hấp thụ trong khi vẫn bảo đảm độ hấp thụ trên 90%, các điều chỉnh về thiết kế đối với lớp FeCo-C trên cùng đã được thực hiện bằng cách kết hợp cấu trúc vòng đục lỗ (CM-MA2) [Hình 3.4 (a)]. Sự điều chỉnh này cho kết quả là phổ hấp thụ được mở rộng, với độ hấp thụ trên 90% trong dải tần từ 6,60 đến 10,30 GHz, kết quả được trình bày trong Hình 3.4 (b).

Cuối cùng, đục lỗ hai vòng tròn đã được bổ sung vào cấu trúc như trình bày trong Hình 3.5 để nghiên cứu ảnh hưởng đến khả năng hấp thụ. Cấu trúc cơ sở gồm 3 lớp: cấu trúc hình vuông từ vật liệu FeCo-C (CM-MA3) với hai vòng tròn đục lỗ đồng tâm ở lớp trên cùng, lớp giữa là lớp điện môi từ vật liệu FR-4 có độ điện thẩm là 4,3 và hệ số tổn hao là 0,025, lớp dưới cùng (lớp phản xạ) là tấm đồng liên tục với độ dẫn điện là $\sigma = 5,8 \times 10^7$ S/m. So với cấu trúc CM-MA1 và CM-MA2 thì cấu trúc CM-MA3 cho phổ hấp thụ dải rộng hơn, tối ưu hơn.



Hình 3.5. Cấu trúc tối ưu CM-MA3 và thông số hình học $a = 22$, $b = 20$, $r_1 = 9$, $r_2 = 7$, $r_3 = 5$, $r_4 = 3$, $q = 3$, $k = 0,5$, $t_m = 0,036$ mm.

3.1.2 Đánh giá tính chất hấp thụ của tổ hợp vật liệu sử dụng cấu trúc cộng hưởng FeCo-C

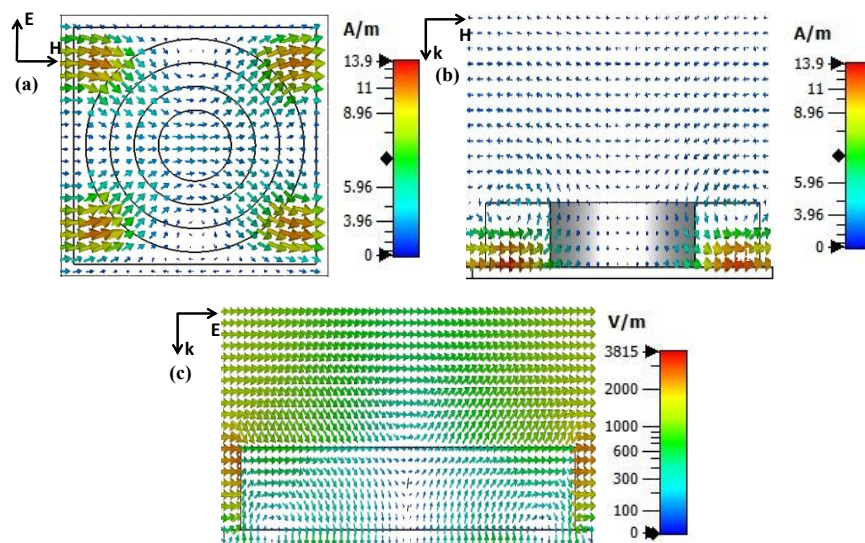


Hình 3.6. (a) Cấu trúc CM-MA đục lỗ hai vòng tròn, (b) Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA và (c) mức năng lượng bị tiêu tán trong lớp FeCo-C và FR-4.

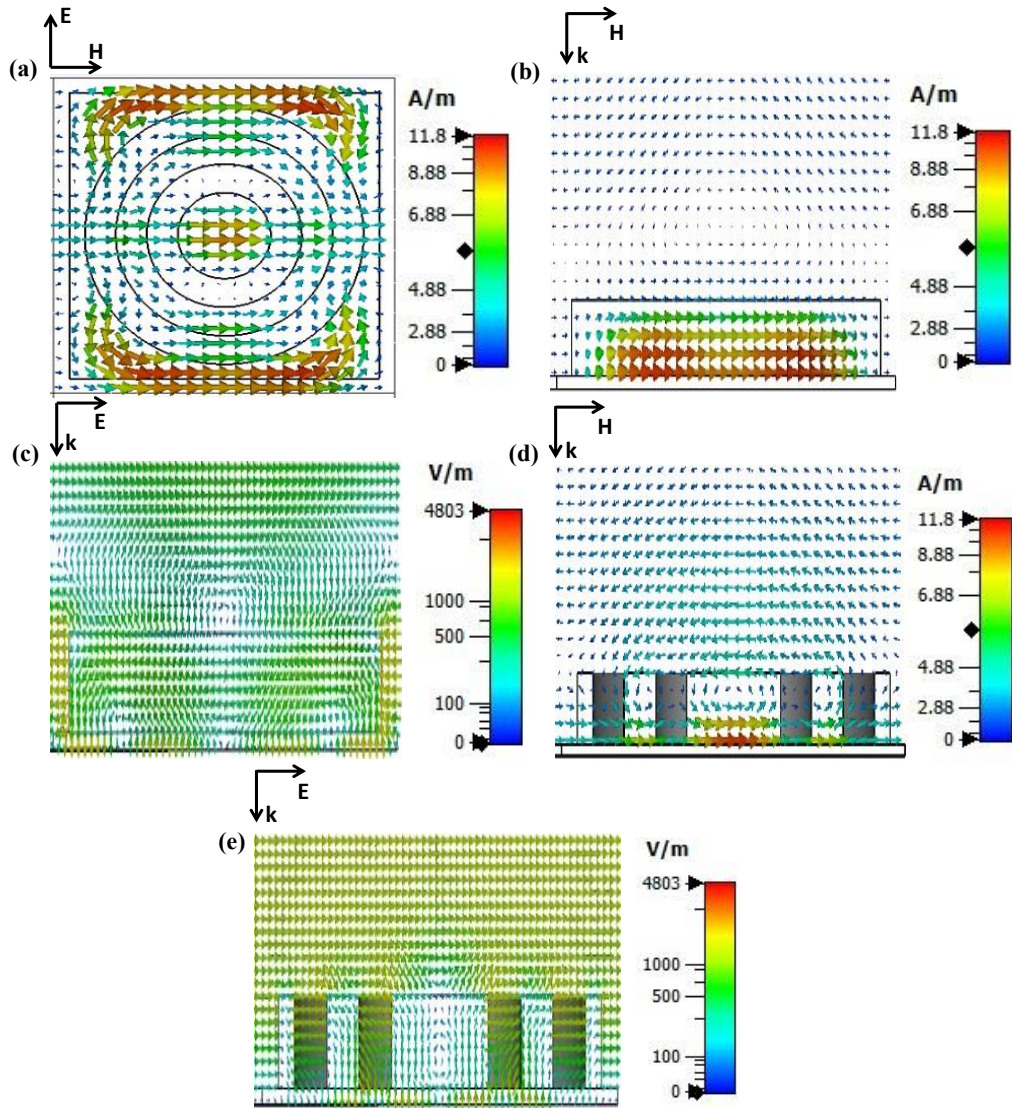
Cấu trúc CM-MA do luận án đề xuất có khả năng hấp thụ dải rộng với độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số từ 7,90 đến 14,40 GHz, có hai đỉnh với sự hấp thụ gần bằng 100% ở lần lượt là 9,4 và 12,5 GHz, như được trình bày trong Hình 3.6 (b). Phổ hấp thụ của CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C được phát hiện rộng hơn đáng kể so với phổ của FeCo-C nền đồng, cho thấy sự cải thiện trong khả năng hấp thụ khi tích hợp vật liệu FeCo-C vào cấu trúc MA. Để làm rõ vai trò của các lớp khác nhau trong cấu trúc CM-MA, các phần năng lượng bị tiêu tán trong lớp FeCo-C và FR-4 được trình bày trong Hình 3.6 (c). Kết quả cho thấy hơn 98% năng lượng tiêu tán xảy ra trong lớp FeCo-C, trong khi tổn hao trong lớp FR-4 chỉ giới hạn ở mức 2%. Kết quả tiêu tán năng lượng chứng minh rằng lớp FeCo-C trong CM-MA là yếu tố chính góp phần vào khả năng hấp thụ dải tần rộng.

Như quan sát thấy trên Hình 3.6, các đỉnh hấp thụ mạnh nhất tại 9,40 và 12,50 GHz. Do đó, để làm rõ cơ chế hấp thụ của cấu trúc, véc tơ từ trường và điện trường phân bố trên CM-MA tại các tần số này được nghiên cứu để làm rõ, kết quả được trình bày trên Hình 3.7 và Hình 3.8.

Quan sát Hình 3.7 có thể thấy từ trường bị kích thích mạnh ở các góc của cấu trúc CM-MA. Cụ thể, các lưỡng cực từ được nhìn thấy dọc theo hướng của trường H tới với các nửa xoáy điện ở cùng vị trí. Các hiện tượng quan sát được cho thấy chế độ hấp thụ ở 9,40 GHz là do cộng hưởng Mie lưỡng cực từ, gây ra bởi cộng hưởng điện môi [168, 169].

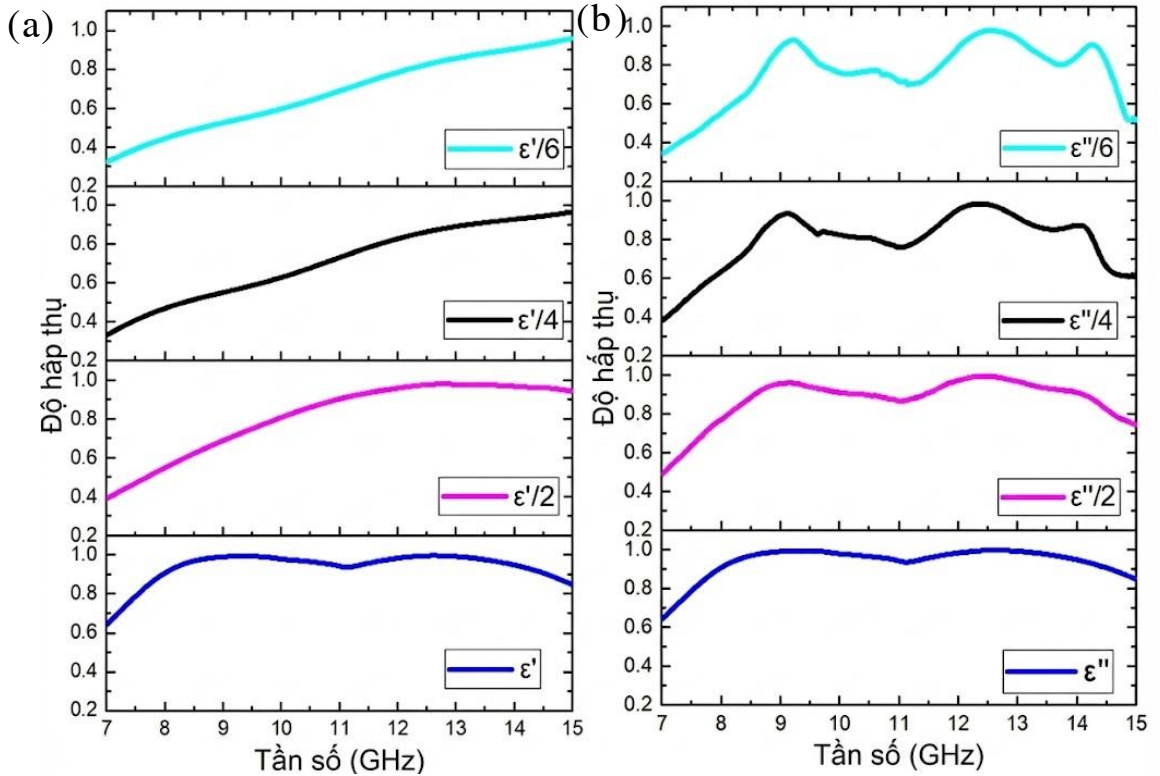


Hình 3.7. Mô phỏng véc-tơ từ trường và điện trường phân bố trên CM-MA: (a) Từ trường trong mặt phẳng (E, H), (b) từ trường trong mặt phẳng (H, k) và (c) điện trường trong mặt phẳng (E, k) tại tần số 9,40 GHz.



Hình 3.8. Mô phỏng véc-tơ từ trường và điện trường phân bố trên CM-MA: (a) Từ trường trong mặt phẳng (E, H), (b) và (d) từ trường trong mặt phẳng (H, k), (c) và (e) điện trường trong mặt phẳng (E, k) tại tần số 12,50 GHz.

Cũng tương tự, tại tần số 12,50 GHz, CM-MA cũng thể hiện cộng hưởng Mie lưỡng cực từ tạo ra bởi các lưỡng cực từ mạnh dọc theo hướng H và các nửa xoáy điện trong mặt phẳng (E, k). Tuy nhiên, vị trí của các lưỡng cực từ ở tần số 12,50 GHz khác với vị trí ở tần số 9,40 GHz. Như thể hiện trong Hình 3.7, các lưỡng cực từ cảm ứng được phân bố ở cả tâm và các cạnh ngoài của cấu trúc CM-MA và song song với hướng H .

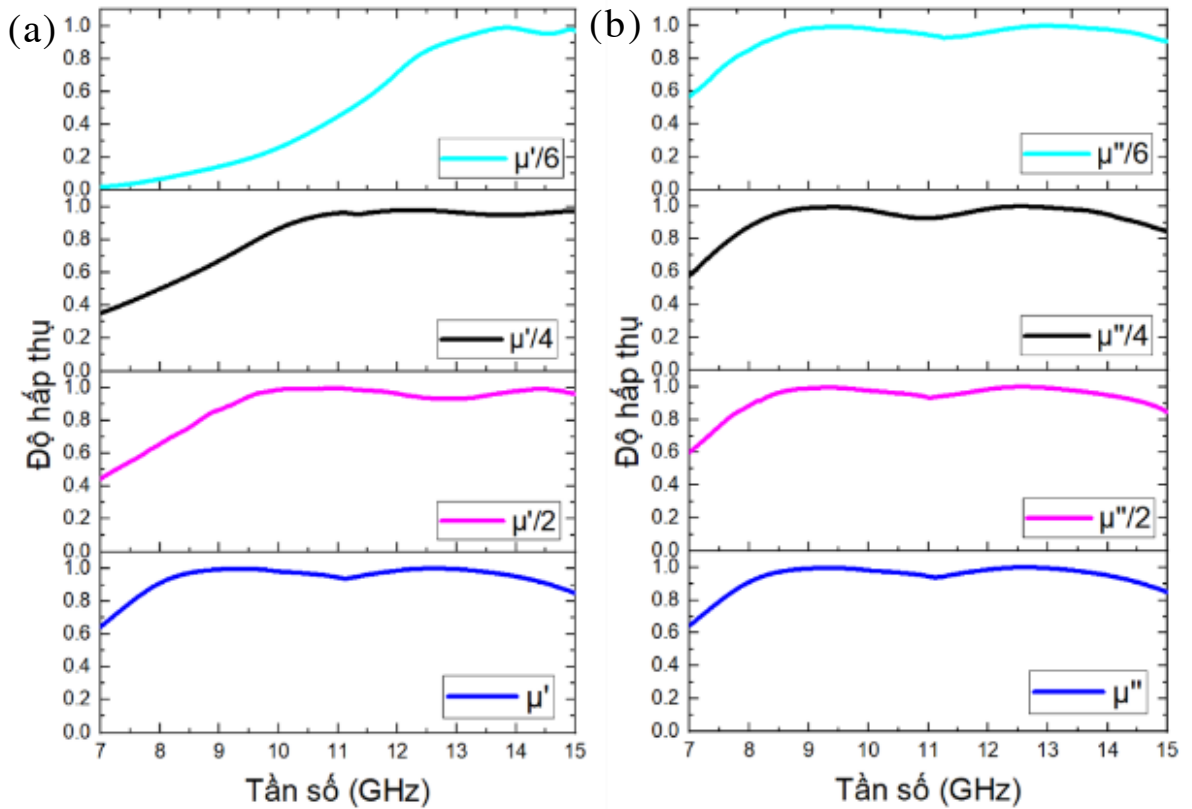


Hình 3.9. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi hằng số điện môi của vật liệu FeCo-C được thay đổi giá trị của (a) phần thực và (b) phần ảo.

Để nghiên cứu vai trò phần thực và phần ảo của hằng số điện môi phức (ϵ' và ϵ'') trong cơ chế hấp thụ, các phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi giảm giá trị ϵ' và ϵ'' xuống còn 1/2, 1/4 và 1/6 giá trị ban đầu đã được mô phỏng, kết quả được thể hiện trong Hình 3.9. Với các giá trị ϵ' và ϵ'' ban đầu trong Hình 3.1, phổ hấp thụ cho thấy dải tần rộng 7,9-14,4 GHz với độ hấp thụ trên 90%. Khi giá trị ϵ' giảm, độ hấp thụ của cấu trúc cũng giảm và đỉnh hấp thụ dịch chuyển sang vùng tần số cao hơn [Hình 3.9(a)]. Ngoài ra, việc giảm giá trị ϵ'' dẫn đến sự thay đổi của phổ hấp thụ từ hấp thụ dải rộng sang hấp thụ đa băng [Hình 3.9(b)]. Những kết quả này cho thấy phần thực của hằng số điện môi FeCo-C chủ yếu xác định dải tần số của phổ hấp thụ, trong khi phần ảo góp phần tạo dải tần hấp thụ rộng.

Vai trò của phần thực và phần ảo của độ từ thẩm phức (μ' và μ'') trên cơ chế hấp thụ cũng được nghiên cứu. Phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA theo các giá trị của μ' và μ'' đã được mô phỏng, như thể hiện trong Hình 3.10. Tương tự như phần thực của hằng số điện môi, việc giảm giá trị μ' sẽ gây ra sự dịch chuyển của phổ hấp thụ về phía dải tần số cao hơn. Tuy nhiên, kết quả trong Hình 3.10(b) chỉ ra rằng việc giảm giá trị phần ảo μ'' không làm thay đổi đáng

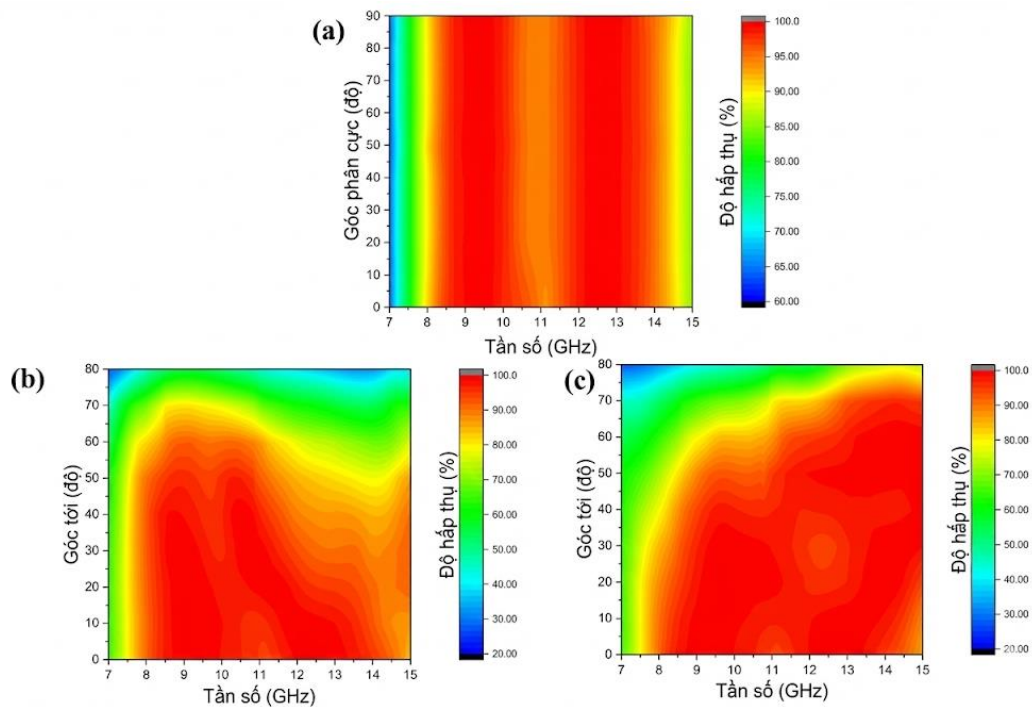
kể phổ hấp thụ của CM-MA. Sự hấp thụ gần như không thay đổi, theo phần ảo μ'' , là do giá trị nhỏ của độ từ thẩm so với độ điện thẩm. Do đó, có thể kết luận rằng tổn hao trong CM-MA đã đề xuất bị chi phối bởi phần ảo ε'' của FeCo-C, tổn hao từ vẫn đóng góp trong trở kháng và cộng hưởng của tổ hợp vật liệu, tuy nhiên, trong cấu trúc này, hấp thụ dải rộng bị chi phối mạnh hơn bởi tổn hao điện môi của FeCo-C.



Hình 3.10. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi độ từ thẩm của vật liệu FeCo-C được thay đổi giá trị của (a) phần thực và (b) phần ảo.

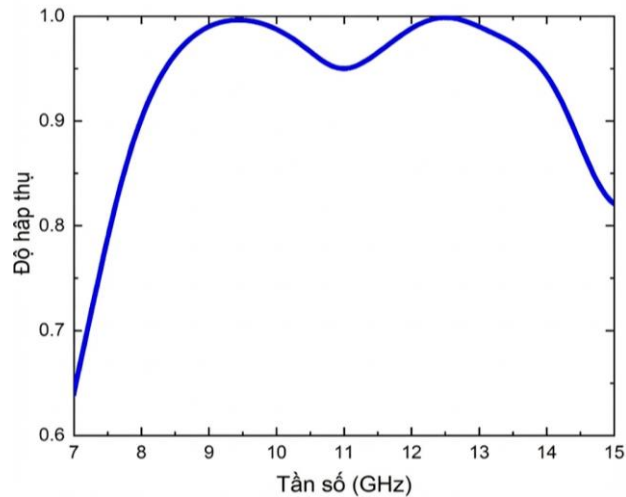
Các nghiên cứu về đánh giá hiệu suất hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi thay đổi góc tới và góc phân cực của sóng điện từ tới cũng được tiến hành (Hình 3.11). Cấu trúc đề xuất có tính đối xứng cao, phổ hấp thụ gần như không bị ảnh hưởng khi thay đổi góc phân cực [Hình 3.11(a)]. Tuy nhiên, độ hấp thụ của CM-MA bị ảnh hưởng bởi góc tới, cụ thể là giảm cả cường độ hấp thụ và độ rộng dải tần [Hình 3.11 (b) và (c)]. Tuy nhiên, cấu trúc đề xuất vẫn cho thấy đặc tính hấp thụ tốt trong cả phân cực điện trường ngang (TE) và phân cực từ trường ngang (TM) khi các góc tới lớn. Cụ thể, đối với chế độ phân cực TE, độ hấp thụ của MA giảm khi góc tới tăng từ 0 đến 55° nhưng vẫn cao hơn 90% trong dải tần từ 8 đến 11,1 GHz, như được trình bày trong Hình 3.11(b). Tương tự, ở chế độ TM, độ hấp thụ được duy trì ở mức cao hơn 90% trong vùng tần

số 9,5 đến 14,6 GHz đối với các góc tới lên tới 55° [Hình 3.11(c)]. Điều này có thể giải thích bằng cách xem xét hướng của từ trường tới. Ở chế độ TM, hướng từ trường vẫn cố định dưới sự thay đổi của góc tới, trong khi ở chế độ TE, hướng không còn song song với mặt phẳng mẫu và lệch khỏi nó. Cơ chế cộng hưởng của cấu trúc CM-MA dựa trên cộng hưởng Mie lưỡng cực từ, cho thấy cộng hưởng từ của cấu trúc CM-MA bị suy yếu khi góc tới tăng. Do đó, việc duy trì sự hấp thụ ở chế độ TE không hiệu quả như ở chế độ TM. Những kết quả này cho thấy hiệu suất cao của CM-MA được đề xuất, không nhạy với sự phân cực của sóng điện từ tới và có độ ổn định cao khi góc tới thay đổi.

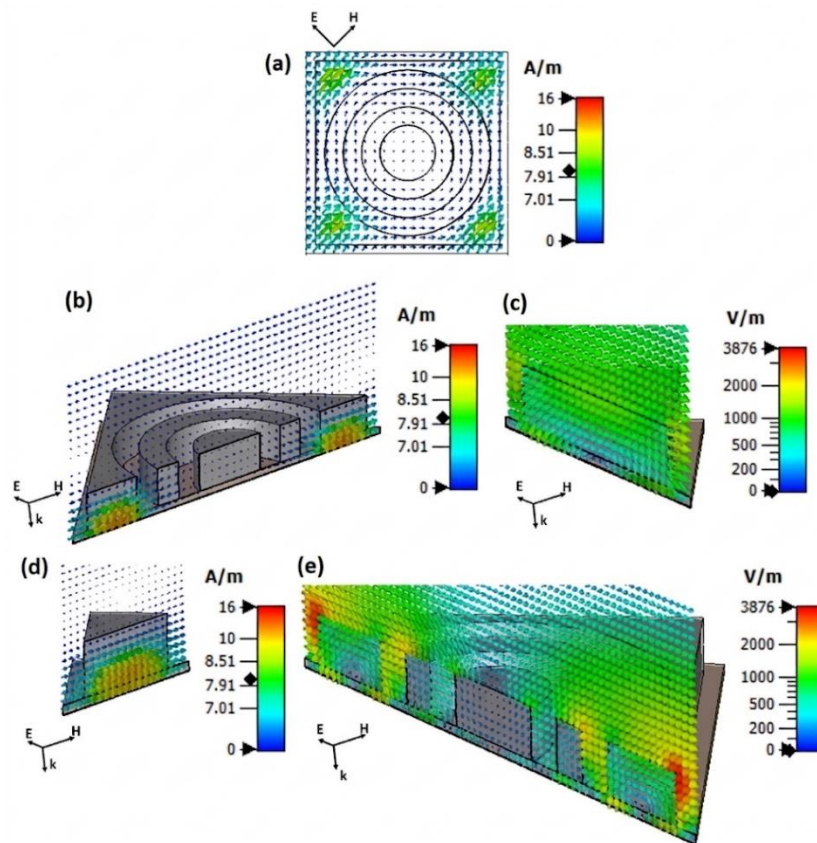


Hình 3.11. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc (a) dưới các góc phân cực khác nhau và các góc tới khác nhau của chế độ phân cực (b) TE và (c) TM.

Để làm rõ hơn về việc ổn định của cấu trúc CM-MA với góc phân cực do tính đối xứng cao, luận án đã tiến hành mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi góc phân cực của sóng tới là 45° . Kết quả được trình bày trong Hình 3.12.



Hình 3.12. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi góc phân cực của sóng tới là 45° .

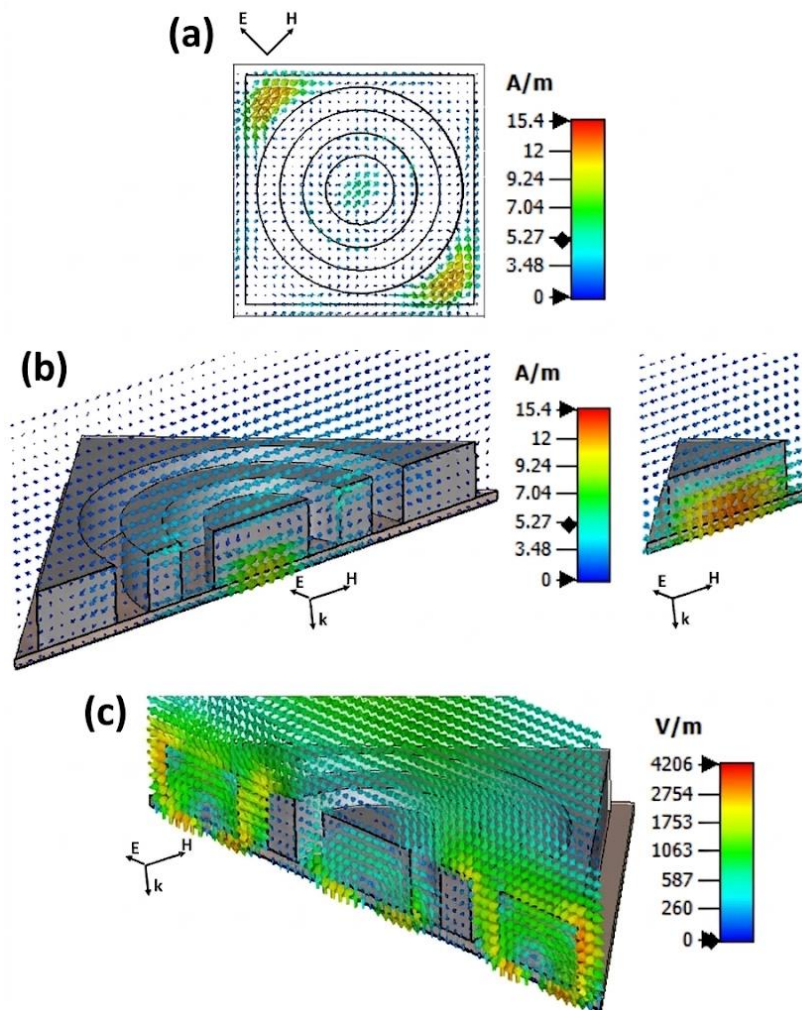


Hình 3.13. Mô phỏng véc tơ điện trường và từ trường phân bố trên cấu trúc CM-MA tại tần số 9,4 GHz khi góc phân cực của sóng tới là 45° : (a) Từ trường trong mặt phẳng (E, H), Từ trường trong mặt phẳng (H, k) phân bố tại vị trí (b) tâm và (d) mép ngoài; (c) và (e) điện trường tương ứng trong mặt phẳng (E, k).

Có thể thấy rằng, phổ hấp thụ của cấu trúc gần như không thay đổi khi các trường E và H quay 45° với hai đỉnh hấp thụ gần đạt 100% tại 9,4 và 12,5

GHz. Để làm rõ hơn cơ chế của hấp thụ, định hướng véc tơ điện trường và từ trường trên cấu trúc khi góc phân cực sóng tới là 45° cũng được phân tích và làm rõ tại tần số 9,4 và 12,5 GHz. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 3.13 và Hình 3.14.

Ở cả hai tần số hấp thụ, quan sát thấy lưỡng cực từ theo hướng H cũng như các nửa xoáy điện trong mặt phẳng (E, k), cho thấy các cộng hưởng Mie dạng lưỡng cực từ vẫn tồn tại tại các tần số này. Tuy nhiên, do trường E và H tới đã quay 45° , phân bố trường trên MA cũng quay 45° so với phân bố ban đầu. Ngoài sự quay này, mô hình phân bố trường vẫn được giữ nguyên.



Hình 3.14. Mô phỏng véc tơ điện trường và từ trường phân bố trên cấu trúc CM-MA tại tần số 12,5 GHz khi góc phân cực của sóng tới là 45° : (a) Véc tơ từ trong mặt phẳng (E, H), (b) Véc tơ từ trường trong mặt phẳng (H, k) phân bố tại vị trí (bên trái) tâm và (bên phải) mép ngoài; (c) Véc tơ điện trường trong mặt phẳng (E, k).

Cuối cùng, các đặc tính hấp thụ của MA được so sánh với các đặc tính

hấp thụ của vật liệu khác đã được trình bày trong các báo cáo trước đó (Bảng 3.1), chẳng hạn như vật liệu tổ hợp FeCo-C thông thường [166], FeCo/ZnO [170], sợi nano Fe₃C/C [171] và ống carbon nanotubes/nickel ferrite (MWCNTs/NiFe₂O₄) [172]. Băng thông hấp thụ hiệu quả (Effective Absorption Bandwidth - EAB) của độ hấp thụ được tính như sau:

$$EAB = f_{high} - f_{low} \quad (3.1)$$

trong đó, f_{high} và f_{low} là tần số cao nhất và thấp nhất mà độ hấp thụ lớn hơn 90% tương ứng. Kết quả cho thấy cấu trúc do luận án được đề xuất thể hiện băng thông hấp thụ được tăng cường, điều này có thể không chỉ là do các đặc tính nội tại của vật liệu FeCo-C mà còn do khai thác cấu trúc MA.

Bảng 3.1. So sánh băng thông hấp thụ hiệu quả của cấu trúc CM-MA sử dụng cấu trúc cộng hưởng FeCo-C so với vật liệu của các nghiên cứu khác

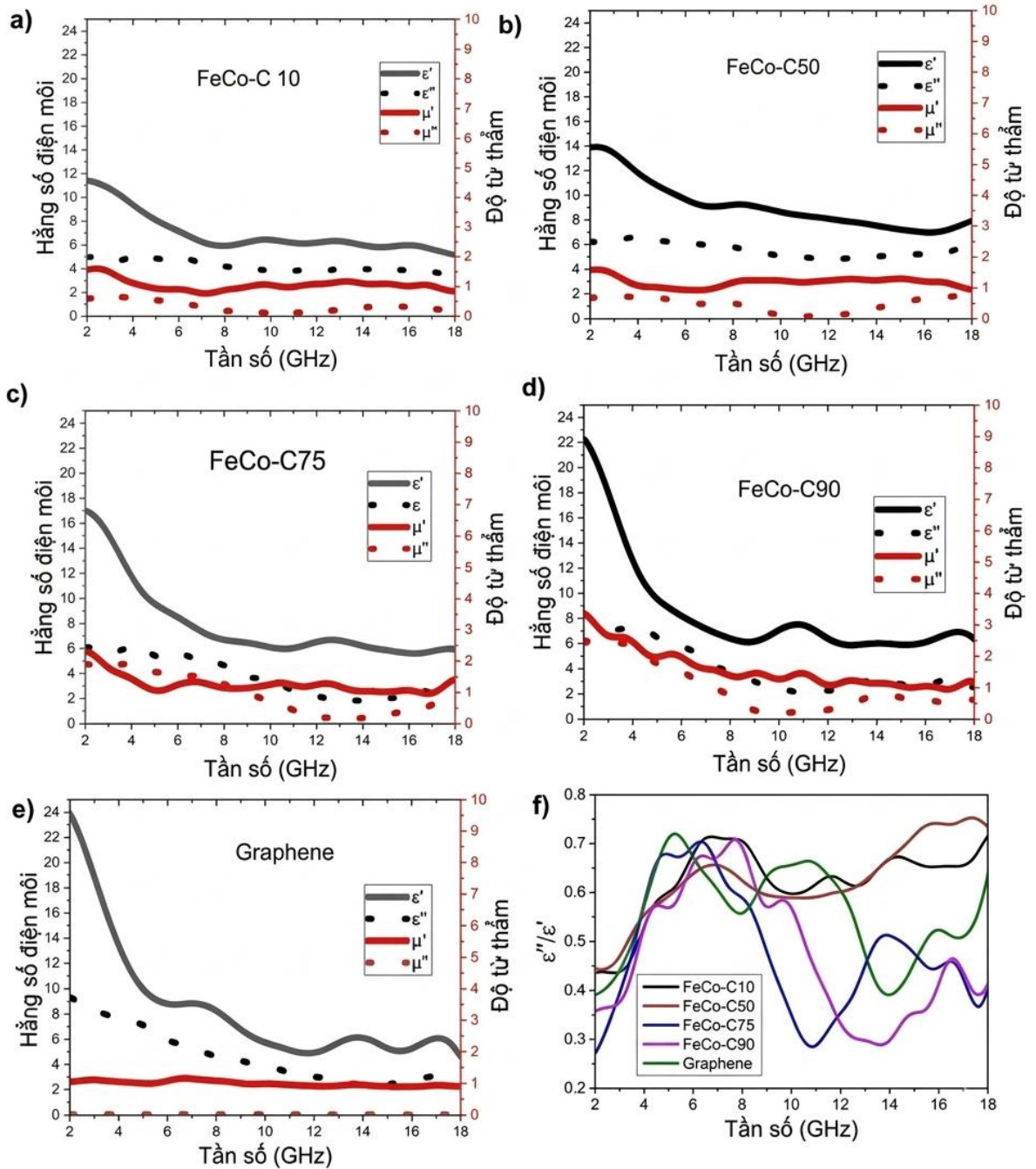
Vật liệu	EAB (GHz)	Tài liệu tham khảo
FeCo/ZnO	5,1	[170]
Fe ₃ C/C	4,5	[171]
MWCNTs/NiFe ₂ O ₄	3,8	[172]
Tấm FeCo-C	4,3	[166]
MA sử dụng FeCo-C	6,5	Nghiên cứu này

3.2 Vật liệu biến hóa sử dụng vật liệu từ như tấm phủ

3.2.1 Thiết kế tổ hợp vật liệu sử dụng tấm phủ FeCo-C

MA thông thường có phổ hấp thụ đơn đỉnh hoặc đa đỉnh, phổ hấp thụ hẹp do bản chất cộng hưởng LC của các cấu trúc kim loại. Bên cạnh đó, vật liệu từ mềm FeCo-C thường có tổn hao dải rộng, tuy nhiên khó thu được độ hấp thụ cao. Do đó, để cải thiện và mở rộng phổ hấp thụ trên cơ sở cộng hưởng của cấu trúc MA và tổn hao của vật liệu FeCo-C, luận án đã tiến hành nghiên cứu tích hợp vật liệu FeCo-C vào cấu trúc MA để cải thiện và mở rộng vùng tần số hấp thụ của vật liệu. Các kết quả nghiên cứu sử dụng cấu trúc này của luận án đã được công bố trong tạp chí quốc tế Journal of Applied Physics [160].

Đầu tiên, vật liệu từ (FeCo-C) được chế tạo bằng phương pháp nghiền bi hành tinh năng lượng cao với tỷ lệ mol Fe với Co là 1:1 và tỷ lệ khối lượng của hợp kim FeCo với C lần lượt là 9:1; 1:3; 1:1 và 1:9 tương ứng với FeCo-C(10%); FeCo-C(50%); FeCo-C(75%) và FeCo-C (90%). Ngoài ra, việc sử dụng graphene làm chất thay thế cho lớp vật liệu FeCo-C để so sánh phổ hấp thụ của cấu trúc MA cũng được nghiên cứu thực hiện.



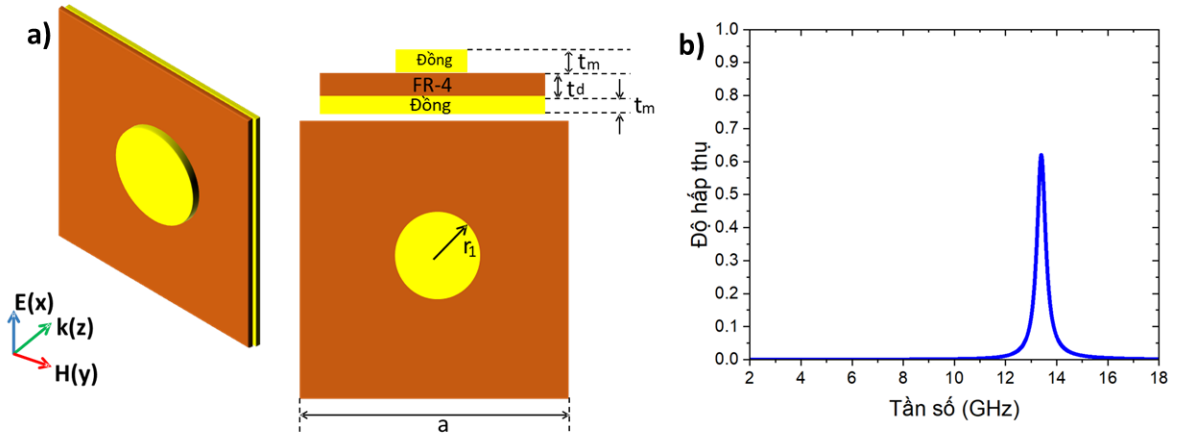
Hình 3.15. Đồ thị thay đổi theo tần số của hằng số điện môi (phần thực và phần ảo) và độ từ thẩm (phần thực và phần ảo) của vật liệu (a) FeCo-C (10%), (b) FeCo-C (50%) (c) FeCo-C (75%), (d) FeCo-C (90%) và (e) graphene, tương ứng; (f) Biểu đồ hệ số tổn hao điện môi của các mẫu có tỷ lệ khối lượng C khác nhau.

Đường cong phụ thuộc tần số của phần thực và phần ảo của độ từ thẩm và hằng số điện môi phức của FeCo-C được đo bằng cách sử dụng máy phân tích mạng vector Keysight PNA-X N5242A [Hình 3.15 (a-e)]. Trong thí nghiệm, hỗn hợp đồng nhất được chế tạo bằng cách trộn vật liệu FeCo-C và sáp

paraffin với tỷ lệ trong hỗn hợp chiếm 30% tổng trọng lượng. Hợp chất cuối cùng có độ dày 2,5 mm được ép thành dạng hình xuyên có đường kính trong 3,04 mm và đường kính ngoài 7,0 mm. Mẫu hình xuyên được đặt trong ống dẫn sóng đồng trục tương thích với máy phân tích. Sử dụng phương pháp ống dẫn sóng, máy phân tích đã đo tham số tán xạ S_{11} (hệ số phản xạ) và S_{12} (hệ số truyền) trên toàn bộ dải tần mong muốn. Phương pháp Nicholson-Ross-Weir (NRW) được sử dụng để tính độ điện môi phức (ϵ) và độ từ thẩm (μ) từ dữ liệu tán xạ, trích xuất các thành phần thực và ảo của chúng. Kết quả cho thấy, các giá trị của hằng số điện môi (phần thực và ảo) lớn hơn đáng kể so với độ từ thẩm (phần thực và ảo), điều này cho thấy vai trò lớn của tổn hao điện môi trong FeCo-C. Biểu đồ hệ số tổn hao điện môi ($\tan\delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$) cho thấy các mẫu FeCo-C (10%) và FeCo-C (50%) thể hiện tổn hao điện môi khá ổn định trên hầu hết toàn bộ dải tần số. Ngược lại, các mẫu FeCo-C (75%) và FeCo-C (90%) thể hiện tổn hao điện môi thấp hơn. Hơn nữa, tổn hao điện môi không đồng đều trên toàn dải tần số, với tổn hao cao hơn được quan sát thấy ở tần số thấp và tổn hao thấp hơn ở dải tần số cao. Các giá trị phức của độ từ thẩm và hằng số điện môi FeCo-C theo các tỷ lệ khác nhau được sử dụng trong mô phỏng CST. Đối với mô phỏng trong vùng tần số từ 2 đến 18 GHz, các điều kiện biên tuần hoàn dọc theo trục x và y được thiết lập. Độ hấp thụ của cấu trúc CM-MA được xác định thông qua công thức 1.12.

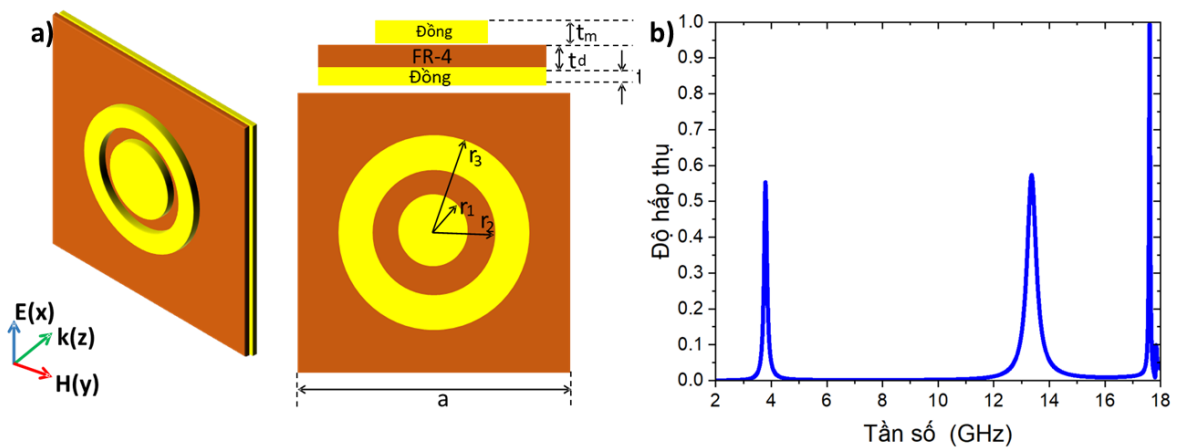
Nhằm tạo ra cấu trúc MA có phổ hấp thụ đa đỉnh với mục tiêu kết hợp với tổn hao của vật liệu FeCo-C để tăng cường độ hấp thụ và tạo phổ hấp thụ trong dải tần số rộng, luận án đã tiến hành thiết kế và tối ưu cấu trúc MA nền và được thực hiện thông qua ba loại cấu trúc: (1) cấu trúc đĩa tròn, (2) cấu trúc bao gồm đĩa tròn và vòng tròn ngoài, (3) cấu trúc bao gồm đĩa tròn, vòng tròn ngoài và các hình chữ L tại các góc của cấu trúc. Cấu trúc hình học dạng đĩa tròn và vòng tròn của MA được lựa chọn mô phỏng nhằm đảm bảo cấu trúc có tính đối xứng cao và giảm độ nhạy góc phân cực. Quá trình tối ưu được thực hiện để thu được cộng hưởng trong dải tần số từ 2 - 18 GHz, kết hợp tổn hao của vật liệu từ để tăng trở kháng của cấu trúc tổ hợp vật liệu. Đầu tiên, cấu trúc đơn giản được đề xuất, gồm 3 lớp: tấm đồng liên tục ở phía dưới có độ dày $t_m = 0,036$ mm, lớp điện môi FR-4 có độ dày $t_d = 0,3$ mm ở giữa và lớp trên cùng là cấu trúc đĩa tròn với bán kính $r_1 = 3$ mm [Hình 3.16 (a)]. Trong thiết kế này,

MA cho phổ hấp thụ đơn đỉnh ở 13,39 GHz với độ hấp thụ 62,03%, như được trình bày trong Hình 3.16 (b).



Hình 3.16. a) Sơ đồ cấu trúc MA1 có cấu trúc cộng hưởng hình đĩa tròn và b) Mô phỏng phổ hấp thụ.

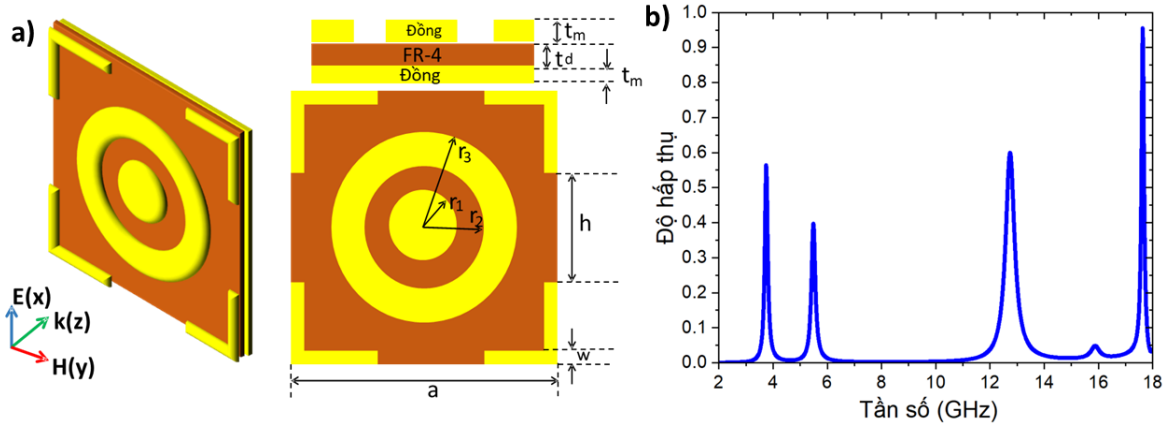
Tiếp theo, luận án đã tiến hành bổ sung thêm vòng tròn đồng tâm bên ngoài đĩa tròn, với bán kính trong $r_2 = 5$ mm và bán kính ngoài $r_3 = 7$ mm, kết quả phổ hấp thụ được trình bày trong Hình 3.17(b) cho thấy MA2 có phổ hấp thụ 3 đỉnh tại tần số 3,79 GHz, 13,37 GHz và 17,61 GHz với độ hấp thụ lần lượt là 55,35%, 57,31% và 99,53% tương ứng.



Hình 3.17. a) Sơ đồ cấu trúc MA2 có cấu trúc cộng hưởng gồm đĩa tròn và vòng tròn và b) Mô phỏng phổ hấp thụ.

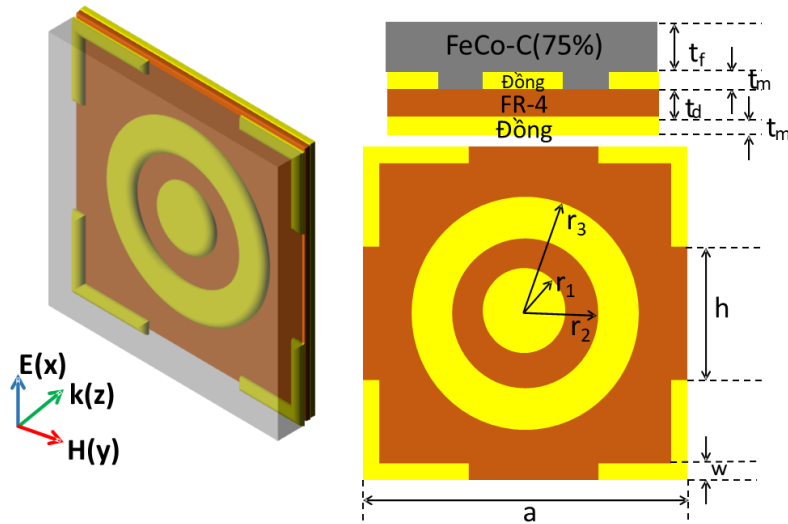
Cuối cùng, các hình chữ L đã được bổ sung vào các góc cấu trúc cộng hưởng như trình bày trong Hình 3.18 (a), kết quả cho thấy cấu trúc có phổ hấp thụ 4 đỉnh tại tần số 3,74 GHz, 5,49 GHz, 12,77 GHz và 17,63 GHz với độ hấp thụ là 56,42%, 39,75%, 58,90% và 95,63% tương ứng, kết quả được thể hiện trong Hình 3.18 (b), cấu trúc MA3 là cấu trúc tối ưu, có phổ hấp thụ nhiều đỉnh

trong vùng tần số 2 - 18 GHz, phù hợp để nghiên cứu tích hợp vật liệu FeCo-C nhằm bổ sung tổn hao để mở rộng dải hấp thụ của cấu trúc CM-MA tổng thể.



Hình 3.18. a) Sơ đồ cấu trúc MA3 có cấu trúc cộng hưởng gồm đĩa tròn, vòng tròn và hình chữ L và b) Mô phỏng phổ hấp thụ.

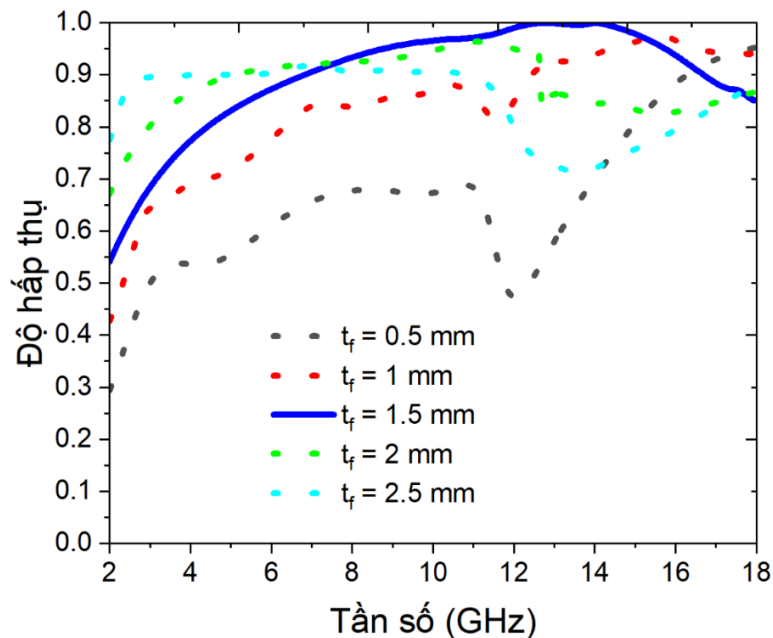
Cấu trúc CM-MA được sử dụng trong mô phỏng của luận án có kích thước ô cơ sở là $20 \times 20 \text{ mm}^2$ (Hình 3.19) và bao gồm bốn lớp, với lớp trên cùng là tấm vật liệu FeCo-C có độ dày t_f , lớp thứ hai là MA làm từ đồng bao gồm đĩa tròn, vòng tròn bên ngoài đồng tâm và có bốn cạnh hình chữ L ở góc, lớp thứ ba là lớp điện môi FR-4 có độ dày t_d , hằng số điện môi tương đối của FR-4 là 4,3 và hệ số tổn hao là 0,025. Cuối cùng là tấm đồng liên tục có độ dày t_m với độ dẫn điện là $5,8 \times 10^7 \text{ S/m}$.



Hình 3.19. Sơ đồ cấu trúc vật liệu CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(75%) với các thông số hình học.

Luận án tiến hành khảo sát ảnh hưởng độ dày lớp vật liệu FeCo-C(75%) trong khoảng từ 0,5 đến 2,5 mm đến phổ hấp thụ của cấu trúc để tối ưu hóa độ dày lớp vật liệu, kết quả trình bày trong Hình 3.20. Kết quả cho thấy, khi độ

dày của lớp vật liệu FeCo-C(75%) là 0,5 mm, cấu trúc có phổ hấp thụ dải rộng với độ hấp thụ dưới 60% trong vùng tần số từ 2 - 12 GHz, và có độ hấp thụ trên 90% trong vùng tần số từ 16,30 - 18 GHz. Khi tăng độ dày lớp FeCo-C lên 1 mm, độ hấp thụ của cấu trúc được cải thiện, cụ thể trong vùng tần số từ 12,5 - 18 GHz cấu trúc có độ hấp thụ trên 90%. Khi độ dày lớp FeCo-C đạt 1,5 mm, cấu trúc cho phổ hấp thụ rộng nhất, băng thông 9,9 GHz (dao động từ 6,9 đến 16,8 GHz). Khi độ dày t_f của lớp vật liệu FeCo-C(75%) đạt 2 mm, băng thông hấp thụ giảm xuống còn 7,5 GHz (trong khoảng từ 5,1 đến 12,6 GHz). Cuối cùng, khi độ dày t_f của lớp FeCo-C(75%) đạt 2,5 mm, độ hấp thụ của cấu trúc tiếp tục giảm trong vùng tần số, độ hấp thụ cấu trúc đạt trên 90% trong vùng tần số từ 4,1 đến 10,9 GHz.



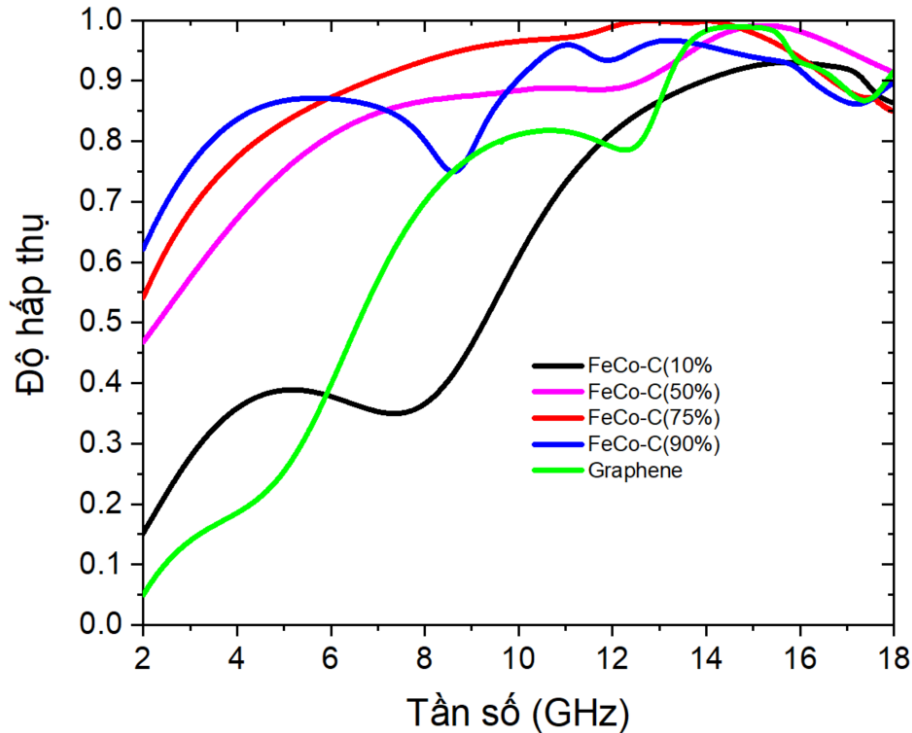
Hình 3.20. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi thay đổi độ dày lớp vật liệu FeCo-C(75%).

Từ các kết quả trên, luận án lựa chọn độ dày t_f tối ưu của lớp vật liệu FeCo-C (75%) là 1,5 mm. Các thông số tối ưu của cấu trúc được trình bày trong Bảng 3.2

Bảng 3.2 Thông số hình học tối ưu của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(75%)

Thông số	a	h	w	t_f	t_d	t_m
Giá trị (mm)	20	6	1	1,5	0,3	0,036
Thông số	r_1	r_2	r_3			
Giá trị (mm)	3	5	7			

Với cùng độ dày t_f là 1,5 mm, luận án đã nghiên cứu đánh giá khả năng hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng các vật liệu FeCo-C 10%, 50%, 90% và 100% (không dùng vật liệu FeCo-C) đã được chế tạo trong khuôn khổ nghiên cứu của luận án. Kết quả được trình trong Hình 3.21.



Hình 3.21. So sánh phổ hấp thụ mô phỏng của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C dưới dạng tấm phủ với tỷ lệ carbon khác nhau: 10%, 50%, 75%, 90% và graphene nguyên chất

Kết quả cho thấy khi tỷ lệ carbon tăng từ 10% đến 75%, phổ hấp thụ của cấu trúc được tăng cường cả về cường độ và băng thông hấp thụ. Tuy nhiên, khi tỷ lệ carbon tăng lên 90% và 100% carbon (không sử dụng vật liệu từ), cường độ hấp thụ của cấu trúc có xu hướng giảm, cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C với tỷ lệ 75% là tối ưu và có phổ hấp thụ rộng nhất với độ hấp thụ trên 90% trong khoảng từ 6,9 GHz đến 16,8 GHz.

Để làm sáng tỏ phương pháp thiết kế của CM-MA được đề xuất, độ từ thẩm và hằng số điện môi hiệu dụng được sử dụng để định lượng hiệu ứng phối hợp trở kháng. Trở kháng tương đối Z_r cho CM-MA có thể được tính bằng theo các thông số tán xạ thu được theo công thức 2.2. Có thể thấy rằng, để đạt được độ hấp thụ tuyệt đối, trở kháng tương đối cần được tối ưu hóa ở mức khoảng 1,0 đối với phần thực và phần ảo được tiệm cận bằng 0.

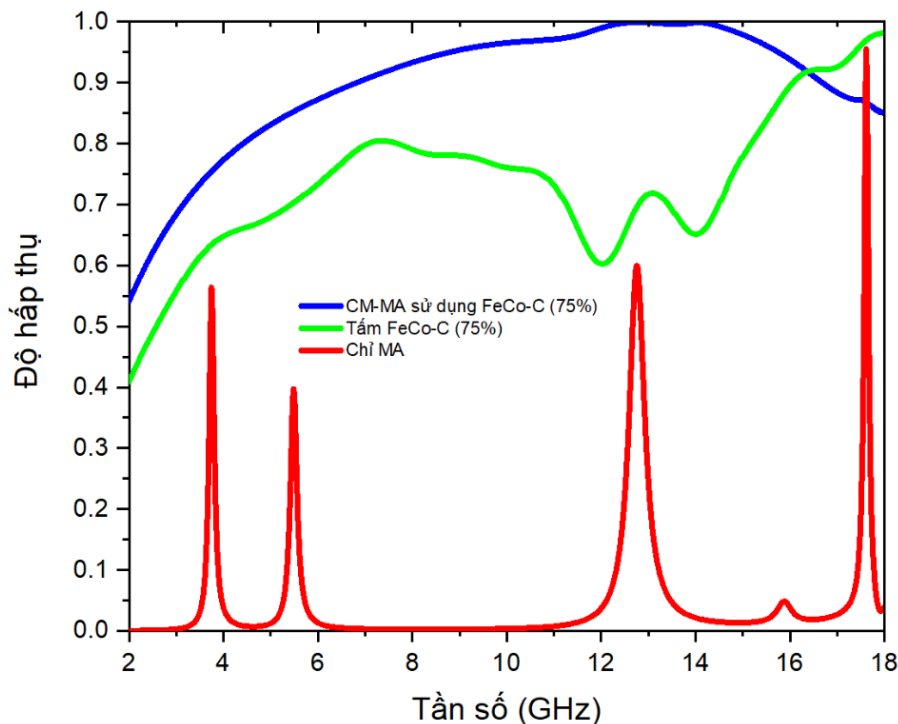
Để làm rõ hơn mức độ cải thiện các đặc tính hấp thụ khi tích hợp vật liệu từ tính vào cấu trúc vật liệu biến hóa, Băng thông tương đối (FBW) của phổ hấp thụ cũng được tính bằng phương trình sau [173]:

$$FBW = 2 \frac{f_{high} - f_{low}}{f_{high} + f_{low}}, \quad (3.2)$$

trong đó, f_{high} và f_{low} là tần số cao nhất và thấp nhất mà độ hấp thụ lớn hơn 90% tương ứng.

3.2.2 Đánh giá tính chất hấp thụ của tổ hợp vật liệu sử dụng tấm phủ FeCo-C

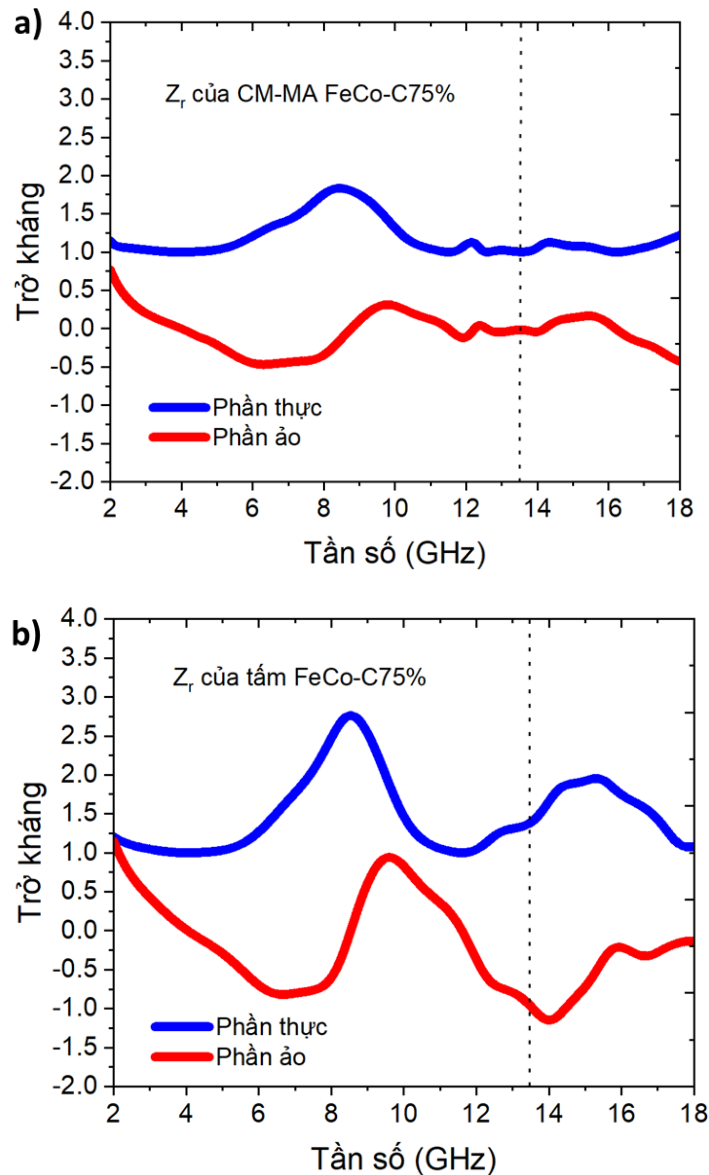
Luận án lựa chọn cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (75%) để đánh giá các tính chất hấp thụ và làm rõ các cơ chế hấp thụ. Hình 3.22(a) trình bày phổ hấp thụ khi so sánh giữa CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (75%), vật liệu FeCo-C (75%) thông thường và khi chỉ có cấu trúc MA trong dải tần số 2-18 GHz.



Hình 3.22. So sánh kết quả mô phỏng phổ hấp thụ giữa vật liệu FeCo-C thông thường, cấu trúc MA và cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (75%).

Kết quả chỉ ra rằng việc tích hợp vật liệu FeCo-C (75%) vào cấu trúc CM-MA mở rộng hiệu quả cả dải tần số hấp thụ và cường độ hấp thụ so với vật liệu thông thường. Đối với vật liệu FeCo-C thông thường có độ dày tương đương với CM-MA, EAB là 2,3 GHz (dao động từ 15,7 đến 18 GHz) tương ứng với FBW là 13,65%. Đối với MA không sử dụng vật liệu FeCo-C, chỉ có

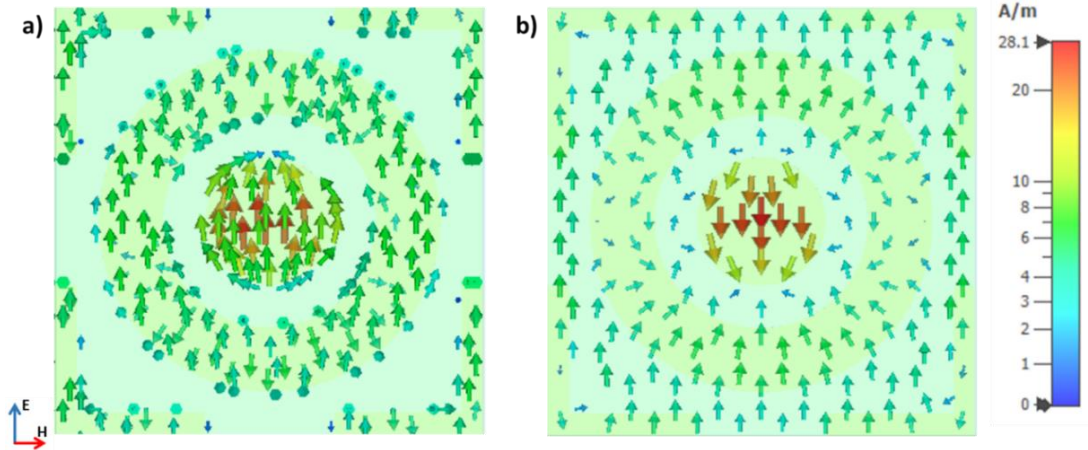
một đỉnh hấp thụ ở 17,63 GHz với độ hấp thụ 95,53% và ba đỉnh khác ở 3,74 GHz; 5,49 GHz và 12,77 GHz, tương ứng với độ hấp thụ thấp hơn 60%. Ngược lại, CM-MA được đề xuất thể hiện băng thông hấp thụ rộng hơn đáng kể, EAB là 9,9 GHz (dao động từ 6,9 đến 16,8 GHz), tương ứng với FBW là 83,54%.



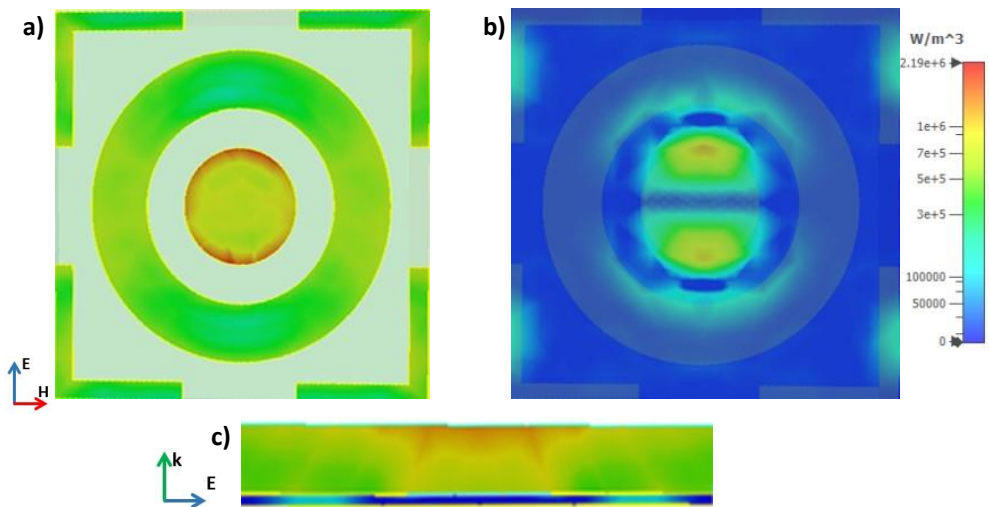
Hình 3.23. Giá trị trở kháng Z_r theo tần số của: a) cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (75%) và b) vật liệu FeCo-C (75%) thông thường tương ứng.

Phần thực và phần ảo được tính toán của trở kháng tương đối Z_r được thể hiện trong Hình 3.23(a) và 3.23(b) hoàn toàn phù hợp với lý thuyết phối hợp trở kháng và phổ hấp thụ của CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(75%). Trong đó, tại tần số 13,49 GHz, phần thực trở kháng của CM-MA đạt 1,02 và phần ảo đạt -0,03, đối với tấm FeCo-C(75%) tại cùng tần số, phần ảo và phần thực trở kháng đạt giá trị 1,39 và -0,94 tương ứng.

Như quan sát thấy trên Hình 3.22, đỉnh hấp thụ cao nhất của cấu trúc CM-MA là tại tần số 13,49 GHz. Do đó, phân bố dòng điện bề mặt và độ tổn hao năng lượng tại tần số này được nghiên cứu để làm rõ cơ chế hấp thụ, kết quả được trình bày trong Hình 3.24 và Hình 3.25.



Hình 3.24. Mô phỏng dòng điện bề mặt tại (a) lớp kim loại phía trên và (b) lớp kim loại phản xạ phía dưới của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (75%) tại tần số 13,49 GHz.



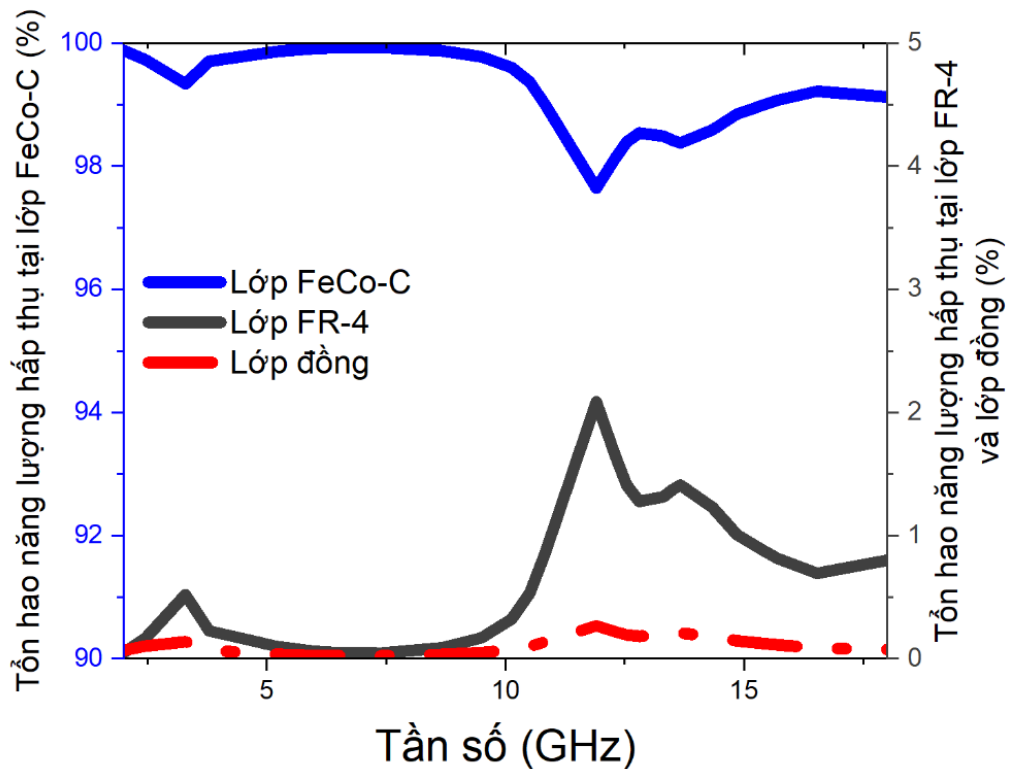
Hình 3.25. Mô phỏng tổn hao năng lượng tại các lớp của cấu trúc CM-MA sử dụng FeCo-C (75%): (a - b) trên lớp kim loại tại mặt phẳng (E, H), (c) tại mặt phẳng (k, E) của cấu trúc CM-MA.

Có thể thấy rằng, tại tần số 13,49 GHz, dòng điện bề mặt phân bố tập trung tại đĩa tròn trung tâm, một phần ở vòng tròn ngoài và ở các đường hình chữ L tại các góc của cấu trúc. Dòng điện trên lớp kim loại cộng hưởng phía trên song song và ngược chiều với lớp kim loại dưới cùng, chứng tỏ cơ chế cộng hưởng của đỉnh hấp thụ là cộng hưởng từ. Cộng hưởng từ giúp phối hợp

trở kháng và sóng điện từ bị tiêu hao mạnh khi đi vào trong cấu trúc, hình thành đỉnh hấp thụ tại tần số này.

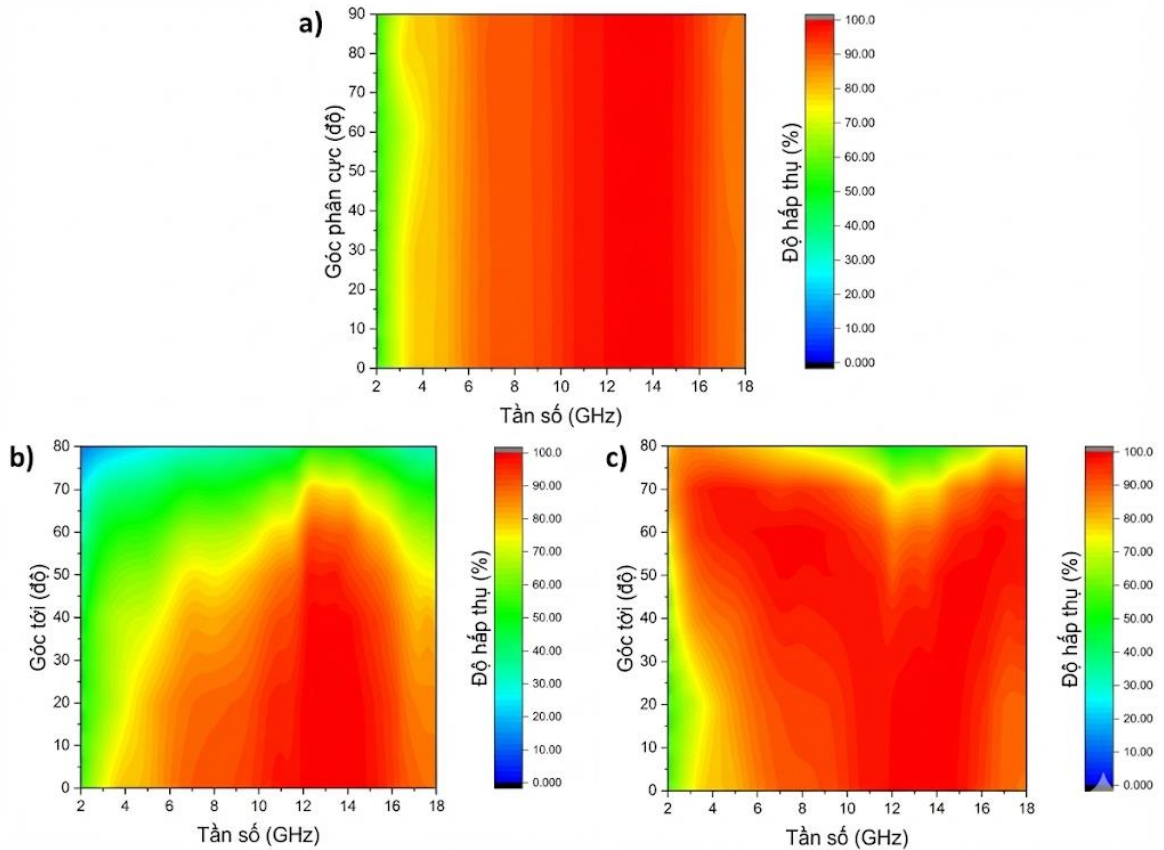
Như quan sát thấy trên hình 3.25 (a-b), tổn hao năng lượng cao hơn tập trung tại đĩa tròn tại tâm của cấu trúc tuần hoàn và một phần ở cạnh của hình chữ L. Điều này cũng được quan sát tại Hình 3.25 (c). Tổn hao trong vật liệu từ chiếm ưu thế so với tổn hao trong cấu trúc. Có thể nói rằng, sự kết hợp giữa tổn hao dải rộng của FeCo-C và cộng hưởng cấu trúc MA dẫn tới thay đổi trở kháng tổng cộng của tổ hợp vật liệu là lý do chính tạo ra hấp thụ dải rộng. Kết quả mô phỏng là phù hợp với kết quả được báo cáo trong tài liệu tham khảo [140].

Để làm rõ vai trò của các lớp khác nhau trong cấu trúc CM-MA, các phần năng lượng tiêu tán trong lớp FeCo-C (75%), lớp FR-4 và lớp kim loại đồng được trình bày trong Hình 3.26.



Hình 3.26. Tỷ lệ tổn hao năng lượng tiêu tán tại lớp FeCo-C (75%), FR-4 và đồng của cấu trúc CM-MA

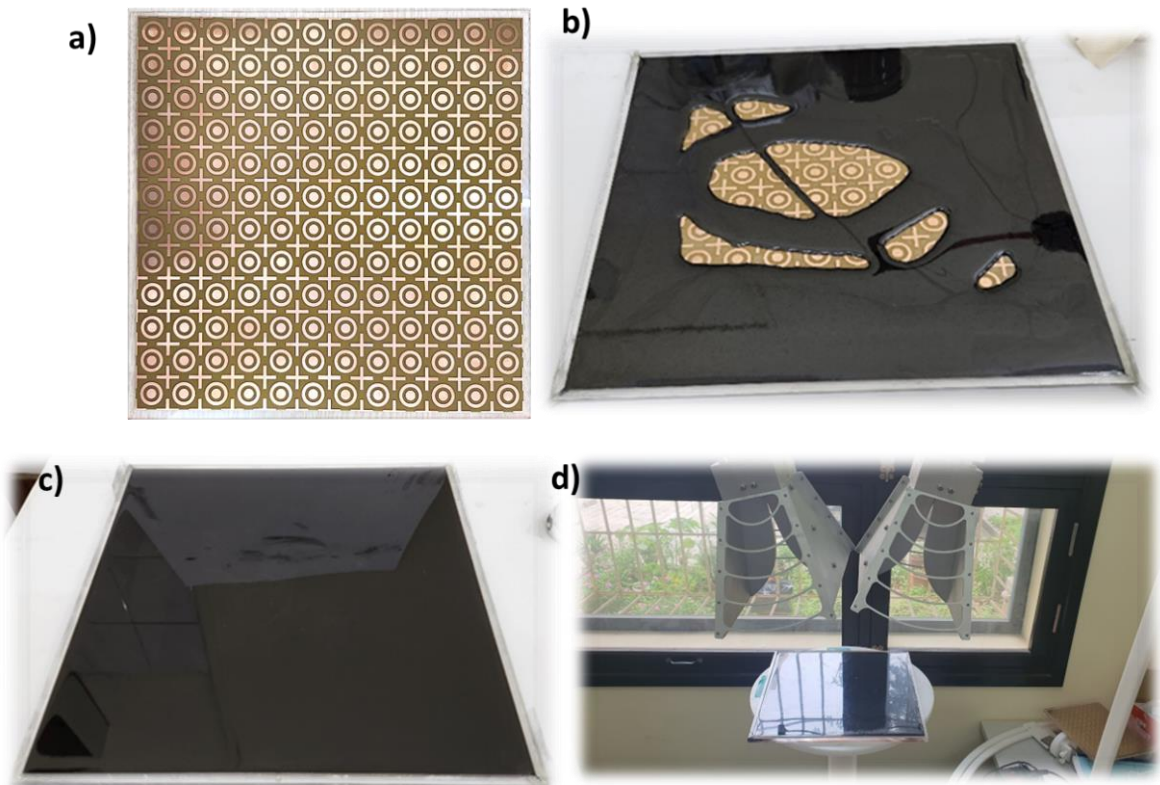
Có thể thấy, hơn 98% năng lượng bị tổn hao xảy ra trong lớp FeCo-C (75%), trong khi năng lượng bị mất trong lớp FR-4 và đồng chỉ giới hạn ở mức 2%. Do đó, có thể chỉ ra rằng lớp FeCo-C (75%) trong CM-MA là yếu tố quan trọng góp phần vào sự hấp thụ dải tần rộng.



Hình 3.27. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (75%) (a) dưới các góc phân cực khác nhau và các góc tới khác nhau của chế độ phân cực (b) TE và (c) TM

Để đánh giá hiệu suất hấp thụ của cấu trúc CM-MA, các nghiên cứu về thay đổi góc tới và phân cực của sóng điện từ tới cũng được tiến hành. Kết quả được trình bày trong Hình 3.27. Kết quả cho thấy rằng, cấu trúc hầu như không bị ảnh hưởng bởi góc phân cực [Hình 3.27 (a)]. Tuy nhiên, độ hấp thụ của CM-MA bị ảnh hưởng bởi góc tới, cụ thể là giảm cả về biên độ và băng thông [Hình 3.27 (b) và (c)]. Dù vậy, cấu trúc CM-MA vẫn cho thấy khả năng hấp thụ tốt cả trong phân cực TE và phân cực TM ngay cả khi góc tới lớn. Cụ thể, đối với phân cực TM, độ hấp thụ giảm khi góc tới tăng từ 0 đến 70° nhưng vẫn cao hơn 90% trong dải tần từ 6,9 đến 12 GHz, như thể hiện trong Hình 3.24(c). FBW của CM-MA giảm xuống còn 59,46%. Tuy nhiên, ở chế độ TE, độ hấp thụ được duy trì ở mức cao hơn 90% trong vùng tần số từ 11,52 đến 16,34 GHz đối với góc tới lên đến 40°, như minh họa trong Hình 3.27(b). Ở chế độ này, FBW của CM-MA giảm xuống còn 34,53%. Như minh họa trong Hình 3.27(b) và 3.27(c), các đặc điểm hấp thụ của cấu trúc chứng minh hành vi có lợi hơn ở chế độ TM so với chế độ TE. Hiện tượng này có thể được hiểu bằng cách phân tích sự liên

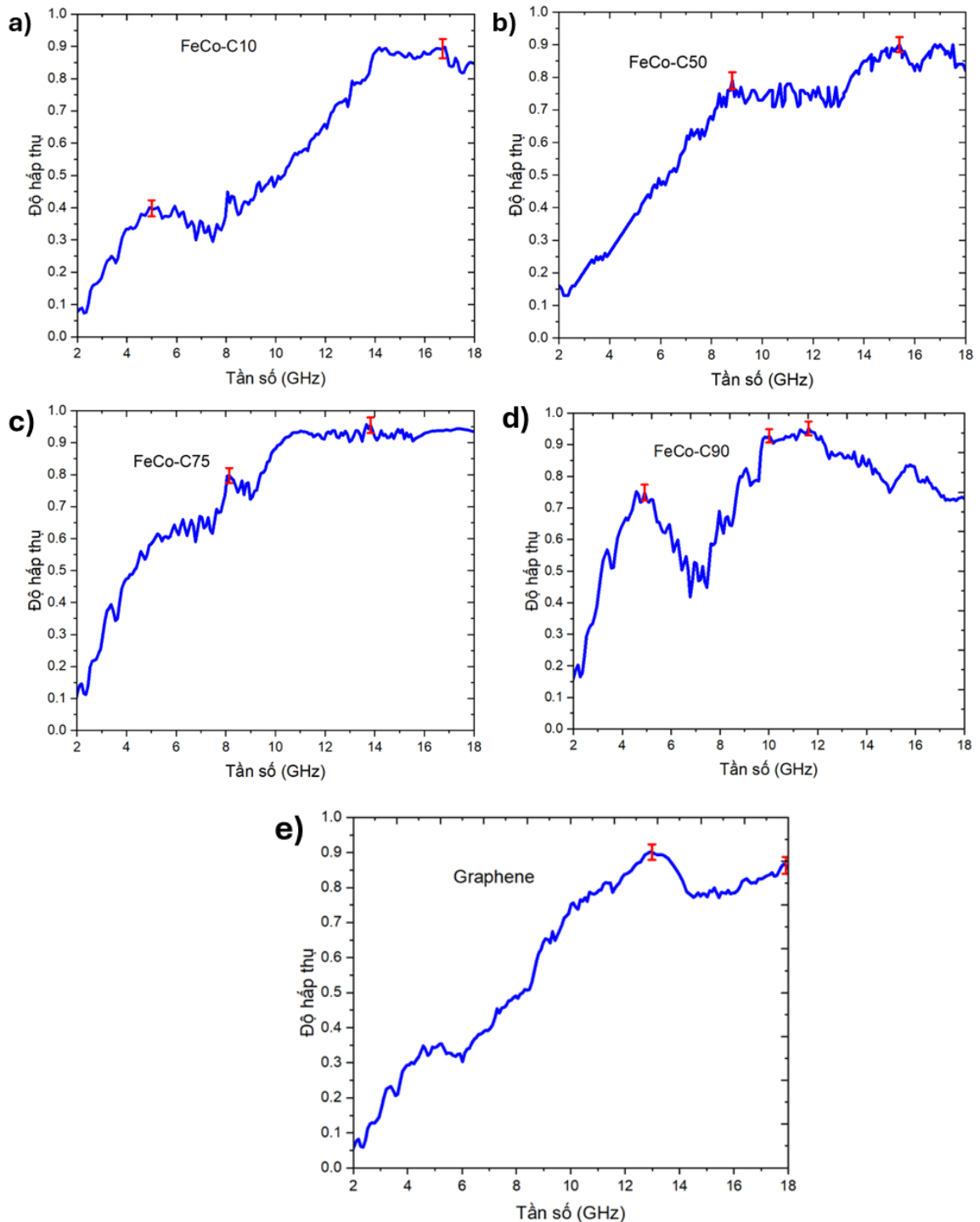
kết của từ trường tới. Ở chế độ TM, hướng từ trường không đôi khi góc tới thay đổi, trong khi ở chế độ TE, nó lệch khỏi việc song song với mặt phẳng mẫu. Cơ chế cộng hưởng của cấu trúc MA phụ thuộc vào cộng hưởng từ, yếu đi khi góc tới tăng. Do đó, việc duy trì độ hấp thụ ở chế độ TE kém hiệu quả hơn so với chế độ TM. Những phát hiện này làm nổi bật hiệu suất vượt trội của CM-MA được đề xuất, không bị ảnh hưởng bởi sự phân cực của sóng điện từ tới và vẫn rất ổn định khi có góc tới xiên.



Hình 3.28. Quá trình tạo mẫu vật liệu CM-MA và đo đạc thực nghiệm: (a) chuẩn bị mẫu vật liệu MA, (b) trộn FeCo-C với epoxy phủ lên bề mặt MA và chờ đông rắn, (c) mẫu CM-MA sau khi chế tạo và (d) bố trí đo đạc thực nghiệm.

Cuối cùng các mẫu được chế tạo và đo đạc thực nghiệm, năm mẫu CM-MA đã được chế tạo với các tỷ lệ carbon - FeCo khác nhau: 10%, 50%, 75%, 90% và graphene nguyên chất. Tấm vật liệu từ FeCo-C được tích hợp vào MA bằng khuôn mica với vật liệu kết dính epoxy, theo tỷ lệ 50% theo khối lượng so với FeCo-C. Thiết kế thử nghiệm để đo hệ số truyền qua và phản xạ tương ứng. Máy phân tích mạng vector ZNB20 được kết nối với hai ăng-ten loa chuẩn phân cực tuyến tính (2 - 18 GHz), được sử dụng để chiếu xạ mẫu bằng chùm vi sóng và đo tín hiệu truyền và tín hiệu phản xạ (với góc tới nhỏ là 10°) từ mẫu (Hình 3.28). Kết quả đo phổ hấp thụ của các mẫu với sai số chuẩn được trình

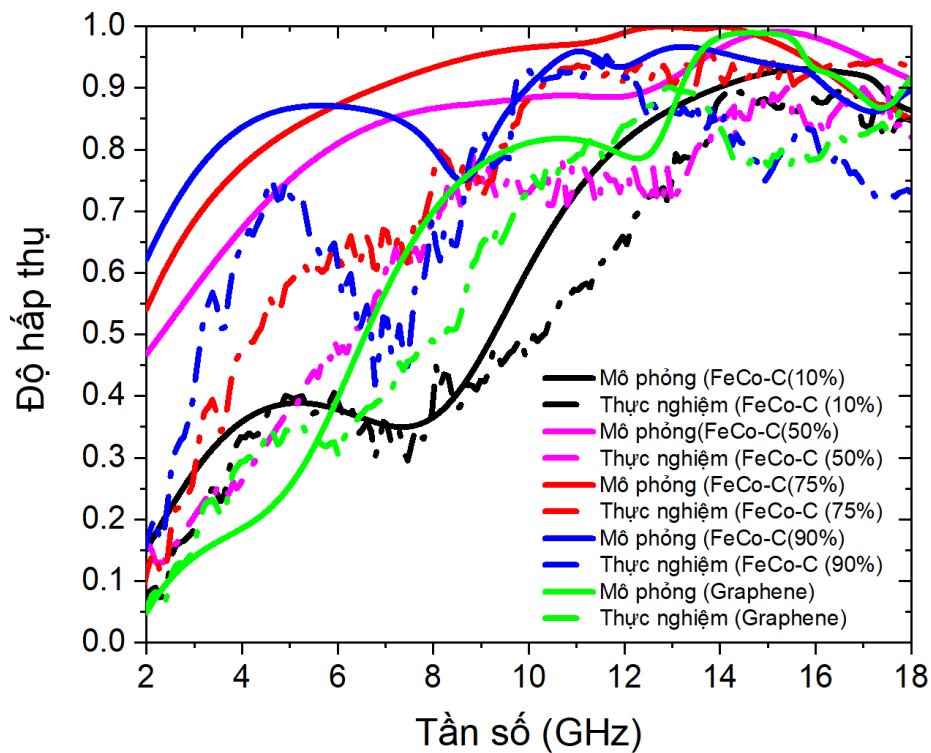
bày trong Hình 3.29. Kết quả cho thấy, kết quả đo thực nghiệm là ổn định, sai số chuẩn chỉ giới hạn ở mức dưới 3%.



Hình 3.29. Phổ hấp thụ thực nghiệm với giá trị sai số chuẩn của các cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C với các tỷ lệ carbon khác nhau: a) 10%, b) 50%, c) 75 %, d) 90 % và graphene nguyên chất.

Kết quả thu được sau khi đo thực tế đã được so sánh với kết quả mô phỏng (Hình 3.30). Kết quả mô phỏng và thực nghiệm nhìn chung là nhất quán. Đối với mẫu CM-MA tối ưu sử dụng FeCo-C(75%), kết quả thực nghiệm

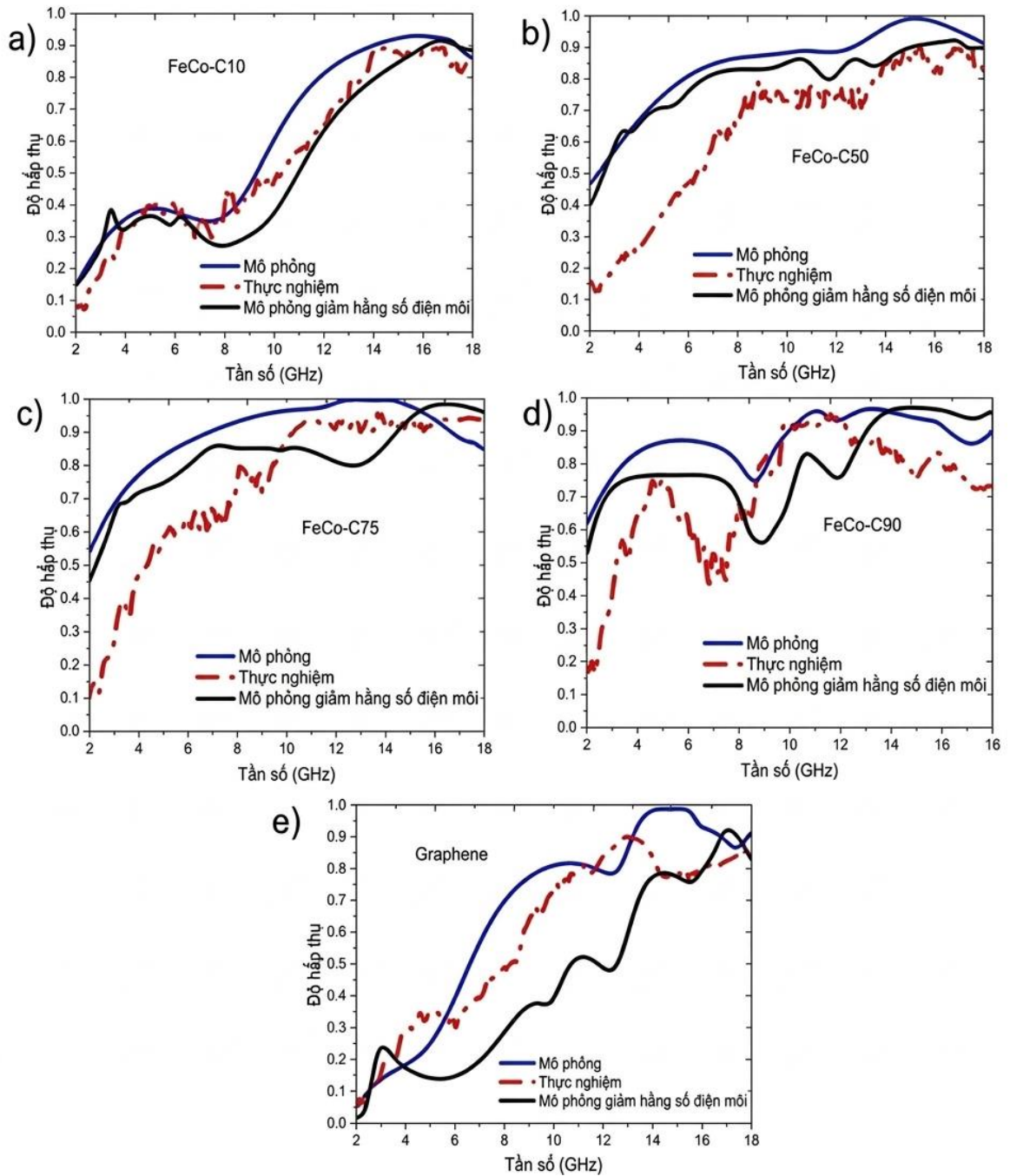
cho EAB đạt 7,7 GHz, tương ứng với FBW là 54,73%. Sự khác biệt giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm có thể là do một số lý do: Bề mặt của mẫu chế tạo có thể không phẳng sau khi đóng rắn, dẫn đến độ dày khác nhau của mẫu tại các điểm đo; Vật liệu FeCo-C phủ trên bề mặt mẫu được trộn với chất đóng rắn epoxy với tỷ trọng chiếm 50% tổng trọng lượng, lớn hơn paraffin theo tỷ lệ tạo mẫu trong quá trình đo hằng số điện môi và độ từ thẩm (40% theo khối lượng so với vật liệu từ). Việc tăng tỷ lệ dung dịch hỗn hợp làm giảm mật độ của FeCo-C, khiến hằng số điện môi và độ từ thẩm không hoàn toàn giống như trong mô phỏng khi sử dụng các thông số vật liệu FeCo-C được phối trộn với paraffin để định nghĩa vật liệu trong CST.



Hình 3.30. So sánh phổ hấp thụ (mô phỏng và thực nghiệm) của các cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C với các tỷ lệ carbon khác nhau: 10%, 50%, 75 %, 90 % và graphene nguyên chất

Như dự đoán các mẫu CM-MA được chế tạo thực nghiệm bằng cách trộn với epoxy, quá trình này làm giảm mật độ vật liệu FeCo-C trên CM-MA, từ đó làm giảm hằng số điện môi phức của vật liệu. Điều này dẫn tới sai khác giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm. Để làm sáng tỏ hơn về sự sai khác giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm, luận án đã mô phỏng các mẫu CM-MA với giá trị hằng số điện môi phức của FeCo-C giảm 20% so với giá trị ban đầu. Kết quả được trình bày trong Hình 3.31 cho thấy xu hướng độ hấp thụ của mẫu giảm.

Mặc dù kết quả chưa hoàn toàn trùng khớp với phép đo thực nghiệm, tuy nhiên chúng phần nào hỗ trợ tính hợp lý của dự đoán mà luận án đưa ra.



Hình 3.31. So sánh phổ hấp thụ mô phỏng, thực nghiệm và khi giảm hằng số điện môi của vật liệu với các tỉ lệ C/FeCo khác nhau: 10%, 50%, 75%, 90% và graphene nguyên chất

Sai số tương đối trung bình giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm phổ hấp thụ được xác định bằng cách lấy giá trị trung bình của tỷ lệ lệch của cường độ hấp thụ trong thực nghiệm so với mô phỏng tại một tần số:

$$\Delta A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_{Sim.}(i) - A_{Exp.}(i)}{A_{Sim.}(i)} \right| \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

trong đó ΔA là sai số tương đối (%), $A_{Sim.}(i)$ là độ hấp thụ mô phỏng tại tần số (i) và $A_{Exp.}(i)$ là độ hấp thụ đo đạc thực nghiệm tại tần số (i), n là số lượng tần số đo đạc thực nghiệm.

Sai số tương đối trung bình giữa mô phỏng và thực nghiệm đối với các mẫu CM-MA sử dụng FeCo-C với các tỷ phần carbon 10%, 50%, 75% và 90% xác định được lần lượt là 14,88%; 27,14%; 25,09% và 23,13%. Sai số tương đối trung bình sau khi giảm hằng số điện môi 20% so với giá trị ban đầu giữa mô phỏng và thực nghiệm xác định được theo các tỷ phần carbon khác nhau giảm xuống còn là 13,68%; 23,81%; 20,05% và 21,78%. Sai số này là có thể chấp nhận được, khi xét đến việc xu hướng biến đổi của phổ hấp thụ trong thực nghiệm và mô phỏng là khá tương đồng nhau.

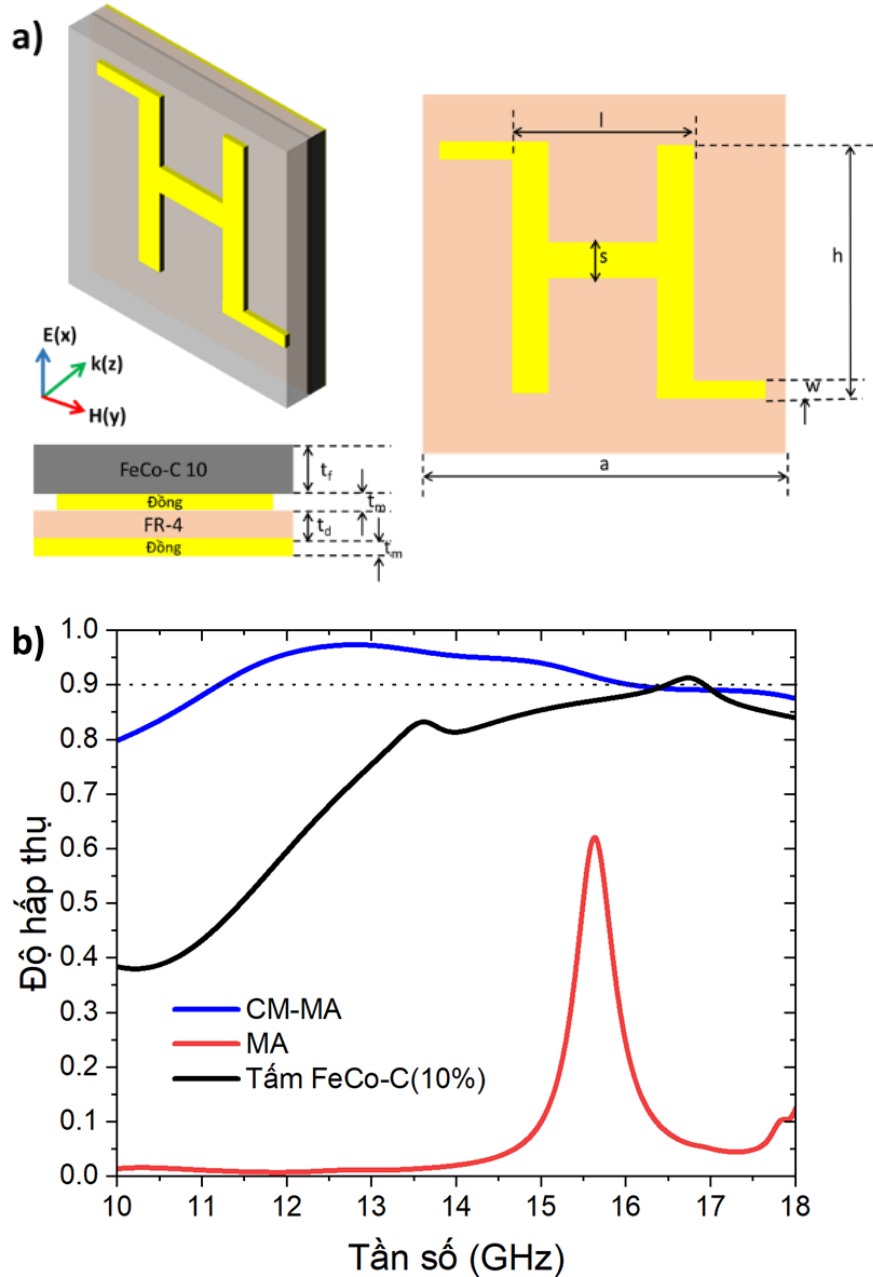
Bảng 3.3 So sánh băng thông hấp thụ hiệu quả của cấu trúc CM-MA sử dụng tấm phủ FeCo-C (75%) với các nghiên cứu khác trước đây

STT	Vật liệu từ sử dụng trong cấu trúc CM-MA	EAB (GHz)	FBW (%)	Độ dày (mm)	Tài liệu tham khảo
1	Sắt carbonyl trộn với cao su	1,73 - 4,04	80,1	3,4	[140]
2	FeSiAlp/epoxy composite	6,79-7,52 12,52 - 19,28	10,2 42,6	2,51	[174]
3	CoNi@CNH/epoxy composite	4,5 - 18	120	5,9	[29]
4	FeSiBPCuY5p/paraffin	5,61 - 7,35; 8,19 - 18	26,85 74,94	3	[175]
5	Vật liệu từ mềm Fe-Co	7,8 - 13,8	74,91	4,8	[176]
6	FeCo-C (75%)	6,9 - 16,8 (mô phỏng) 10,3 - 18 (thực nghiệm)	83,53 (mô phỏng) 54,7 (thực nghiệm)	1,8	Nghiên cứu này

EAB của cấu trúc CM-MA tính theo công thức 3.1 của đề xuất được so sánh với bảng thông của các vật liệu khác của các nghiên cứu trước đây (trình bày trong Bảng 3.2), chẳng hạn như: Bột sắt carbonyl trộn với cao su; FeSiAlp/hỗn hợp epoxy; CoNi@CNH/hỗn hợp epoxy; FeSiBPCuY5p/paraffin; hỗn hợp từ mềm Fe-Co. Kết quả cho thấy cấu trúc đề xuất thể hiện bảng thông hấp thụ được tăng cường, điều này có thể không chỉ là do các đặc tính nội tại của vật liệu FeCo-C (75%) mà còn do khai thác cấu trúc MA. Ngoài ra, độ dày của cấu trúc là mỏng hơn so với các nghiên cứu khác.

Mặc dù kết quả mô phỏng cho thấy hợp phần FeCo-C (75%) sử dụng trong cấu trúc CM-MA với tỷ phần 75% graphene cho khả năng hấp thụ sóng điện từ tốt nhất, tuy nhiên việc chế tạo vật liệu FeCo-C(75%) cần chi phí cao, độ bền cơ học của vật liệu này không tốt do hàm lượng graphene lớn. Ngược lại, hợp phần chứa 10% graphene có khả năng phân tán tốt, ổn định cấu trúc và phù hợp với định hướng chế tạo cũng như ứng dụng thực tế [177]. Tỷ phần này cũng đã được ghi nhận trong một số nghiên cứu trước đây về tiềm năng ứng dụng trong lĩnh vực quân sự và quốc phòng, cụ thể được sử dụng làm lớp phủ tàng hình quân sự dưới dạng sơn và tương thích điện từ cho thiết bị dân dụng [178-180]. Như quan sát trên Hình 3.21, cấu trúc CM-MA tích hợp vật liệu FeCo-C(10%) cho phổ hấp thụ dải rộng, tuy nhiên, so với các mẫu với tỷ phần carbon khác, mẫu FeCo-C(10%) cho phổ hấp thụ trên 90% hẹp hơn các tỷ phần khác, trong khoảng 13,94 đến 17,37 GHz (EAB đạt 3,43 GHz), chứng tỏ khi tích hợp với MA có cấu trúc dạng đĩa tròn, vòng tròn ngoài đồng tâm kết hợp các hình chữ L tại các góc của cấu trúc chưa tạo phối hợp trở kháng tốt trên dải rộng đối với vật liệu FeCo-C(10%) khi độ dày lớp vật liệu là 1,5 mm. Ngoài ra, cấu trúc dạng chữ H đã được các công bố đề xuất trước đây, có phổ hấp thụ trong vùng tần số GHz [181-183]. Kế thừa những nghiên cứu trước đây, nhằm tối ưu trở kháng của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(10%) với cùng độ dày vật liệu sử dụng là 1,5 mm để tăng cường và mở rộng băng thông hấp thụ của vật liệu FeCo-C(10%). Ô cơ sở của cấu trúc được thiết kế như trình bày trong Hình 3.32 gồm 4 lớp: lớp trên cùng là tấm vật liệu FeCo-C(10%) có độ dày $t_f = 1,5$ mm; lớp ở giữa là đồng có hình dạng chữ H với hai cạnh nối dài 2 đầu với độ dẫn điện $S = 5,8 \times 10^7$ S/m; lớp điện môi FR-4 có độ dày $t_d = 1$ mm, hằng số điện môi tương đối 4.3 và hệ số tổn hao là 0,025; dưới cùng là lớp phản

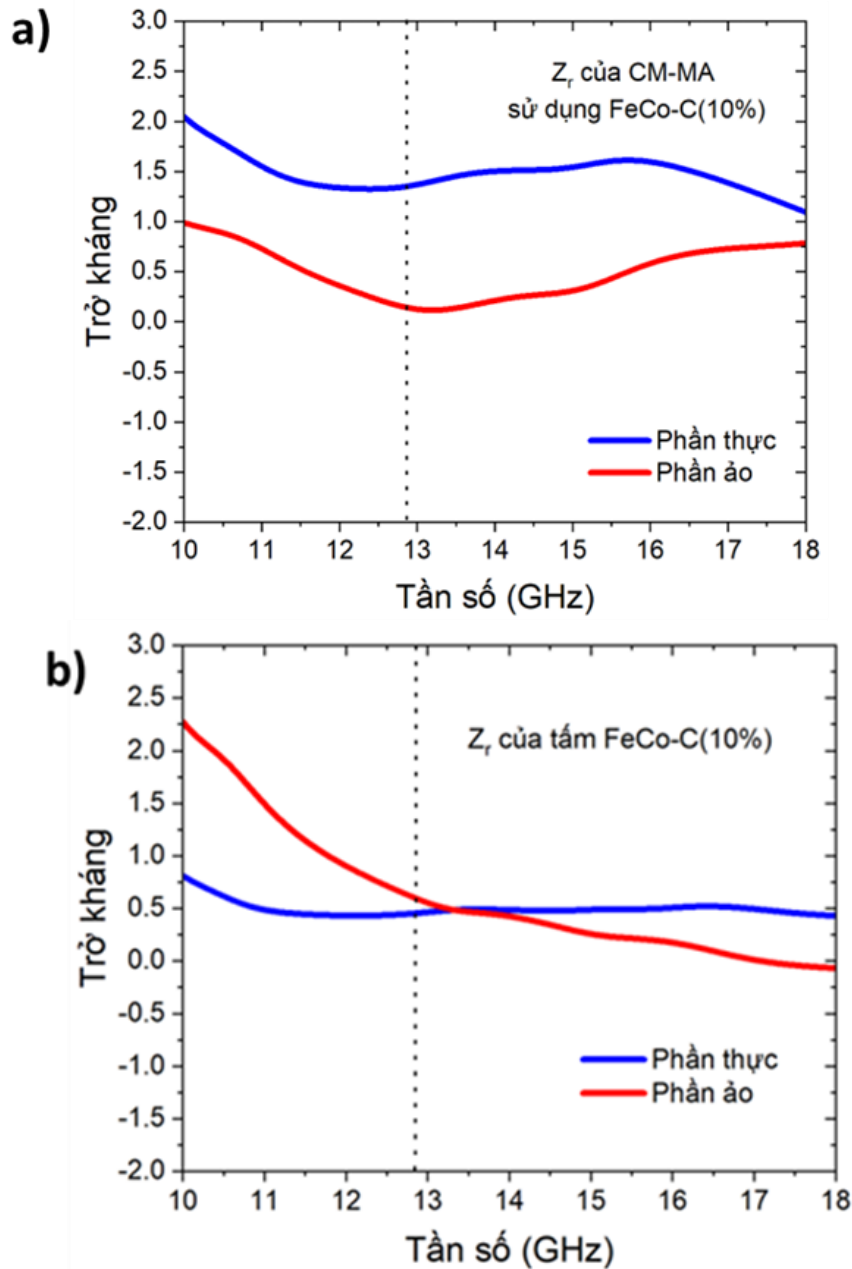
xạ đồng có độ dày $t_m = 0,036\text{mm}$. Các kích thước hình học của ô cơ sở gồm: $a = 20, h = 14, w = 1, l = 8, \text{ và } s = 2 \text{ mm}$.



Hình 3.32. a) Sơ đồ cấu trúc ô cơ sở CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(10%) và (b) so sánh phổ hấp thụ mô phỏng của cấu trúc CM-MA với MA và tấm vật liệu FeCo-C(10%) thông thường.

Kết quả thu được cho thấy việc tích hợp vật liệu FeCo-C (10%) vào cấu trúc MA giúp mở rộng đáng kể cả dải tần hấp thụ và độ hấp thụ so với vật liệu FeCo-C (10%) thông thường có độ dày tương đương và cấu trúc MA. Cụ thể, đối với tấm vật liệu FeCo-C (10%) thông thường, độ hấp thụ rộng, tuy nhiên phổ hấp thụ gần như dưới 90% trong dải tần số khảo sát, FBW của tấm vật liệu FeCo-C (10%) xấp xỉ 3,4%. Với cấu trúc MA không tích hợp vật liệu FeCo-C(10%) chỉ

xuất hiện một đỉnh hấp thụ tại 15,6 GHz với độ hấp thụ dưới 60%. Ngược lại, cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(10%) có độ hấp thụ băng thông rộng hơn đáng kể, EAB đạt 4,8 GHz (từ 11,2 đến 16 GHz) với đỉnh hấp thụ đạt gần 100% tại tần số 12,8 GHz với FBW được mở rộng đáng kể đạt 35,29%.

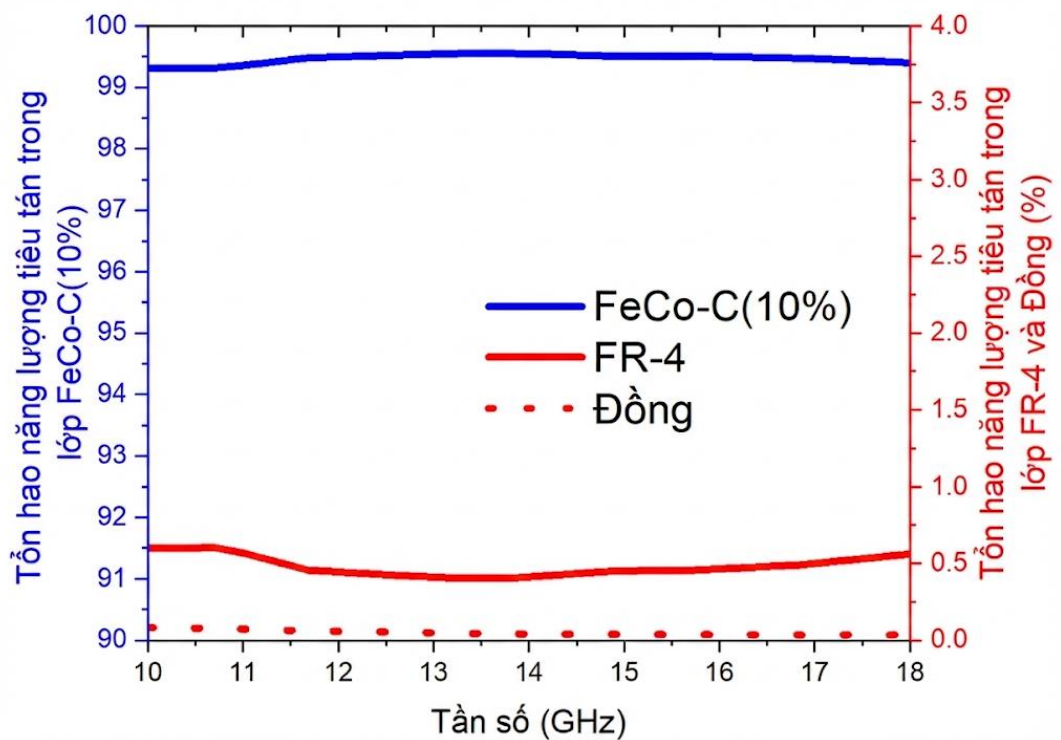


Hình 3.33. Trở kháng của: a) CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(10%) và b) tấm vật liệu FeCo-C (10%) thông thường

Giá trị theo tần số của trở kháng tương đối Z_r bao gồm phần thực và phần ảo được tính toán thể hiện trong Hình 3.33(a) và 3.33(b) hoàn toàn phù hợp với lý thuyết phối hợp trở kháng và phổ hấp thụ của CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(10%). Trong đó, tại tần số 12,8 GHz, phần thực trở kháng của CM-MA đạt 1,345 và phần ảo đạt 0,153, đối với tấm FeCo-C(10%) tại cùng tần số,

phần ảo và phần thực trở kháng đạt giá trị 0,45 và 0,613 tương ứng. Có thể thấy, CM-MA phối hợp trở kháng với không khí tốt hơn nhiều so với tấm FeCo-C(10%), dẫn đến hiệu quả hấp thụ tốt hơn của vật liệu tại tần số này.

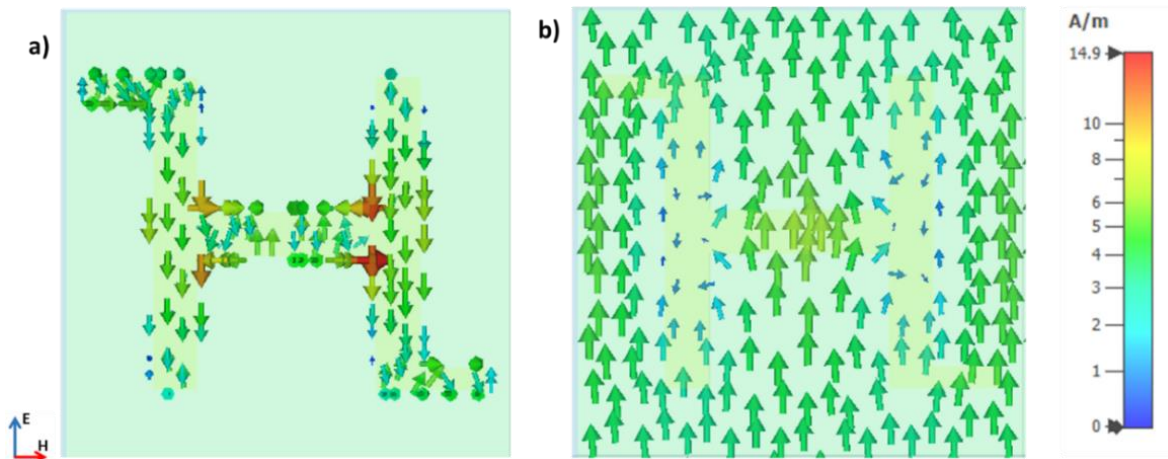
Để làm rõ vai trò của các lớp khác nhau trong cấu trúc CM-MA, các phần năng lượng tiêu tán trong lớp FeCo-C (10%), lớp FR-4 và lớp kim loại đồng được trình bày trong Hình 3.34. Có thể thấy, hơn 99% năng lượng bị tổn hao xảy ra trong lớp FeCo-C (10%), trong khi năng lượng bị mất trong lớp FR-4 và đồng chỉ giới hạn ở mức dưới 1%. Do đó, có thể chỉ ra rằng lớp FeCo-C (10%) trong CM-MA là yếu tố chính góp phần vào sự hấp thụ băng thông rộng.



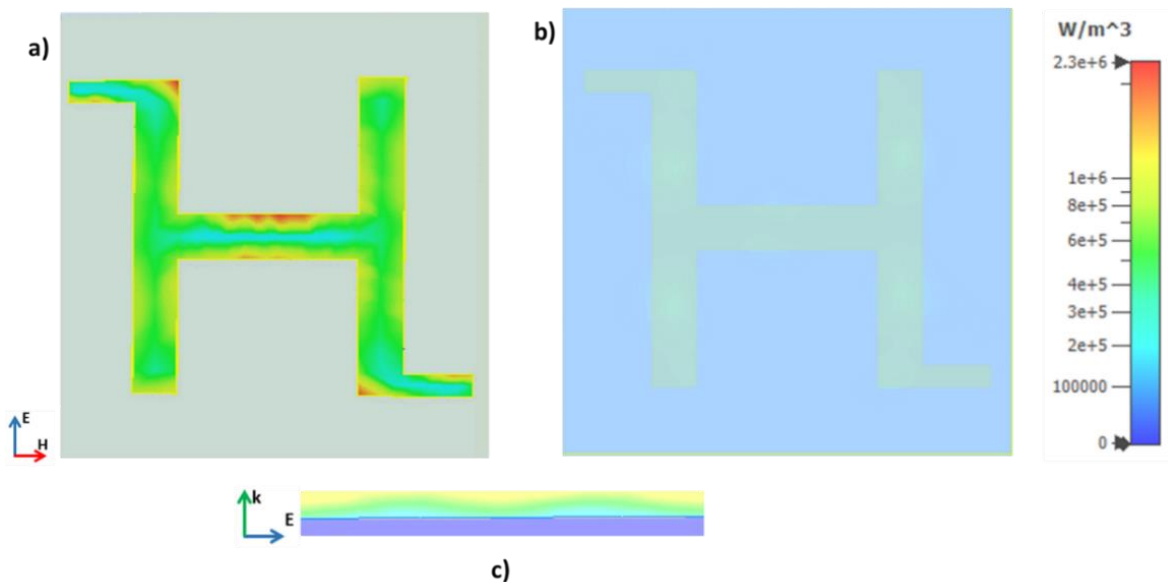
Hình 3.34. Tỷ lệ tổn hao năng lượng tiêu tán tại lớp FeCo-C (10%), FR-4 và đồng của cấu trúc CM-MA

Phân bố dòng điện bề mặt và độ tổn năng lượng tại tần số 12,8 GHz đã được nghiên cứu để làm rõ cơ chế hấp thụ của cấu trúc, kết quả được trình bày trong Hình 3.35 và Hình 3.36.

Có thể thấy rằng, tại tần số 12,8 GHz, dòng điện bề mặt phân bố mặt tại lớp kim loại cộng hưởng song song và ngược hướng với dòng điện tại tấm phản xạ đồng phía dưới, tạo thành cộng hưởng từ. Cộng hưởng này dẫn đến sự hấp thụ năng lượng sóng điện từ tới, tạo ra đỉnh hấp thụ cao tại tần số 12,8 GHz.

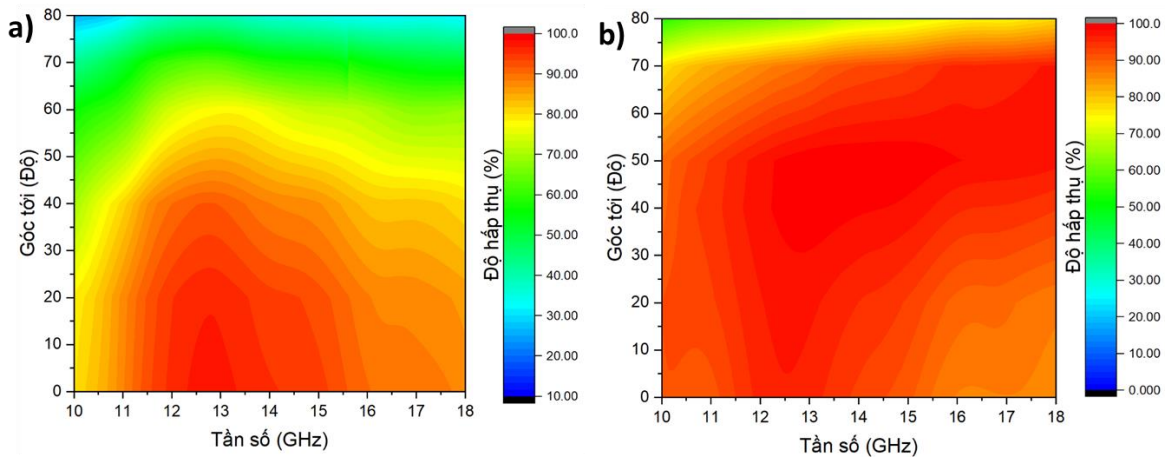


Hình 3.35. Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt tại (a) lớp kim loại phía trên và (b) lớp kim loại phản xạ phía dưới của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (10%) tại tần số 12,8 GHz



Hình 3.36. Mô phỏng phân bố tổn hao năng lượng tại các lớp của cấu trúc CM-MA sử dụng FeCo-C (10%): (a -b) trên lớp kim loại tại mặt phẳng (E, H), (c) tại mặt phẳng (k, E) của cấu trúc CM-MA

Như quan sát thấy trên hình 3.36 (a-b), tổn hao năng lượng cao hơn tập trung tại cạnh ngang của cấu trúc chữ H của lớp kim loại cộng hưởng. Quan sát tại Hình 3.36 (c), có thể thấy tổn hao trong lớp vật liệu FeCo-C(10%) chiếm ưu thế so với tổn hao trong cấu trúc. Có thể nói rằng, sự kết hợp của FeCo-C(10%) và cấu trúc MA là lý do chính gây ra tổn hao năng lượng của cấu trúc.



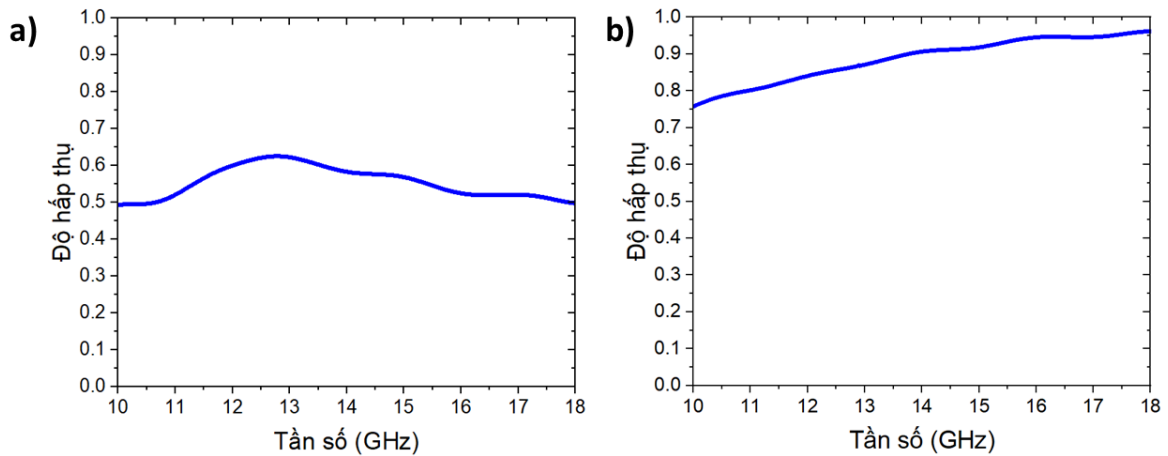
Hình 3.37. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (10%) (a) dưới các góc tới khác nhau của chế độ phân cực a) TE và b) TM

Các nghiên cứu về thay đổi góc tới và phân cực của sóng điện từ tới cũng được tiến hành để đánh giá hiệu suất hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(10%). Cụ thể, khi thay đổi góc tới, kết quả cho thấy khả năng hấp thụ của cấu trúc bị giảm cả về biên độ và băng thông hấp thụ. Dù vậy, cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(10%) vẫn duy trì khả năng hấp thụ tốt trong cả trường hợp phân cực TE và TM của sóng tới. Trong trường hợp phân cực TM, độ hấp thụ giảm khi góc tới tăng từ 0 đến 70° nhưng vẫn duy trì trên 90% trong khoảng từ 11,2 - 15,5 GHz như quan sát trên Hình 3.37 (b), khi đó FBW giảm xuống còn 31%. Trong khi đó ở chế độ TE, cấu trúc duy trì khả năng hấp thụ trên 90% trong dải tần từ 12-15 GHz khi góc tới tăng từ 0 đến 40°, FBW giảm xuống còn 22,2% như được trình bày trên Hình 3.37 (a).

Cấu trúc đề xuất có tính đối xứng không cao, do đó khả năng hấp thụ của cấu trúc bị thay đổi khi góc phân cực thay đổi, để làm rõ hơn điều này, luận án phân tích độ hấp thụ của cấu trúc trong trường hợp góc phân cực và góc tới là 70° để phân tích ảnh hưởng của góc phân cực tới khả năng hấp thụ của cấu trúc. Kết quả được trình bày trong Hình 3.38, cho thấy, ở chế độ TE, độ hấp thụ của cấu trúc trong vùng tần số 10 - 18 GHz chỉ duy trì ở mức dưới 62%, trong khi đó ở chế độ TM, cấu trúc duy trì khả năng hấp thụ tốt hơn, cụ thể, cấu trúc có độ hấp thụ trên 90% trong vùng tần số từ 13,77 GHz đến 18 GHz.

Điều này có thể được giải thích là do ở chế độ phân cực TM, hướng của từ trường không thay đổi khi góc tới thay đổi. Còn đối với chế độ phân cực TE của góc tới, khi góc tới thay đổi, từ trường của sóng tới không còn song song

với bề mặt mẫu, cơ chế hấp thụ của cấu trúc phụ thuộc vào cộng hưởng từ, yếu đi khi góc tới tăng, do đó khả năng hấp thụ của cấu trúc giảm dần.



Hình 3.38. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (10%) của chế độ phân cực a) TE và (b) TM tại góc phân cực 70° và góc tới 70°

3.3 Kết luận chương 3

Trong Chương này, luận án đã tập trung làm rõ cơ chế và giải pháp tăng cường đặc tính hấp thụ của vật liệu từ thông qua cấu trúc vật liệu biến hóa, với vật liệu FeCo-C tích hợp vào cấu trúc CM-MA với vai trò như cấu trúc cộng hưởng và dạng tấm phủ lên cấu trúc. Trên cơ sở các thông số hằng số điện môi và từ thẩm đo được của vật liệu, các mô hình CM-MA đã được thiết kế, mô phỏng, chế tạo và đo đạc, qua đó chứng minh rõ ràng hiệu quả của việc kết hợp vật liệu FeCo-C với cấu trúc MA nhằm mở rộng băng thông và nâng cao cường độ hấp thụ. Các cơ chế hấp thụ và luận giải mở rộng băng thông hấp thụ cũng đã được trình bày.

- Đã thiết kế, mô phỏng cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C với vai trò như cấu trúc cộng hưởng, cấu trúc CM-MA có khả năng hấp thụ dải rộng với độ hấp thụ trên 90% trong vùng tần số từ 7,9 - 14,4 GHz. Độ hấp thụ được duy trì tốt ở chế độ phân cực TE và TM khi thay đổi góc tới từ $0-55^\circ$.

- Đã thiết kế, mô phỏng và chế tạo cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C dưới dạng tấm phủ hấp thụ sóng điện từ dải rộng với 5 tỷ lệ carbon khác nhau, lần lượt là 10%, 50%, 75 %, 90 % và graphene nguyên chất dưới dạng tấm phủ trên cấu trúc MA đục hai lỗ hình tròn. Đối với tỷ lệ carbon tối ưu là 75%, cấu trúc có độ hấp thụ trên 90% với băng thông hấp thụ rộng đạt 9,9 GHz - mô phỏng và 7,7 GHz - thực nghiệm. Cấu trúc hầu như không bị ảnh hưởng bởi góc phân cực. Cấu trúc duy trì khả năng hấp thụ tốt khi thay đổi góc

tới ở cả chế độ phân cực TE (lên tới 40°) và TM, trong đó cấu trúc duy trì khả năng hấp thụ tốt hơn ở chế độ TM (lên tới 70°).

- Đã thiết kế, mô phỏng cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(10%) dưới dạng tấm phủ trên cấu trúc MA hình chữ H có khả năng hấp thụ sóng điện từ dải rộng. Cấu trúc có độ hấp thụ trên 90% trong vùng tần số từ 11,2 đến 16 GHz. CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C(10%) vẫn có đặc tính hấp thụ tốt trong cả trường hợp phân cực TE và TM của sóng tới.

CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN BIÊN ĐỘ VÀ TẦN SỐ HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU DỰA TRÊN TỔ HỢP VẬT LIỆU TỪ NỀN MFe_2O_4 VÀ VẬT LIỆU BIẾN HÓA

Trong các cấu trúc MA, khi sử dụng lớp điện môi hoặc tổn hao điện thuần túy, phổ hấp thụ thường bị cố định sau chế tạo do các tham số hình học và điện môi hầu như không thay đổi, khiến đỉnh cộng hưởng và tần số hấp thụ khó hiệu chỉnh theo điều kiện làm việc thực tế. Vì vậy, để vừa tăng cường độ hấp thụ vừa điều chỉnh được dải tần hấp thụ, có thể áp dụng các tác động ngoại vi như cơ, nhiệt, điện..., trong đó luận án lựa chọn từ trường ngoài vì đây là cơ chế điều khiển không tiếp xúc, thuận nghịch và có thể điều chỉnh liên tục. Cơ sở của cách tiếp cận này là độ từ thẩm phức của vật liệu từ biến đổi mạnh theo từ trường, đặc biệt gần vùng FMR, từ đó làm thay đổi điều kiện phối hợp trở kháng, dẫn đến biến thiên cường độ hấp thụ hoặc dịch chuyển tần số hấp thụ. Mặc dù FeCo-C có khả năng hấp thụ mạnh và dải rộng, vật liệu này không tối ưu cho điều khiển bằng từ trường ngoài do thành phần carbon làm tăng tính dẫn điện, gây dòng xoáy, phổ cộng hưởng từ bị mở rộng bởi suy hao lớn và các cơ chế chồng lấn, đồng thời với vật liệu có từ độ bão hòa lớn như FeCo, dễ tạo dịch chuyển FMR đáng kể thường cần từ trường phân cực cao, làm giảm tính thực dụng trong thiết kế MA [184]. Hệ vật liệu từ mềm ferrite spinel thể hiện tán sắc độ từ thẩm và các đặc trưng cộng hưởng trong vùng tần số rộng, có thể mở tới vùng GHz cao (thậm chí hàng chục GHz tùy công nghệ chế tạo), tạo điều kiện thuận lợi để khai thác điều khiển phổ hấp thụ của MA trong dải 2 - 18 GHz. Bên cạnh đó, loại vật liệu này có điện trở suất cao, giúp hạn chế dòng điện xoáy và suy hao dẫn điện ở tần số vi sóng, nhờ đó duy trì đáp ứng từ tốt hơn so với các hệ kim loại từ dẫn điện mạnh. Ngoài ra, với mức từ hóa bão hòa phù hợp, độ nhạy của độ từ thẩm theo từ trường có thể quan sát rõ trong miền từ trường khả thi về mặt thực nghiệm.

$MgFe_2O_4$ (MFO) là ferrite spinel thuộc nhóm vật liệu sắt từ mềm với điện trở suất tương đối cao, ổn định hóa học và có thể điều chỉnh tính chất bằng vi cấu trúc (kích thước hạt, độ đặc, khuyết tật) hoặc pha tạp. Ở nhiệt độ phòng, MFO vẫn duy trì từ tính mạnh, có lực kháng từ thấp, thường dưới 100 Oe, thể hiện rõ đặc trưng từ mềm [185-187]. Trong các hệ hấp thụ vi sóng, MFO thường được sử dụng như thành phần từ tạo tổn hao từ, kết hợp với các pha khác để

đồng thời tối ưu tổn hao và phối hợp trở kháng [188, 189]. So với YIG, vốn có tổn hao từ thấp và phù hợp hơn ở dải tần thấp, MFO có ưu thế hơn trong điều khiển hấp thụ ở vùng GHz nhờ tính từ mềm, điện trở suất cao và độ từ thẩm tán sắc mạnh, do đó thích hợp để phối hợp với cấu trúc MA nhằm điều chỉnh tần số hấp thụ.

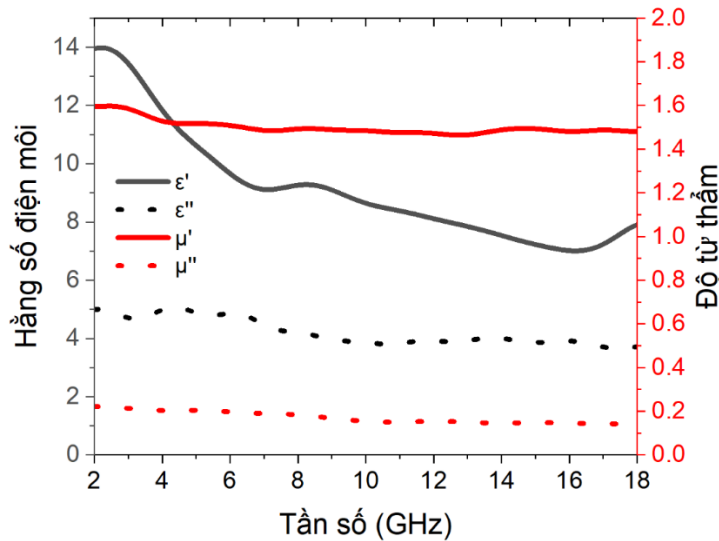
Ngoài ra, các nghiên cứu gần đây cho thấy, $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (NZFO) có M_s cỡ 40 - 60 emu/g, H_c chỉ vài chục Oe và được xếp vào nhóm vật liệu từ mềm. Phổ từ thẩm của vật liệu xuất hiện cộng hưởng từ trong vùng từ hàng trăm MHz đến vài GHz; ở kích thước nano còn có thêm các cơ chế tổn hao liên quan đến quay mô men trong các hạt đơn đômen. Trong nhóm ferrite Ni-Zn từ mềm, $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ thường được lựa chọn như pha mềm điển hình nhờ μ' tương đối cao, tổn hao từ thích hợp và khả năng điều chỉnh tính chất thông qua chất pha trộn. Đây cũng là một trong những lý do khiến Ni-Zn ferrite nói chung, và $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nói riêng, được sử dụng rất nhiều trong các tổ hợp vật liệu hấp thụ sóng radar dựa trên ferrite [100]. Mặt khác sự có mặt của ion Zn^{2+} sẽ góp phần cải thiện hằng số điện môi của vật liệu, làm tăng cường khả năng phân cực điện trong điện trường ngoài, làm tăng tổn hao điện môi. Điều này giúp tăng cường và mở rộng băng thông hấp thụ sóng điện từ của vật liệu. Các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng để tăng cường đồng thời độ từ thẩm và hằng số điện môi của vật liệu, hàm lượng pha 0,5 được coi là tỉ phần pha cân bằng nhất [190, 191]. Trên cơ sở đó, luận án lựa chọn hệ vật liệu $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ và MgFe_2O_4 để tích hợp vào MA nhằm điều khiển cường độ giữ nguyên tần số cộng hưởng và tần số hấp thụ của CM-MA thông qua từ trường ngoài.

4.1. Điều khiển cường độ hấp thụ của tổ hợp vật liệu

4.1.1. Thiết kế cấu trúc tổ hợp vật liệu sử dụng tâm phủ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

Các kết quả nghiên cứu sử dụng cấu trúc này của luận án đã được công bố trong tạp chí trong nước [161]. Trước hết, vật liệu từ mềm $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (NZFO) được chế tạo bằng phương pháp nghiền cơ năng lượng cao kết hợp với nung thiêu kết từ các oxit NiO, ZnO và Fe_2O_3 theo tỷ lệ khối lượng tương ứng. Hỗn hợp được nghiền bằng máy nghiền bi năng lượng cao trong 30 phút trong môi trường không khí. Sau khi trộn, hỗn hợp bột được ép thành viên với áp suất 7000 kg/cm². Các viên ép được thiêu kết trong không khí ở 1000 °C với tốc độ gia nhiệt 5 °C/phút. Sau đó, mẫu được làm nguội tự nhiên trong lò về nhiệt độ phòng. Sau quá trình thiêu kết, mẫu tiếp tục được nghiền bi năng lượng cao

trong không khí trong 2 giờ, thu được sản phẩm cuối cùng là bột mịn. Như kết quả đã phân tích trong Chương 2, cho thấy vật liệu có tính sắt từ yếu, gần với thuận từ, với lực kháng từ H_c chỉ 40 Oe và độ từ hóa bão hòa M_s là 22 emu/g. Với lực kháng từ và từ độ thấp như vậy, vật liệu NZFO do luận án chế tạo dễ bị từ hóa và khử từ, phù hợp với mục tiêu nghiên cứu nhằm sử dụng từ trường ngoài để tăng cường khả năng hấp thụ sóng điện từ.



Hình 4.1. Giá trị độ điện thẩm và từ thẩm theo tần số (phần thực và phần ảo) của vật liệu NZFO

Các đường cong phụ thuộc tần số của phần thực và phần ảo của độ từ thẩm và hằng số điện môi phức của NZFO được đo bằng máy phân tích mạng vectơ Keysight PNA-X N5242A (Hình 4.1). Trong thí nghiệm, hỗn hợp đồng nhất được chuẩn bị bằng cách trộn vật liệu NZFO với sáp paraffin, trong đó NZFO chiếm 40% tổng khối lượng. Tổ hợp vật liệu cuối cùng có độ dày 2,5 mm được ép thành dạng vành khuyên (toroid) với đường kính trong 3,04 mm và đường kính ngoài 7,0 mm. Mẫu vành khuyên được đặt trong ống dẫn sóng đồng trục phù hợp với thiết bị phân tích. Sử dụng phương pháp ống dẫn sóng, thiết bị đo các tham số tán xạ S_{11} (hệ số phản xạ) và S_{12} (hệ số truyền qua) trên toàn dải tần số mong muốn. Phương pháp NRW được dùng để tính độ điện thẩm (ϵ) và độ từ thẩm (μ) phức từ dữ liệu tán xạ, tách riêng các thành phần thực và ảo. Các giá trị phức này của độ điện thẩm và từ thẩm NZFO được sử dụng trong mô phỏng CST.

Các kết quả tính toán độ điện thẩm (ϵ) và độ từ thẩm (μ) phức của NZFO được thể hiện trong Hình 4.1 cho thấy ϵ' giảm mạnh theo tần số, cụ thể xấp xỉ 14

(2 GHz) và giảm xuống còn khoảng 7 - 8 (18 GHz); ϵ'' ở mức tương đối lớn và giảm nhẹ từ khoảng xấp xỉ 5 trong vùng tần số từ 2 đến 6 GHz và giảm xuống còn xấp xỉ 3,6 - 4 trong vùng từ 10 - 18 GHz. Có thể thấy tổn hao điện môi chiếm ưu thế, $\tan \delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$, giá trị cỡ 0,35 - 0,5 và có xu hướng tăng tương đối về phía tần số cao. Phổ μ' gần như phẳng và chỉ hơi giảm, cụ thể xấp xỉ 1,55 (2 GHz) giảm xuống còn khoảng 1,45 - 1,5 (18 GHz), μ'' nhỏ và giảm dần từ khoảng 0,18 (2 GHz) xuống còn 0,1 (18 GHz). Về tổng thể, phần thực và phần ảo của hằng số điện môi lớn hơn đáng kể so với độ từ thẩm, chứng tỏ tổn hao điện môi đóng vai trò chi phối trong NZFO và tổn hao từ yếu trong khoảng tần số 2 - 18 GHz. Các kết quả này cho thấy, NZFO phù hợp để có thể tích hợp nhằm cải thiện khả năng hấp thụ của MA, các tính chất từ này có thể được điều chỉnh một cách chủ động bằng từ trường ngoài, từ đó làm thay đổi độ từ thẩm của vật liệu. Cơ chế này cung cấp một phương thức quan trọng để điều chỉnh phối hợp trở kháng tổng thể của cấu trúc HM-MA, từ đó cải thiện khả năng hấp thụ. Ngoài ra, bản chất hấp thụ của cấu trúc MA chủ yếu bị chi phối bởi cộng hưởng LC; do đó, phổ hấp thụ thường hẹp. Việc tích hợp NZFO nhằm bổ sung thêm các cơ chế tổn hao vào toàn bộ cấu trúc, qua đó mở rộng băng thông hấp thụ.

Để làm rõ hơn mức độ cải thiện độ rộng phổ hấp thụ khi tích hợp vật liệu NZFO vào cấu trúc MA, Độ bán rộng phổ (Full Width at Half Maximum - FBW) của phổ hấp thụ cũng được tính bằng phương trình sau:

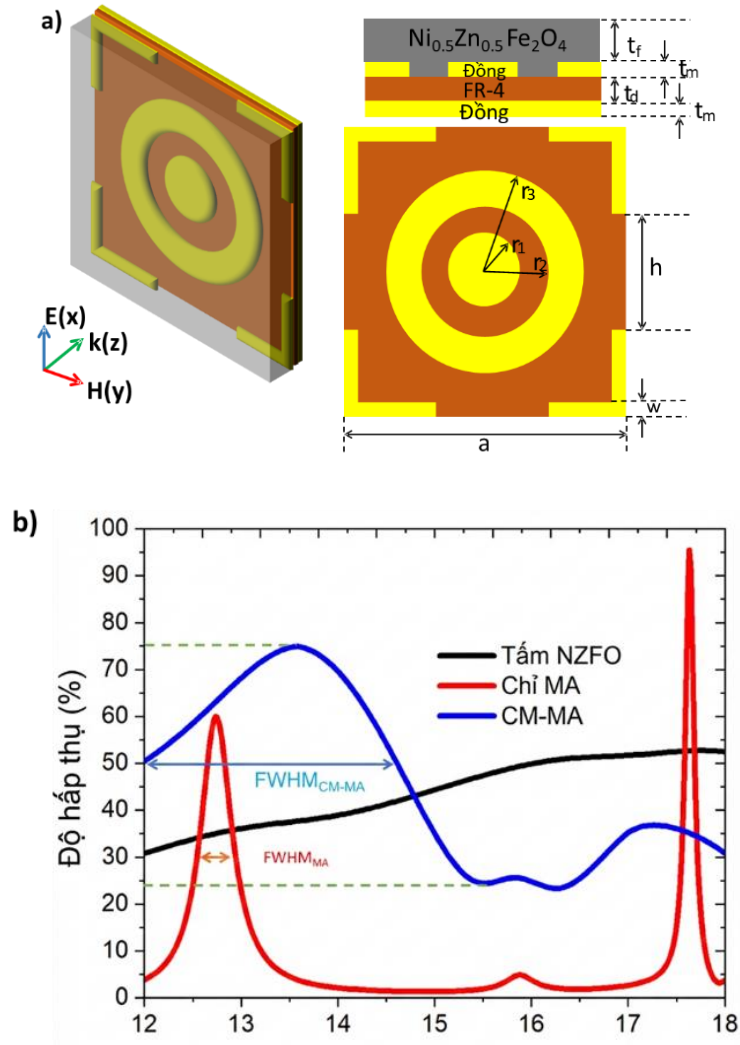
$$FWHM = f_{high} - f_{low}, \quad (4.1)$$

trong đó, f_{high} và f_{low} là các tần số cao nhất và thấp nhất mà tại đó độ hấp thụ đạt đến một nửa biên độ cực đại. Biên độ này được định nghĩa là hiệu số giữa cường độ cực đại và đường nền cơ sở.

4.1.2. Điều khiển cường độ hấp thụ của tổ hợp vật liệu bằng từ trường ngoài

Cấu trúc vật liệu hấp thụ CM-MA sử dụng trong mô phỏng và thực nghiệm có kích thước hình học giống như trong Chương 3.2, cụ thể kích thước ô cơ sở $20 \times 20 \text{ mm}^2$ (Hình 4.2a) và gồm bốn lớp. Lớp trên cùng là vật liệu NZFO với độ dày t_f ; lớp thứ hai là lớp đồng gồm hai vòng đục lỗ có bốn cạnh dạng chữ L mở; lớp thứ ba là điện môi FR-4 có độ dày t_d , hằng số điện môi tương đối 4,3 và hệ số tổn hao 0,025 và cuối cùng là lớp đáy là tấm đồng liên tục với độ dày t_m và độ dẫn điện $5,8 \times 10^7 \text{ S/m}$. Cấu trúc có các tham số: $a = 20$

mm, $h = 6$ mm, $w = 1$ mm, $t_f = 1,5$ mm, $t_d = 0,3$ mm, $t_m = 0,036$ mm, $r_1 = 3$ mm, $r_2 = 5$ mm và $r_3 = 7$ mm.

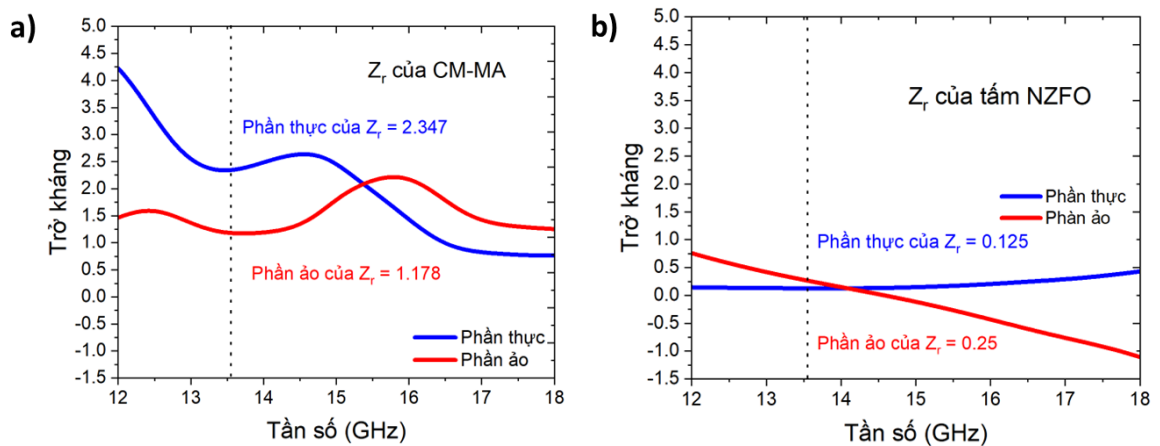


Hình 4.2. a) Sơ đồ cấu trúc ô cơ sở CM-MA sử dụng vật liệu NZFO và các tham số cấu trúc b) So sánh phổ hấp thụ mô phỏng của vật liệu NZFO, cấu trúc vật liệu biến hóa và CM-MA sử dụng NZFO.

Hình 4.2 (b) biểu thị sự so sánh phổ hấp thụ của CM-MA sử dụng NZFO, vật liệu NZFO thông thường và khi chỉ có MA trong vùng tần số Ku. Kết quả cho thấy, tích hợp vật liệu NZFO vào cấu trúc MA giúp tăng cường và mở rộng phổ hấp thụ so với MA và vật liệu NZFO thông thường. Đối với NZFO thông thường cùng độ dày với CM-MA, độ hấp thụ chỉ đạt khoảng từ 30% đến 51% trong vùng tần số khảo sát. Đối với MA không có NZFO, chỉ có một đỉnh hấp thụ tại 17,8 GHz với độ hấp thụ khoảng 96% và một đỉnh tại 12,9 GHz với độ hấp thụ ngưỡng 60% với độ bán rộng phổ FWHM khoảng 0,5 GHz. Ngược lại,

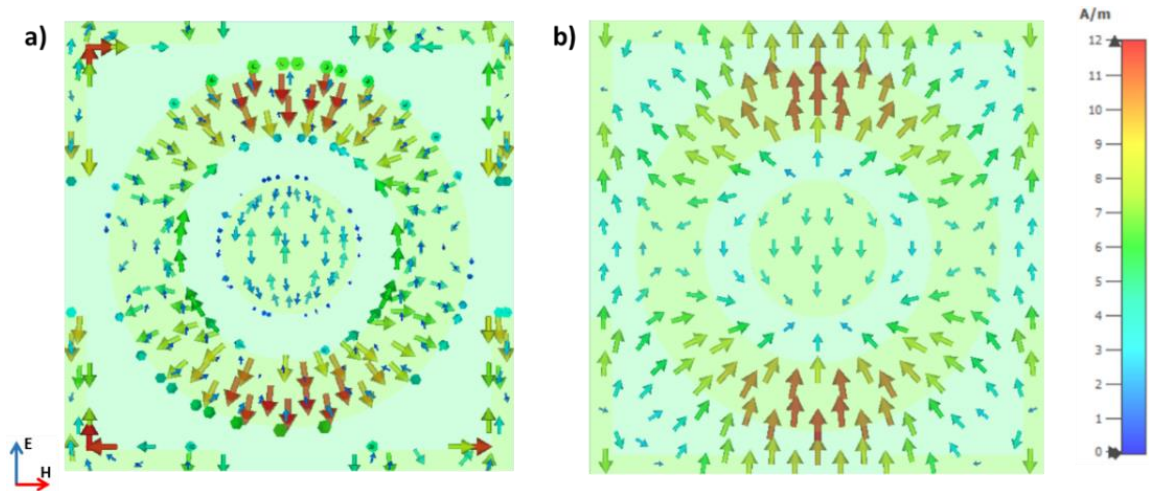
cấu trúc CM-MA có dải hấp thụ trên 70% trong khoảng 13,1 - 14,1 GHz với đỉnh hấp thụ tại 13,59 GHz có độ hấp thụ 75%, FWHM tăng lên khoảng 4,6 GHz.

Các giá trị trở kháng tương đối Z_r của CM-MA và vật liệu NZFO được tính toán theo công thức 3.2 được trình bày trong Hình 4.3 (a-b), phù hợp với lý thuyết phối hợp trở kháng và phổ hấp thụ của CM-MA. Ở tần số 13,59 GHz, mẫu CM-MA thể hiện khả năng phối hợp trở kháng tốt với không khí, với phần thực của trở kháng tương đối $\text{Re}(Z_r)$ đạt 2,35 và phần ảo $\text{Im}(Z_r)$ đạt 1,18. Điều này cho thấy cho thấy phản xạ ở bề mặt đã được suy giảm đáng kể, tạo điều kiện để sóng đi vào cấu trúc và bị tiêu tán. Ngược lại, mẫu NZFO có giá trị phần thực $\text{Re}(Z_r)$ đạt 0,13 và phần ảo $\text{Im}(Z_r)$ đạt 0,25 tại cùng tần số, cho thấy sự không phối hợp trở kháng với không khí (phần thực $\text{Re}(Z_{KK})$ bằng 1 và phần ảo $\text{Im}(Z_{KK})$ bằng 0). Do đó, việc tích hợp MA đã điều chỉnh hiệu quả trở kháng hiệu dụng tiến gần hơn tới trở kháng của không khí, phù hợp với đỉnh hấp thụ được tăng cường tại 13,59 GHz.

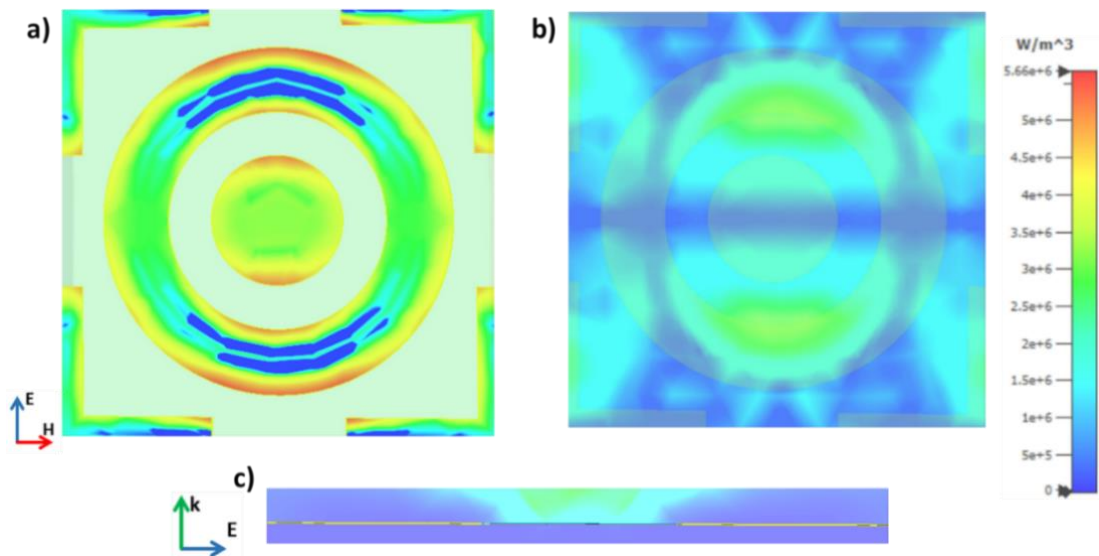


Hình 4.3. a) Phần thực và phần ảo trở kháng Z_r của CM-MA sử dụng NZFO và b) Phần thực và phần ảo trở kháng Z_r của tấm NZFO

Vì đỉnh hấp thụ cao nhất của CM-MA xuất hiện tại 13,59 GHz, luận án chọn tần số này cho chế độ phân cực TE và khảo sát phân bố dòng điện bề mặt và mật độ tổn hao năng lượng (Hình 4.4 và Hình 4.5) nhằm làm rõ cơ chế hấp thụ. Ở 13,59 GHz, dòng điện bề mặt tập trung mạnh tại vòng ngoài, một phần ở vòng trung tâm và các cạnh dạng chữ L. Dòng điện trên lớp kim loại cộng hưởng phía trên song song và ngược chiều với lớp kim loại dưới cùng, chứng tỏ cơ chế cộng hưởng của đỉnh hấp thụ là cộng hưởng từ. Cộng hưởng từ giúp phối hợp trở kháng và sóng điện từ bị tiêu hao mạnh khi đi vào trong cấu trúc, hình thành đỉnh hấp thụ tại tần số này.

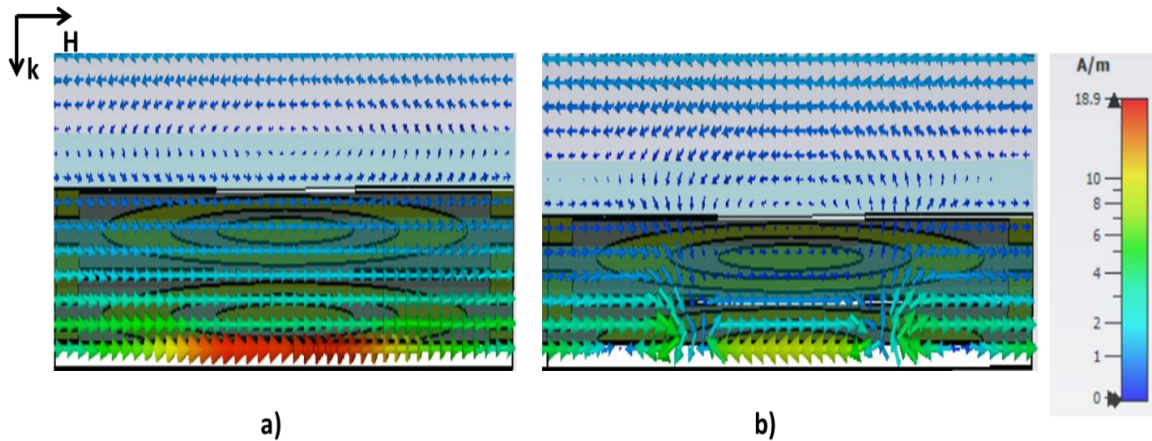


Hình 4.4. Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt (a) mặt trên cấu trúc tuần hoàn (b) Mặt sau tấm phản xạ tại tần số 13,59 GHz của CM-MA sử dụng NZFO



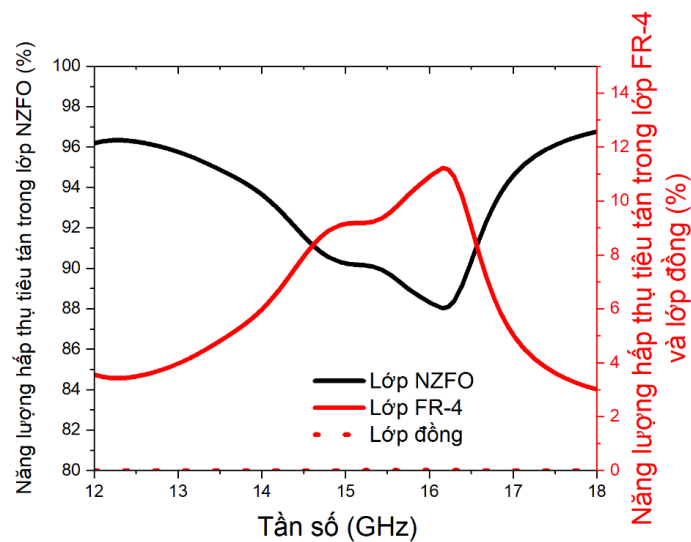
Hình 4.5. Mô phỏng tổn hao năng lượng trên mặt cắt ngang của (a-b) trong mặt phẳng (E, H) , trên lớp kim loại, (c) trong mặt phẳng (E, k) ở tần số 13,59 GHz của CM-MA sử dụng NZFO

Hình 4.5 cho thấy năng lượng tổn hao chủ yếu tập trung tại vòng ngoài, đĩa tròn trung tâm và các cạnh chữ L. Tổn hao trong vật liệu từ chiếm ưu thế trong cấu trúc vật liệu CM-MA. Điều này chứng minh sự kết hợp giữa NZFO và cấu trúc MA là nguyên nhân chính tạo ra tổn hao năng lượng, phù hợp với tài liệu [140, 160].



Hình 4.6. Mô phỏng phân bố từ trường của cấu trúc CM-MA trong mặt phẳng (H, k) : (a) tại mặt cắt với vòng tròn ngoài và (b) tại vị trí $y = 0$.

Để làm rõ cách sóng điện từ tương tác với CM-MA, sự phân bố từ trường tại tần số 13,59 GHz trong mặt phẳng (H, k) đã được phân tích tại hai vị trí mặt cắt với vòng tròn ngoài và vị trí $y = 0$, kết quả được trình bày trong Hình 4.8. Từ Hình 4.6(a) có thể thấy từ trường bị kích thích tại vòng tròn ngoài và một phần tại các cạnh hình chữ L tương ứng với các vị trí tập trung dòng điện như đã phân tích tại Hình 4.4. Tại vị trí $y = 0$, một phần từ trường tập trung tại đĩa tròn trung tâm. Trong cả hai trường hợp, từ trường tại lớp NZFO là không lớn, cho thấy đóng góp của NZFO cho hấp thụ của CM-MA không phải cộng hưởng từ mà do phối hợp trở kháng.

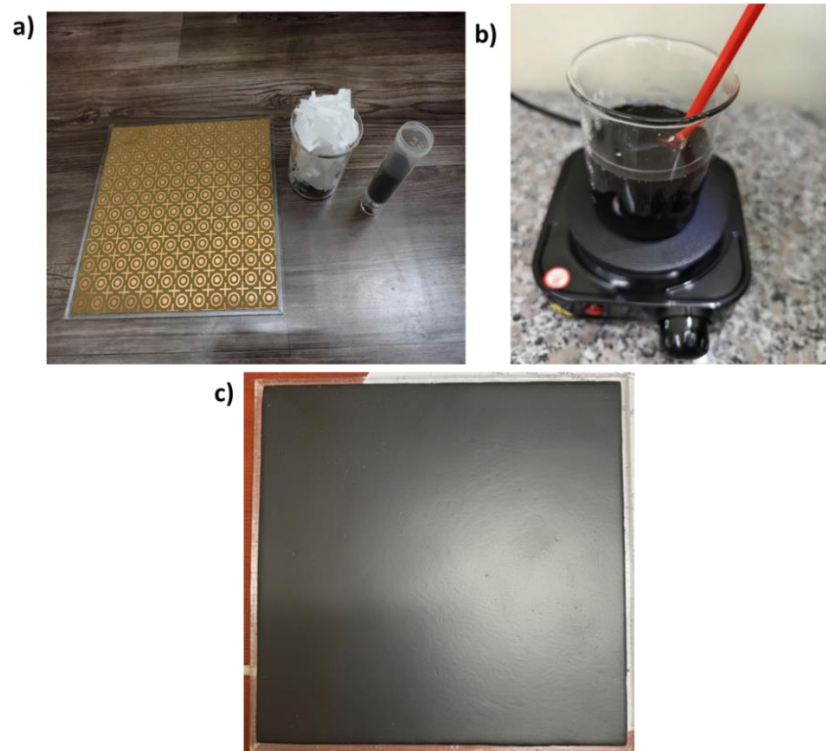


Hình 4.7. Tiêu tán năng lượng tại các lớp vật liệu NZFO, FR-4 và đồng của cấu trúc CM-MA

Để làm rõ vai trò của các lớp trong cấu trúc CM-MA, luận án đã tiến hành nghiên cứu năng lượng tiêu tán trong các lớp của cấu trúc. Hình 4.7 cho

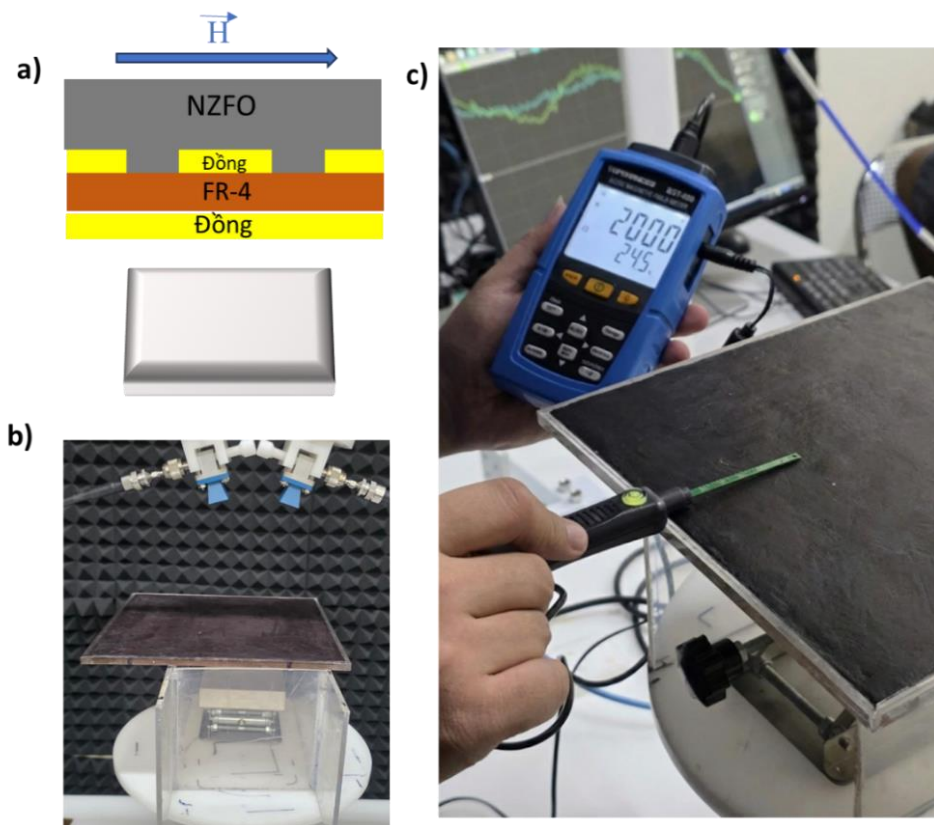
thấy hơn 87% năng lượng bị tiêu tán trong lớp NZFO, trong khi FR-4 và đồng chỉ chiếm 13%. Điều này chứng tỏ NZFO là lớp đóng vai trò quyết định trong khả năng hấp thụ dải rộng.

Cuối cùng, mẫu đã được chế tạo và đo đạc thực nghiệm. Lớp vật liệu từ được đưa vào MA bằng khuôn mica và chất kết dính paraffin, với tỷ lệ khối lượng NZFO: paraffin là 60 : 40. Quá trình phủ vật liệu NZFO lên tấm MA được trình bày trong Hình 4.8. Thiết lập thực nghiệm sử dụng máy phân tích mạng vectơ ZNB20 cùng hai anten phân cực tuyến tính (12 - 18 GHz) để chiếu và thu tín hiệu phản xạ - truyền qua, với góc tới nhỏ 10° . Nhằm điều khiển độ hấp thụ của cấu trúc CM-MA, từ trường ngoài song song bề mặt mẫu đã được áp dụng, với cường độ thay đổi từ 0 - 2000 Oe bằng cách đưa nam châm đất hiếm NdFeB với kích thước $100 \times 100 \times 25 \text{ mm}^3$ phía dưới mẫu CM-MA [Hình 4.9 (b - c)]. Trong nghiên cứu này, từ trường tác dụng lên mẫu vật liệu được tạo ra bởi nam châm vĩnh cửu, tương ứng với từ trường tĩnh. Do đó, các cơ chế sinh nhiệt chủ yếu như dòng điện xoáy và tổn hao từ trễ là không đáng kể. Vì vậy, trong luận án này, có thể bỏ qua việc ảnh hưởng của hiệu ứng sinh nhiệt đến biến đổi tính chất của mẫu.



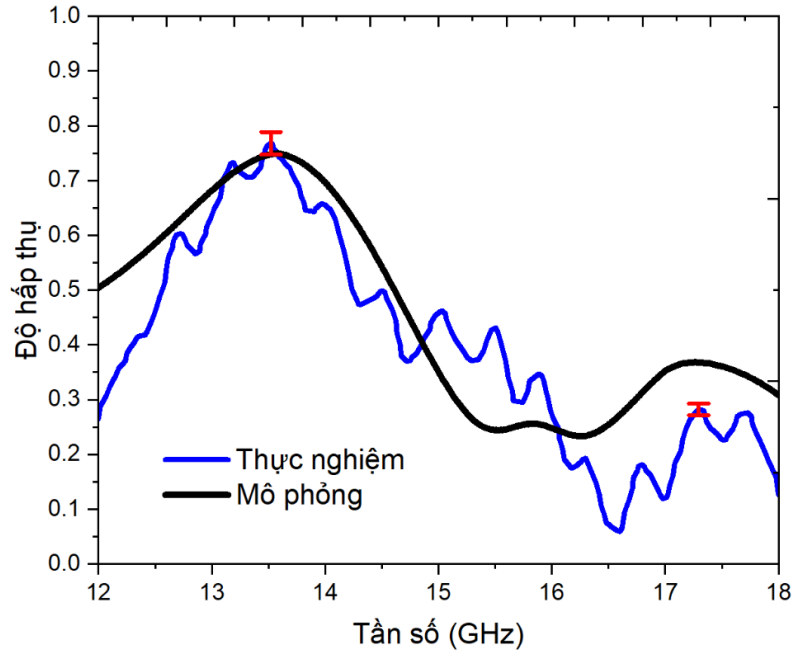
Hình 4.8. Quá trình chế tạo mẫu: a) chuẩn bị cấu trúc MA; b) Phối trộn NZFO với paraffin và c) mẫu CM-MA sử dụng NZFO sau khi chế tạo

Trong thí nghiệm, từ trường ngoài tác dụng lên mẫu được tạo ra bằng nam châm đất hiếm NdFeB, cho phép đạt được cường độ từ trường lớn và ổn định. Nam châm được đặt phía dưới mẫu và gắn trên giá nâng điều chỉnh bằng trục vít, nhờ đó khoảng cách giữa nam châm và mẫu có thể thay đổi linh hoạt để điều chỉnh cường độ từ trường tác dụng. Giá trị từ trường tại vị trí đặt mẫu được xác định và hiệu chuẩn bằng đầu dò Hall, với đầu dò được đo tại tâm mẫu trước khi tiến hành phép đo nhằm bảo đảm độ chính xác của từ trường tác dụng thực tế. Toàn bộ hệ gồm mẫu, nam châm và giá nâng được bố trí trong vùng đo hấp thụ sóng điện từ của hệ VNA. Do đặc tính của nam châm vĩnh cửu, từ trường tạo ra có độ ổn định cao theo thời gian. Độ đồng đều của từ trường được đánh giá thông qua việc khảo sát phân bố cường độ từ trường trong vùng đặt mẫu bằng phép đo với đầu dò Hall tại nhiều vị trí khác nhau. Do hạn chế về kích thước của nam châm đất hiếm, các loa phát và thu có kích thước nhỏ đã được sử dụng để phù hợp cho vùng đo chứa các ô cơ sở của vật liệu biến hóa nằm hoàn toàn trong diện tích nam châm. Kết quả cho thấy sự biến thiên cường độ từ trường trong vùng diện tích vật liệu biến hóa khảo sát vào khoảng 5% so với giá trị trung bình.



Hình 4.9. a) Bố trí từ trường trong hệ đo và (b-c) đo đạc thực nghiệm khả năng điều khiển biên độ hấp thụ bằng từ trường ngoài

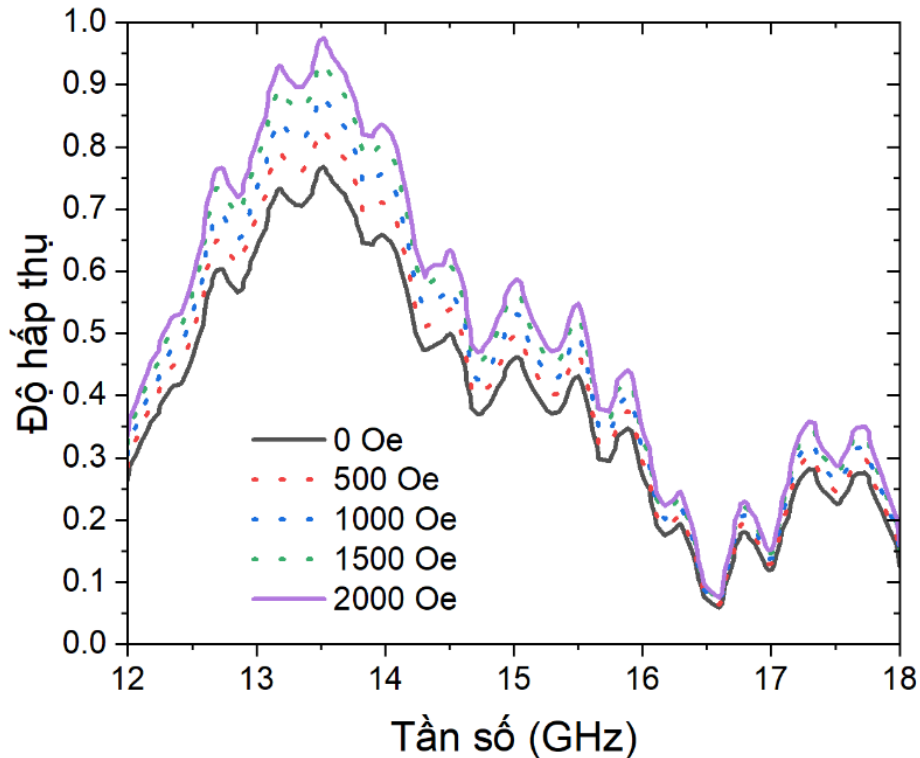
Kết quả đo thực nghiệm phổ hấp thụ của CM-MA khi chưa áp dụng từ trường ngoài thu được cho thấy sự tương đồng khá tốt giữa mô phỏng và thực nghiệm (Hình 4.10). Sai khác có thể đến từ bề mặt mẫu không phẳng sau khi đóng rắn, làm thay đổi độ dày tại các điểm đo.



Hình 4.10. So sánh phổ hấp thụ mô phỏng và thực nghiệm cấu trúc CM-MA sử dụng NZFO

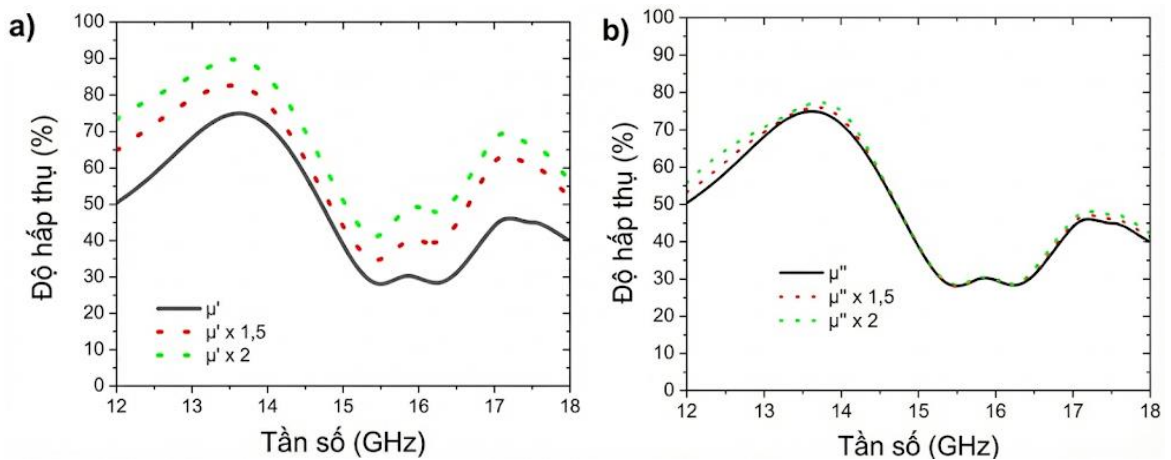
Sau khi áp dụng từ trường ngoài vào cấu trúc, kết quả đo thực nghiệm phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA được trình bày trong Hình 4.11, cho thấy khi cường độ từ trường ngoài tăng, khả năng hấp thụ tăng theo, cụ thể đối với đỉnh hấp thụ tại 13,59 GHz, cường độ hấp thụ được tăng cường 22%, tăng từ 75% đến 97%, tại vùng tần số cao hơn từ 17 - 18 GHz, cường độ hấp thụ của cấu trúc được tăng cường khoảng 10% (dao động từ 25% đến 35%), tương ứng độ hấp thụ tăng 0,011%/Oe. Cơ chế tăng cường độ hấp thụ được giải thích là do khi tăng cường độ từ trường, dẫn đến tăng giá trị của độ từ thẩm vật liệu NZFO mà không làm dịch chuyển tần số dao động hoặc cộng hưởng của vật liệu NZFO. Kết quả là trở kháng của cấu trúc tổ hợp thay đổi và biên độ hấp thụ của cấu trúc được tăng cường mà không làm dịch chuyển tần số của phổ hấp thụ. Tuy nhiên, cường độ hấp thụ của cấu trúc được tăng cường không hoàn toàn đồng đều trong toàn bộ dải tần từ 12 - 18 GHz. Điều này có thể là do từ trường không được phân bố hoàn toàn đồng đều trong diện tích mẫu được khảo sát (có sự chênh lệch cường độ từ trường khoảng 5%). Luận án cũng tiến hành một thí nghiệm tương tự khi thay đổi hướng của từ trường, theo phương vuông

góc và đi xuyên qua mẫu; tuy nhiên, phổ hấp thụ của cấu trúc không thay đổi khi giá trị từ trường tăng lên. Điều này cho thấy hướng của từ trường có ảnh hưởng đến khả năng hấp thụ của cấu trúc vật liệu.



Hình 4.11. Phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA được tăng cường khi thay đổi giá trị từ trường từ 0 đến 2000 Oe

Để giải thích giả định này, luận án đã tiến hành mô phỏng ảnh hưởng của phần thực và phần ảo của độ từ thẩm của vật liệu NZFO khi tăng giá trị lên 1,5 và 2 lần đến phổ hấp thụ của CM-MA, kết quả được trình bày trong Hình 4.12.

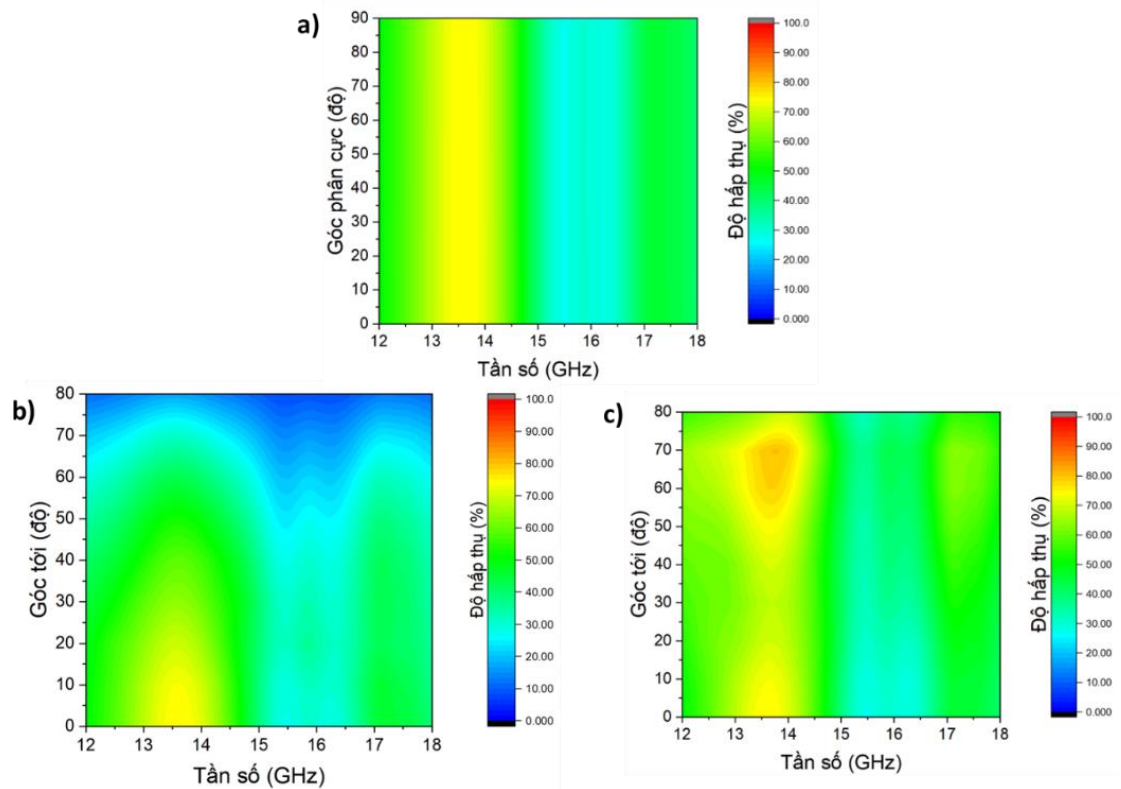


Hình 4.12. Kết quả mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi tăng giá trị của a) phần thực và b) phần ảo độ từ thẩm của vật liệu NZFO lên 1,5 và 2 lần

Như quan sát trên Hình 4.12 (a), khi tăng giá trị phần thực độ từ thẩm của vật liệu NZFO, phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA không thay đổi về hình dạng, không dịch chuyển tần số hấp thụ mà cấu trúc chỉ tăng cường độ hấp thụ. Đối với trường hợp tăng giá trị phần ảo độ từ thẩm của vật liệu NZFO, phổ hấp thụ gần như không đổi, biên độ hấp thụ tăng không đáng kể. Có thể nói rằng, phần thực của độ từ thẩm đóng vai trò chi phối trong việc góp phần làm tăng cường độ hấp thụ.

Trên cơ sở các kết quả đã đạt được, nghiên cứu trong thời gian tới có thể được định hướng theo hướng tối ưu các đặc trưng từ của vật liệu NZFO, đặc biệt là độ từ thẩm và mức độ phụ thuộc của nó vào từ trường ngoài, nhằm nâng cao khả năng phối hợp trở kháng của cấu trúc CM-MA trên dải tần rộng. Đây là cơ sở quan trọng để phát triển các cấu trúc hấp thụ có khả năng điều khiển phổ hấp thụ trên dải rộng, thay vì chỉ giới hạn ở việc điều khiển một đỉnh hấp thụ đơn lẻ.

Để đánh giá hiệu suất hấp thụ của cấu trúc CM-MA, các nghiên cứu về thay đổi góc tới và phân cực của sóng điện từ tới cũng được tiến hành. Kết quả cho thấy rằng, cấu trúc hầu như không bị ảnh hưởng bởi góc phân cực [Hình 4.13 (a)]. Tuy nhiên, độ hấp thụ của CM-MA thay đổi về biên độ khi góc tới thay đổi [Hình 4.13 (b) và (c)] cả trong phân cực TE và phân cực TM. Cụ thể, ở chế độ TE, độ hấp thụ giảm từ 75% xuống còn 60% khi góc tới đạt 40° và tiếp tục giảm xuống còn 17% khi góc tới đạt 80° , như minh họa trong Hình 4.13(b). Tuy nhiên đối với phân cực TM, độ hấp thụ giảm từ 75% xuống còn 67% khi góc tới tăng từ 0 đến 30° và tăng trở lại đến 79% khi góc tới tăng từ 30 đến 70° và giảm xuống còn 66% khi góc tới đạt 80 , như thể hiện trong Hình 4.13(c). Các đặc điểm hấp thụ của cấu trúc cho thấy cường độ hấp thụ tốt hơn ở chế độ TM so với chế độ TE. Hiện tượng này có thể được hiểu bằng cách phân tích sự liên kết của từ trường tới. Khả năng duy trì độ hấp thụ ở chế độ TE kém hiệu quả hơn so với chế độ TM là do ở chế độ TE, hướng từ trường lệch khỏi hướng song song với mặt phẳng mẫu. Cơ chế cộng hưởng của cấu trúc CM-MA phụ thuộc vào cộng hưởng từ, do đó độ hấp thụ yếu đi khi góc tới tăng Ở chế độ TM, hướng từ trường không đổi khi góc tới thay đổi, tuy nhiên khi góc tới thay đổi, dòng điện trên cấu trúc không đều, dẫn đến trở kháng cấu trúc thay đổi, do đó, phổ hấp thụ có sự thay đổi về cường độ.



Hình 4.13. Phổ hấp thụ của cấu trúc (a) dưới các góc phân cực khác nhau và các góc tới khác nhau của chế độ phân cực (b) TE và (c) TM

Bảng 4.1 So sánh kết quả cấu trúc CM-MA sử dụng NZFO điều khiển đặc tính hấp thụ bằng từ trường ngoài so với các nghiên cứu khác

STT	Vật liệu	Từ trường áp dụng (Oe)	Độ dày cấu trúc (mm)	Điều chỉnh cường độ hấp thụ	Tài liệu tham khảo
1.	Ferrite magie	0 - 1950	2	Có (tăng 14%, trong vùng tần số 10,99 - 11,29)	[32]
2.	Yttri sắt garnet	0-2000 3200-6000	5	Không	[31]
3.	Yttri sắt garnet	1600 - 2650 1600-2000	1,4 (5 lớp)	Không	[143]
4.	NZFO	0 - 2000	1,8	Có (tăng 22%, tại tần số 13,59 GHz)	Nghiên cứu này

Cuối cùng, kết quả của nghiên cứu được so sánh với các nghiên cứu trước đây về việc điều khiển đặc tính hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu từ thông qua từ trường ngoài. Kết quả của nghiên cứu của luận án đã tăng cường độ hấp thụ của CM-MA trong khi không làm thay đổi tần số cộng hưởng so với

các nghiên cứu khác khi tập trung nghiên cứu điều khiển tần số hấp thụ, có nghiên cứu khi áp dụng từ trường ngoài vào cấu trúc có cho thấy sự tăng cường độ hấp thụ, tuy nhiên xảy ra khi dịch chuyển tần số cộng hưởng.

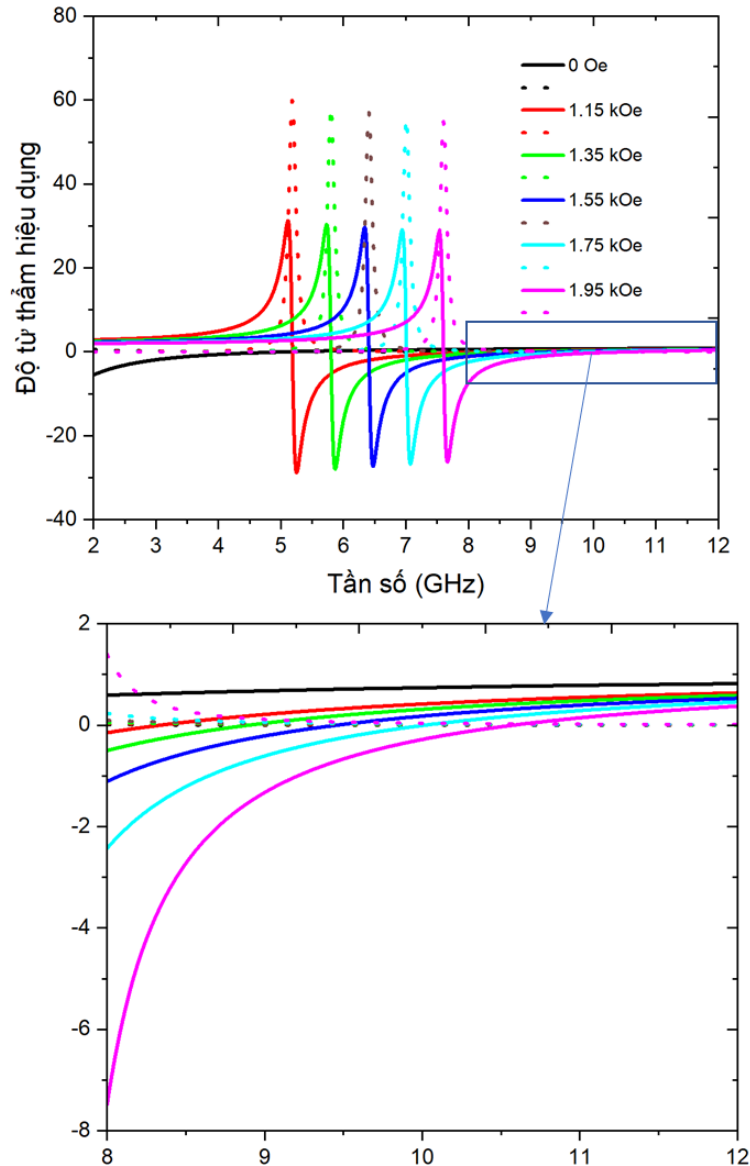
4.2 Điều khiển tần số hấp thụ của tổ hợp vật liệu

4.2.1. Thiết kế cấu trúc tổ hợp vật liệu sử dụng tấm phủ $MgFe_2O_4$

Các nghiên cứu về điều khiển tần số hấp thụ của tổ hợp vật liệu CM-MA hiện còn hạn chế, cơ bản các nghiên cứu đều cho phổ hấp thụ đơn đỉnh. Trong mục này, luận án trình bày kết quả cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu MFO do Huang Young Jun và cộng sự (2014) nghiên cứu tại công bố [32], cấu trúc có hấp thụ đa đỉnh trong vùng tần số X có khả năng dịch chuyển tần số hấp thụ thông qua từ trường ngoài áp dụng.

Trong vùng cộng hưởng sắt từ, độ từ thẩm hiệu dụng của MFO được tính toán theo công thức 1.22, trong đó $\omega_0 = \gamma H_0$ là tần số cộng hưởng sắt từ với chỉ số hồi chuyển từ $\gamma = 1.759 \times 10^{11} s^{-1} T^{-1}$, tần số đặc trưng của vật liệu MFO $\omega_m = 4\pi M_s \gamma$ và sự suy giảm của tuế sai sắt từ $\alpha = \gamma \Delta H / 2\omega$; ΔH là độ rộng cộng hưởng. Luận án đã tính toán thông số của độ từ thẩm hiệu dụng của vật liệu thay đổi theo từ trường được trình bày tại Hình 4.14. Các thông số của vật liệu đã được tích hợp vào phần mềm CST để tiến hành mô phỏng khả năng hấp thụ của cấu trúc CM-MA dưới tác động của từ trường với giá trị khác nhau từ 0 đến 1950 Oe. Vật liệu MFO có hệ số tổn hao $\tan\delta = 0,0002$; hằng số điện môi $\epsilon = 13,8$, độ rộng cộng hưởng ΔH là 22 Oe, và độ từ hóa bão hòa $4\pi M_s = 1830$ Gs. Mô phỏng theo các điều kiện: sóng điện từ tới phân cực TE theo trục z; hướng điện trường E theo trục x và từ trường H theo trục y. Từ trường ngoài áp dụng theo phương y (song song với bề mặt mẫu).

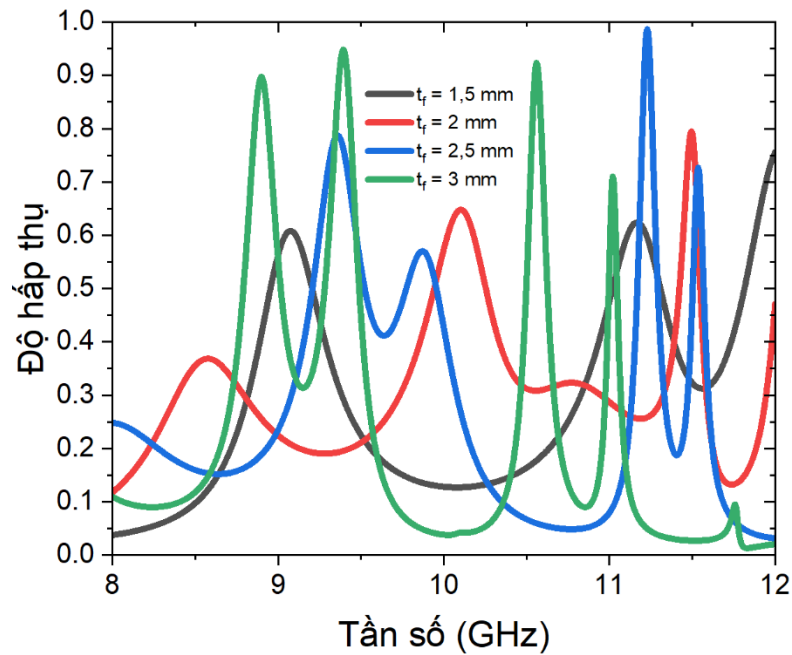
Quan sát Hình 4.14, có thể thấy mặc dù FMR nội tại của MFO nằm trong vùng tần số từ 5 - 8 GHz, tuy nhiên, tán sắc độ từ thẩm hiệu dụng của MFO vẫn ảnh hưởng sang 8 -12 GHz, có thể thấy khi thay đổi giá trị từ trường, làm thay đổi giá trị của tần số plasma từ của MFO (độ từ thẩm nhỏ hơn 0), dẫn tới khi tích hợp vào MA thay đổi tần số cộng hưởng từ của MA và dịch tần số hấp thụ cấu trúc tổ hợp vật liệu.



Hình 4.14. Độ từ thẩm hiệu dụng của vật liệu MFO tại các giá trị từ trường khác nhau

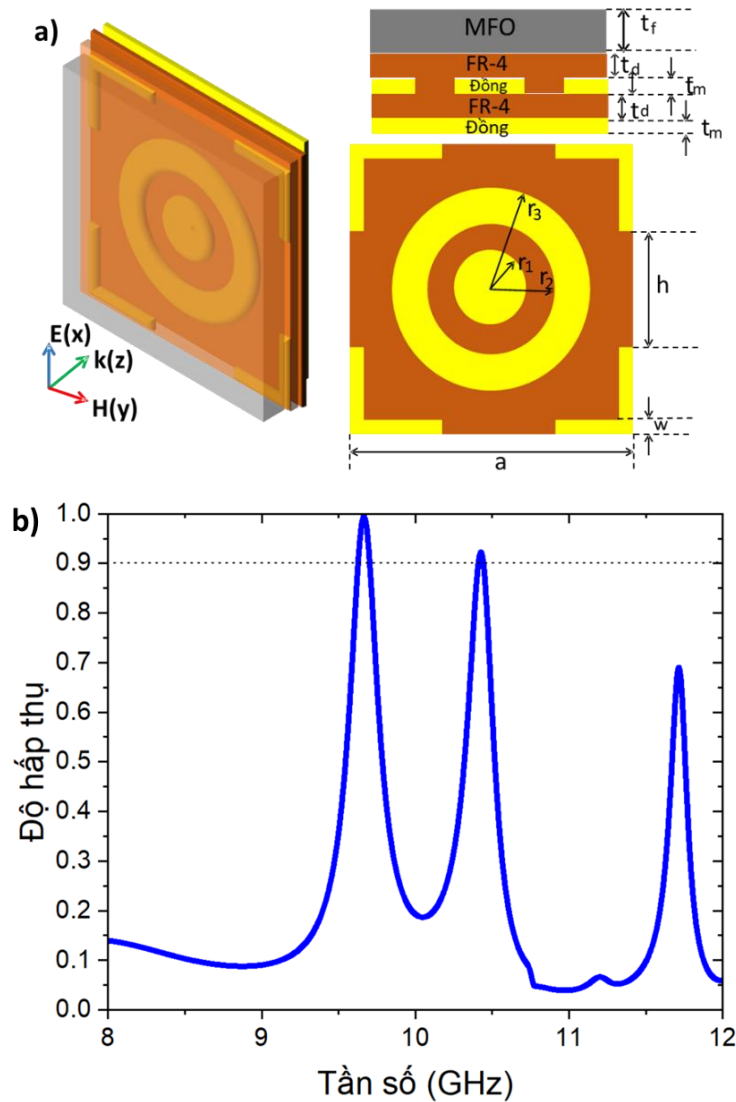
Đầu tiên, luận án tiến hành mô phỏng tại từ trường bằng 0 về khả năng hấp thụ của cấu trúc CM-MA có kích thước hình học giống như trong Chương 3.2 và Chương 4.1, trong đó thay thế lớp vật liệu từ phủ trên cùng bằng MFO với các thông số độ từ thẩm hiệu dụng cấu trúc có độ hấp thụ, kết quả được trình bày trong Hình 4.15. Có thể thấy, khi độ dày t_f của MFO là 1,5 mm, cấu trúc có hai đỉnh hấp thụ tại 9,06 GHz và 11,64 GHz với độ hấp thụ lần lượt là 60,73% và 62,41%. Để tăng cường khả năng hấp thụ của cấu trúc luận án tiến hành khảo sát ảnh hưởng của độ dày lớp vật liệu MFO đến khả năng hấp thụ của cấu trúc MFO. Kết quả cho thấy, khi độ dày MFO tăng lên 2 mm, cấu trúc có ba đỉnh hấp thụ tại 8,56 GHz, 10,10 GHz và 11,50 GHz với độ hấp thụ là

36, 77%, 64,77% và 79,18 GHz. Khi tiếp tục tăng độ dày t_f của vật liệu NZFO lên 2,5 mm, cấu trúc cho phổ hấp thụ 4 đỉnh tại 9,37 GHz với độ hấp thụ là 78,33%, 9,86 GHz với độ hấp thụ là 56,79%, 11,23 với độ hấp thụ là 98,33% và tại 11,54 GHz với độ hấp thụ là 72,21%. Khi độ dày t_f của vật liệu NZFO lên 3 mm, cấu trúc cũng cho phổ hấp thụ 4 đỉnh tại 8,90 GHz, 9,40 GHz, 10,56 GHz và 11,02 GHz với độ hấp thụ là 89,72%, 94,41%, 92,37% và 71, 02%.



Hình 4.15 Phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng MFO với độ dày lớp vật liệu MFO khác nhau

Cuối cùng, để tối ưu độ dày của vật liệu MFO và độ dày tổng thể của cấu trúc CM-MA, luận án lựa chọn độ dày tối ưu t_f là 2 mm. Để cải thiện khả năng hấp thụ của cấu trúc, luận án tiến hành mô phỏng bổ sung lớp điện môi FR-4 với độ dày t_d lên trên cấu trúc cộng hưởng trước tấm phủ MFO. Cấu trúc CM-MA sau khi được tối ưu và phổ hấp thụ của cấu trúc với hai đỉnh có độ hấp thụ 99,44% và 92,22% tại tần số 9,66 và 10,43 GHz tương ứng, kết quả được trình bày trong Hình 4.16 (b), cụ thể cấu trúc CM-MA có kích thước ô cơ sở là $20 \times 20 \text{ mm}^2$ [Hình 4.16(a)] và bao gồm năm lớp, với lớp trên cùng là tấm vật liệu MFO có độ dày t_f , lớp thứ hai là lớp điện môi FR-4 có độ dày t_d , lớp thứ ba là MA làm từ đồng bao gồm hai vòng đục lỗ và có bốn cạnh hình chữ L ở góc, lớp thứ tư là lớp điện môi FR-4 có độ dày t_d , hằng số điện môi tương đối của FR-4 là 4,3 và hệ số tổn hao là 0,025. Cuối cùng là tấm đồng liên tục có độ dày t_m với độ dẫn điện là $5,8 \times 10^7 \text{ S/m}$. Các thông số hình học tối ưu của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu MFO được trình bày trong Bảng 4.2.

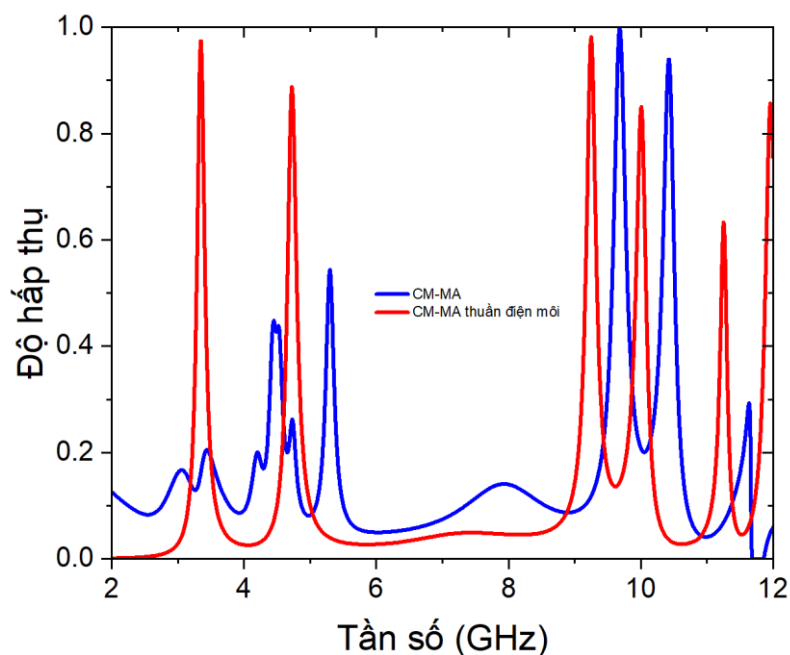


Hình 4.16. a) Sơ đồ cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu MFO và b) Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc.

Bảng 4.2 Thông số hình học tối ưu của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu MFO

Thông số	a	h	w	t_f	t_d	t_m
Giá trị (mm)	20	6	1	2	0,5	0,036
Thông số	r₁	r₂	r₃			
Giá trị (mm)	3	5	7			

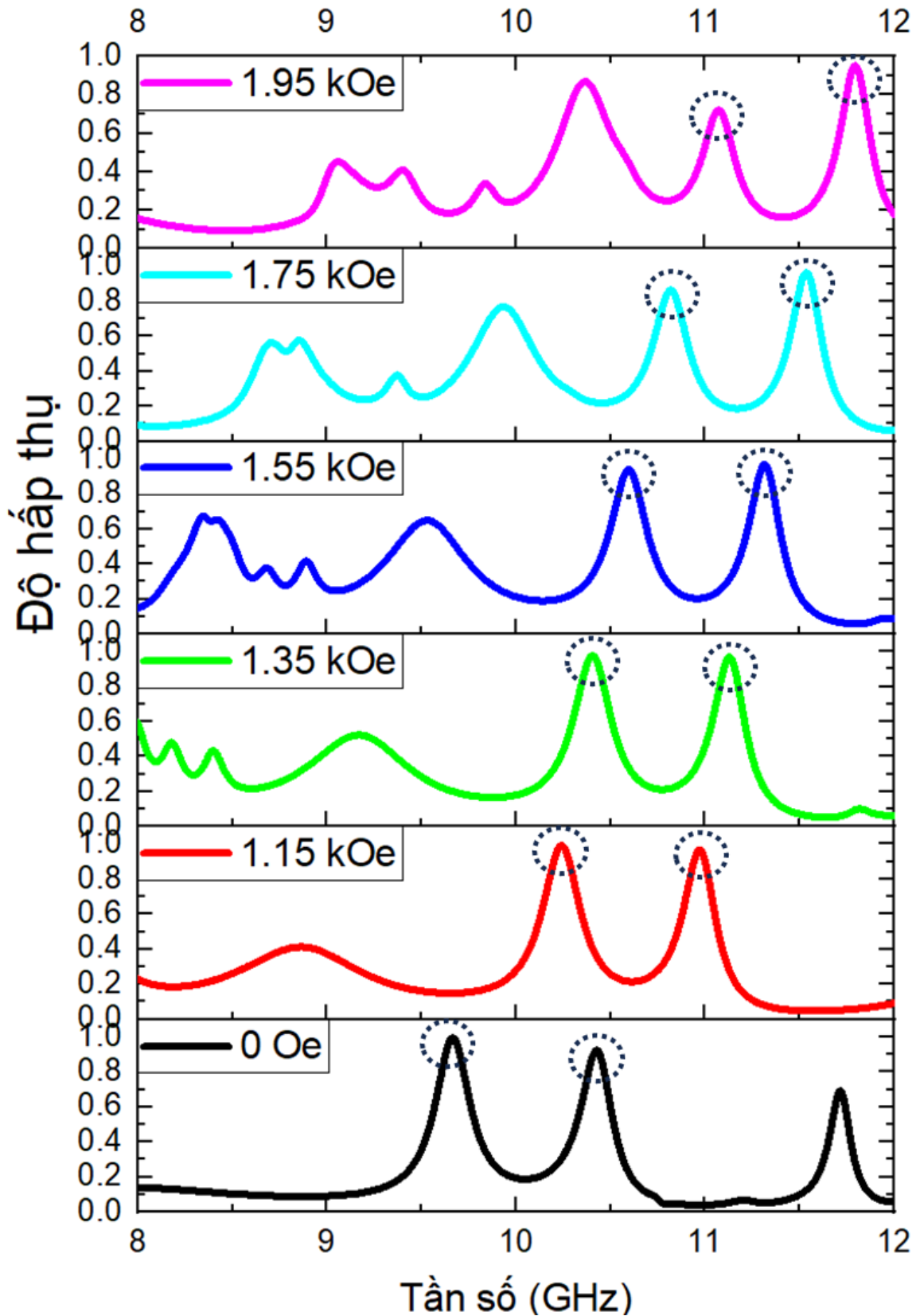
Luận án cũng đã tiến hành phân tích, làm rõ vai trò của MA trong cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu MFO bằng mô phỏng thay thế vật liệu MFO bằng vật liệu điện môi thuần túy có hệ số và tổn hao điện môi tương đương, kết quả cho thấy, các đỉnh trong vùng tần số 8 - 12 GHz của CM-MA sử dụng MFO là của cấu trúc MA, kết quả trình bày trong Hình 4.17.



Hình 4.17. Mô phỏng phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng MFO và CM-MA thuần điện môi

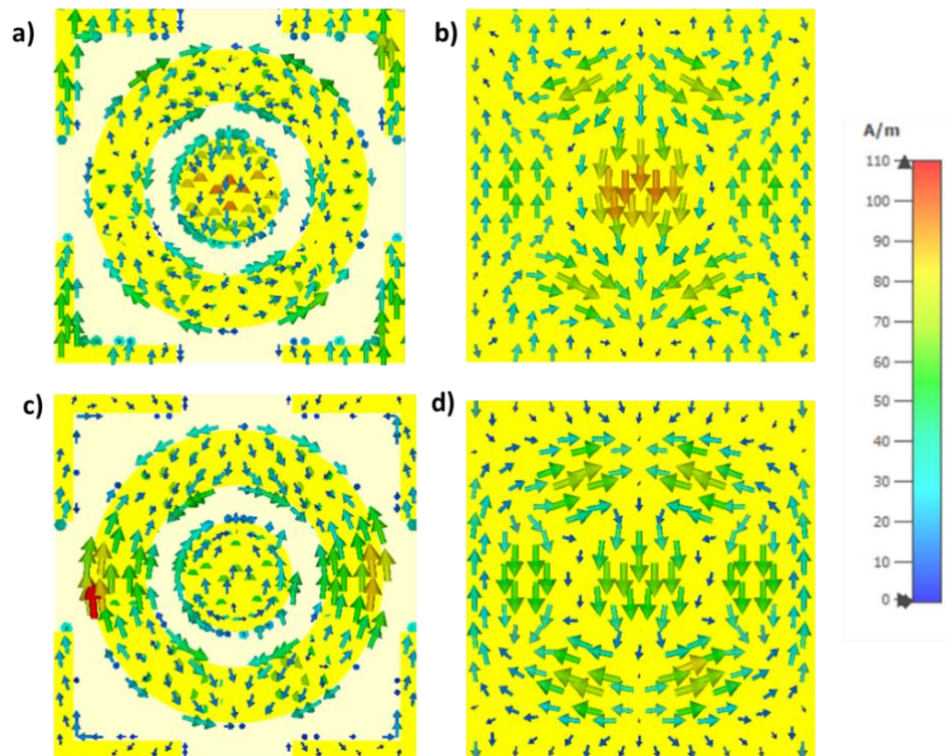
4.2.2 Điều khiển tần số hấp thụ của tổ hợp vật liệu thông qua từ trường ngoài

Kết quả mô phỏng điều khiển tần số hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng MFO khi thay đổi giá trị từ trường áp dụng từ 0 đến 1950 Oe được trình bày trong Hình 4.18. Kết quả cho thấy, khi không có từ trường áp dụng, cấu trúc CM-MA có hai đỉnh hấp thụ 99,44% và 92,22% tại tần số 9,66 và 10,43 GHz tương ứng. Khi từ trường ngoài áp dụng vào cấu trúc có giá trị 1,15 kOe, hai đỉnh hấp thụ dịch chuyển sang vùng tần số cao hơn tại 10,24 và 10,97 GHz với độ hấp thụ đạt 99,23 và 96,57% tương ứng. Khi giá trị từ trường tăng lên đến 1,35 kOe, phổ hấp thụ dịch chuyển với hai đỉnh hấp thụ có giá trị 97,6% và 96,8% tại tần số 10,40 và 11,13 GHz tương ứng. Khi từ trường tăng đến 1,55 kOe, hai đỉnh hấp thụ dịch chuyển sang vùng tần số 10,60 và 11,32 GHz với độ hấp thụ giảm xuống còn 93,88% và 96,8%. Với từ trường ngoài áp dụng vào cấu trúc có giá trị 1,75 kOe, phổ hấp thụ vẫn dịch chuyển và tại đây đỉnh thứ nhất giảm cường độ hấp thụ xuống còn 86,25% tại tần số 10,82 GHz và đỉnh thứ hai vẫn có độ hấp thụ cao là 96,3% tại tần số 11,54 GHz. Và khi từ trường ngoài áp dụng vào cấu trúc đạt 1,95 kOe đỉnh hấp thụ dịch sang vùng tần số 11,80 GHz với độ hấp thụ 94,92%.



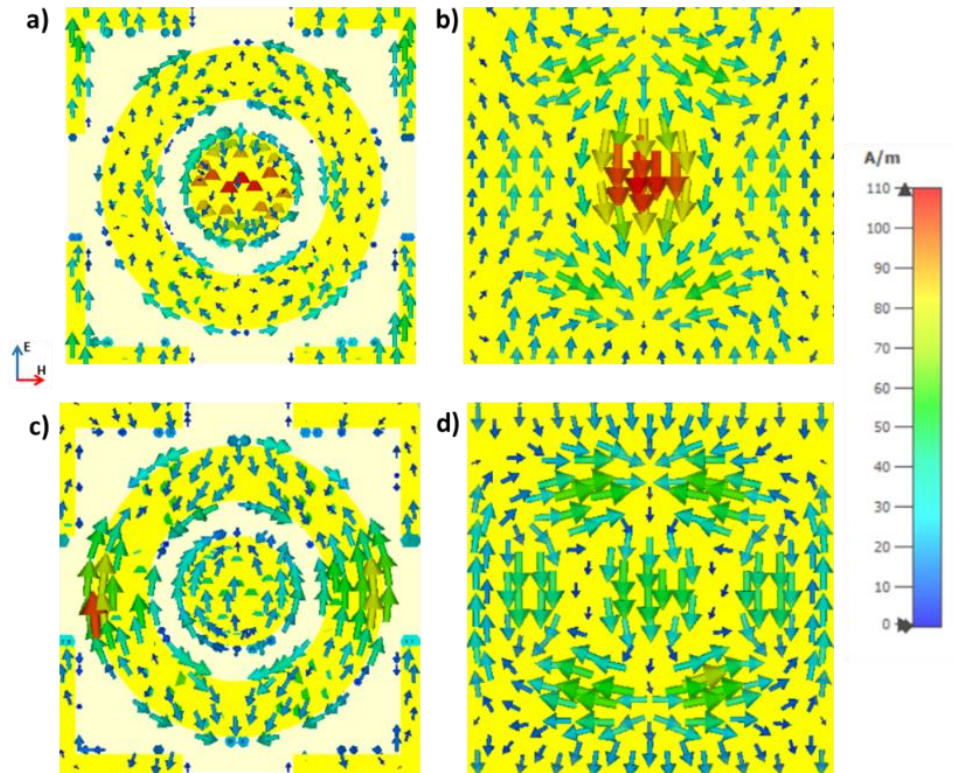
Hình 4.18. Mô phỏng dịch chuyển phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng MFO khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 0 Oe; 1,15 kOe; 1,35 kOe; 1,55 kOe; 1,75 kOe và 1,95 kOe tương ứng.

Để làm rõ cơ chế hấp thụ của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu MFO tại các giá trị từ trường khác nhau, luận án đã khảo sát phân bố dòng điện bề mặt tại các đỉnh hấp thụ, cụ thể: 9,66 và 10,43 GHz khi không có từ trường áp dụng; 10,24 và 10,97 GHz khi từ trường áp dụng có giá trị 1,15 kOe; 10,60 và 11,32 GHz khi từ trường áp dụng có giá trị 1,35 kOe; 10,60 và 11,32 GHz khi từ trường áp dụng có giá trị 1,55 kOe; tại tần số 11,54 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,75 kOe và tại tần số 11,80 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,95 kOe, tương ứng với các đỉnh có độ hấp thụ trên 90%.

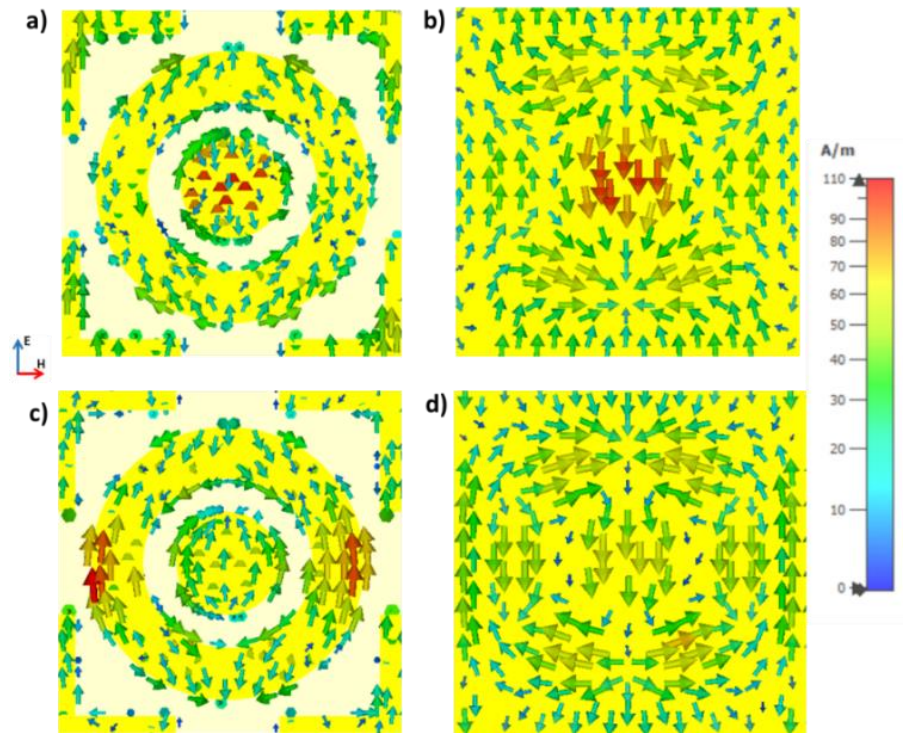


Hình 4.19. Mô phỏng dòng điện bề mặt tại mặt trên cấu trúc tuần hoàn và mặt sau tấm phản xạ: (a-b) tại tần số 9,96 GHz và (c-d) tại tần số 10,43 GHz khi không áp dụng từ trường

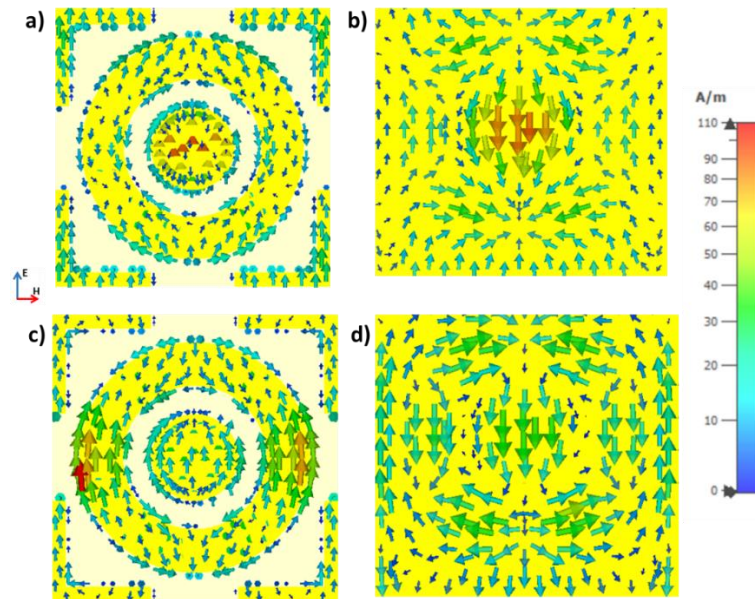
Quan sát Hình 4.19 có thể thấy, tại cả hai tần số, dòng điện trên bề mặt cấu trúc tuần hoàn và mặt sau tấm phản xạ song song và ngược hướng, cơ chế hấp thụ tại các đỉnh này là cộng hưởng từ. Trong đó, tại tần số 9,96 GHz, dòng điện tập trung chủ yếu tại đĩa tròn trung tâm, trong khi đó, tại tần số 10,43 GHz dòng điện tập trung tại vòng tròn ngoài. Kết quả tương tự cũng được quan sát tại các đỉnh hấp thụ của cấu trúc khi từ trường ngoài áp dụng lên cấu trúc có giá trị 1,15 kOe; 1,35 kOe và 1,55 kOe, kết quả được trình bày trong các Hình từ 4.20 đến 4.24.



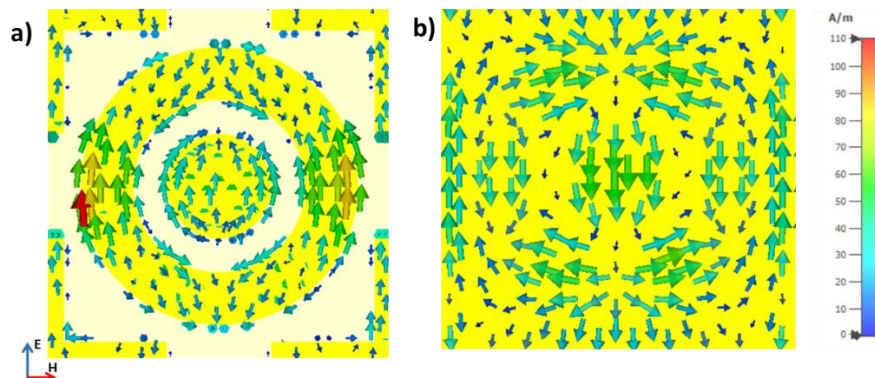
Hình 4.20. Mô phỏng dòng điện bề mặt tại mặt trên cấu trúc tuần hoàn và mặt sau tấm phản xạ: (a-b) tại tần số 10,24 GHz và (c-d) tại tần số 10,97 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,15 kOe



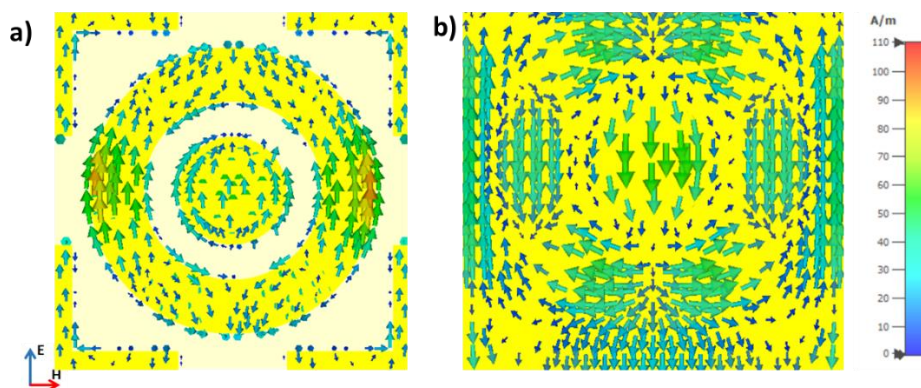
Hình 4.21. Mô phỏng dòng điện bề mặt tại mặt trên cấu trúc tuần hoàn và mặt sau tấm phản xạ: (a-b) tại tần số 10,40 GHz và (c-d) tại tần số 11,13 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,35 kOe



Hình 4.22. Mô phỏng dòng điện bề mặt tại mặt trên cấu trúc tuần hoàn và mặt sau tấm phản xạ: (a-b) tại tần số 10,60 GHz và (c-d) tại tần số 11,32 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,55 kOe



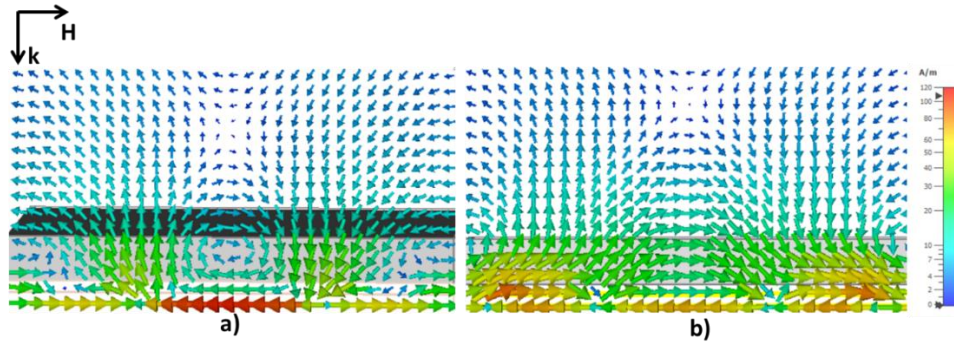
Hình 4.23. a) Mô phỏng dòng điện bề mặt tại mặt trên cấu trúc tuần hoàn và b) mặt sau tấm phản xạ tần số 11,54 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,75 kOe



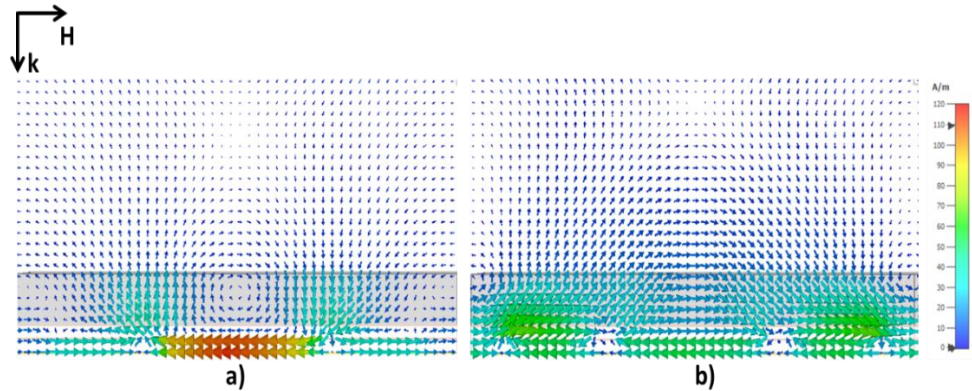
Hình 4.24. a) Mô phỏng dòng điện bề mặt tại mặt trên cấu trúc tuần hoàn và b) mặt sau tấm phản xạ tần số 11,80 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,95 kOe

Để làm rõ cách sóng điện từ tương tác với CM-MA, sự phân bố từ trường

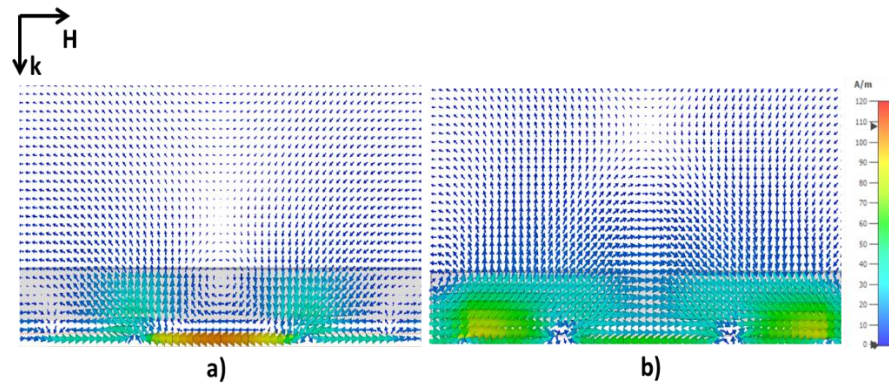
tại các tần số cộng hưởng có độ hấp thụ trên 90% trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ đã được luận án khảo sát, kết quả được trình bày trong các Hình từ 4.25 đến 4.30. Quan sát các hình có thể thấy từ trường bị kích thích tại đĩa tròn trung tâm đối với các đỉnh tại tần số thấp hơn, tại vòng tròn ngoài đối với các đỉnh tại vùng tần số cao hơn và một phần tại các cạnh hình chữ L tương ứng với các vị trí tập trung dòng điện như đã phân tích.



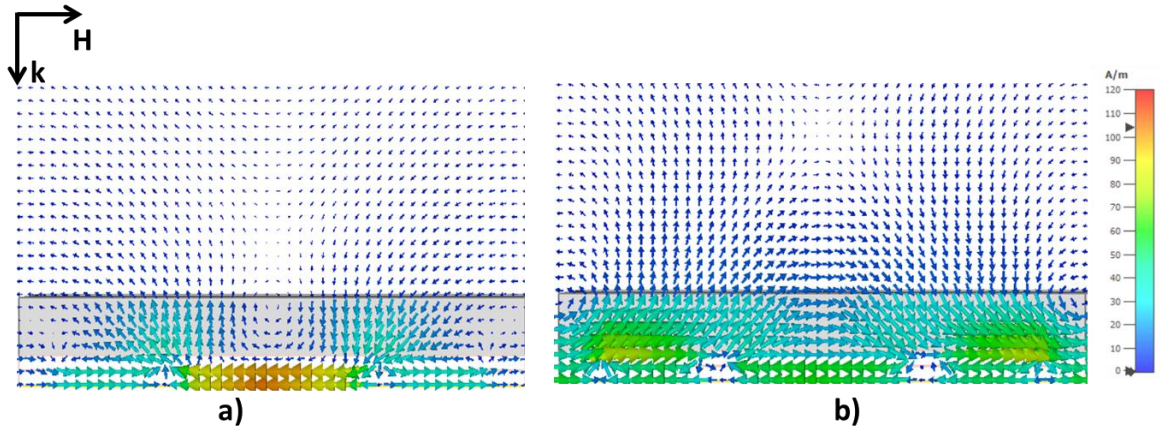
Hình 4.25. Mô phỏng từ trường trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ tại tần số: a) 9,96 GHz và b) 10,43 GHz khi không có từ trường tác dụng



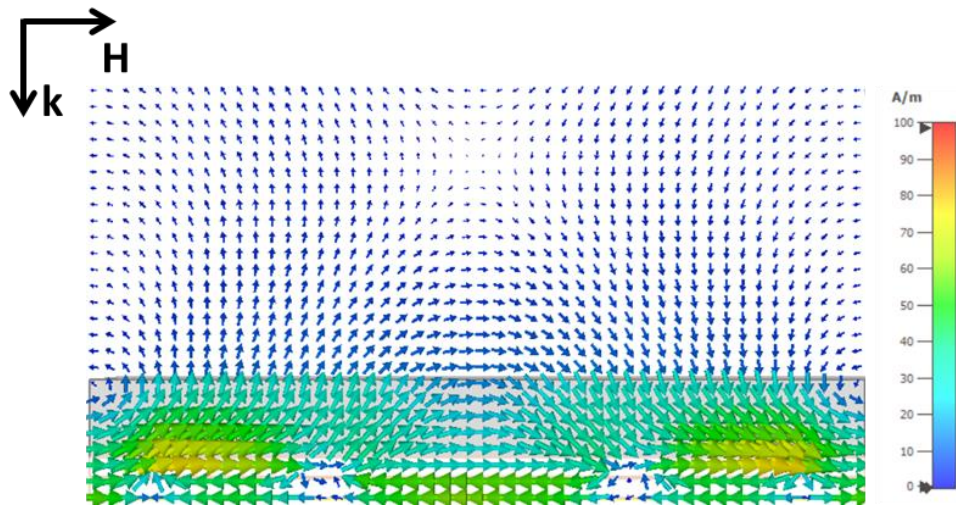
Hình 4.26. Mô phỏng từ trường trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ tại tần số: a) 10,24 GHz và b) 10,97 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,15 kOe



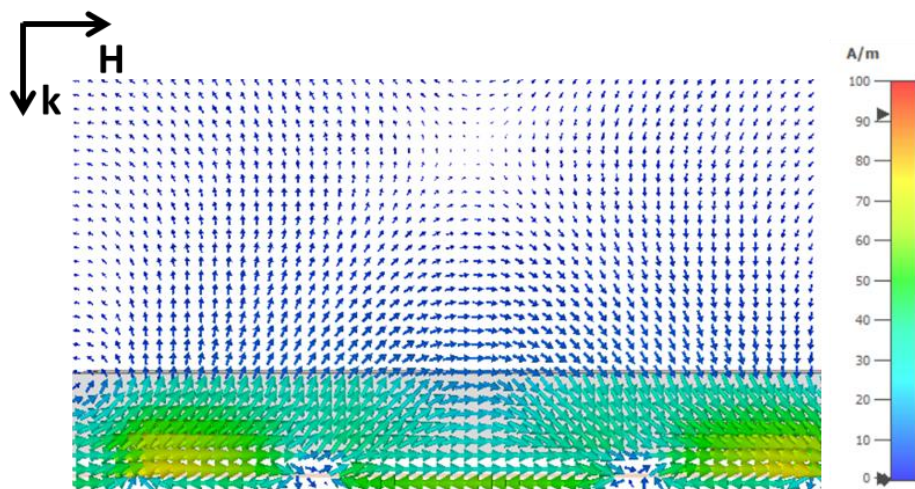
Hình 4.27. Mô phỏng từ trường trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ tại tần số: a) 10,40 GHz và b) 11,13 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,35 kOe



Hình 4.28. Mô phỏng từ trường trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ tại tần số: a) 10,60 GHz và b) 11,32 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,55 kOe

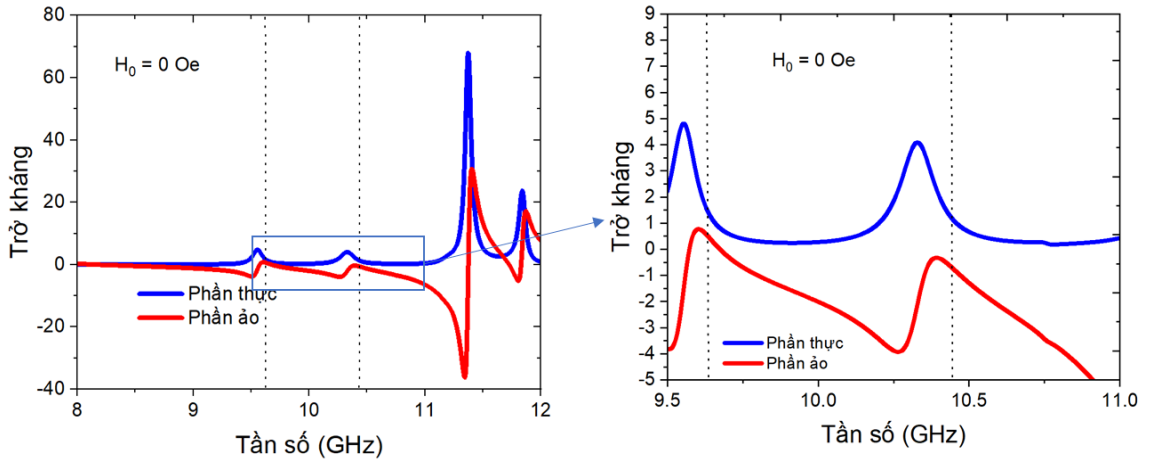


Hình 4.29. Mô phỏng từ trường trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ tại tần số 11,54 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,75 kOe



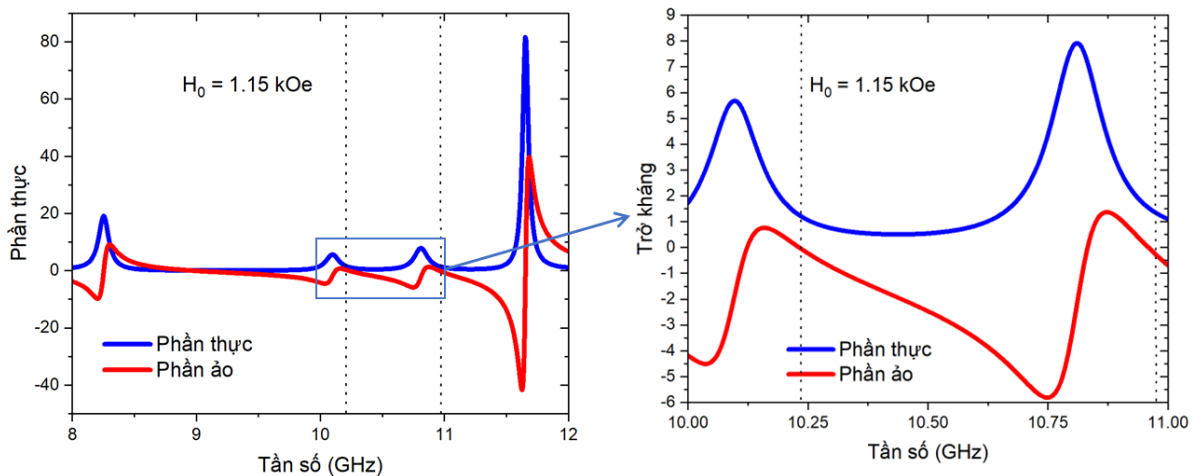
Hình 4.30. Mô phỏng từ trường trong mặt phẳng (H, k) tại vị trí $y = 0$ tại tần số 11,80 GHz khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,95 kOe

Các giá trị trở kháng tương đối Z_r của CM-MA được tính toán theo công thức 3.2 phù hợp với lý thuyết phối hợp trở kháng và phổ hấp thụ của CM-MA. Cụ thể, khi không có từ trường, tại tần số 9,66 GHz mẫu CM-MA có trở kháng tốt với không khí (phần thực $\text{Re}(Z_{KK})$ bằng 1 và phần ảo $\text{Im}(Z_{KK})$ bằng 0) với phần thực $\text{Re}(Z_r)$ đạt 1,09 và phần ảo $\text{Im}(Z_r)$ là 0,27. Tại tần số 10,43 GHz, phần thực trở kháng của CM-MA $\text{Re}(Z_r)$ là 1,42 và phần ảo $\text{Im}(Z_r)$ là -0,56. Kết quả được trình bày trong Hình 4.31.



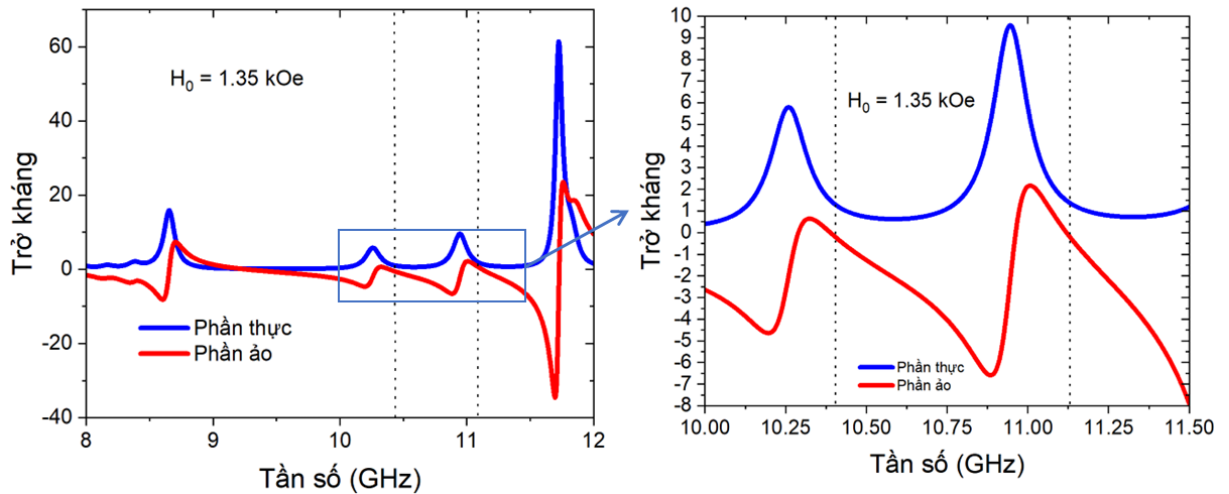
Hình 4.31. Trở kháng của cấu trúc CM-MA khi không có từ trường ngoài áp dụng

Hình 4.32 biểu thị trở kháng tương đối Z_r của CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,15 kOe. Trong đó, tại tần số 10,24 GHz mẫu CM-MA có phần thực của trở kháng $\text{Re}(Z_r)$ đạt 1,16 và phần ảo $\text{Im}(Z_r)$ là -0,10. Tại tần số 10,97 GHz, phần thực trở kháng của CM-MA $\text{Re}(Z_r)$ là 1,40 và phần ảo $\text{Im}(Z_r)$ là -0,19, cấu trúc CM-MA có trở kháng tốt với không khí.



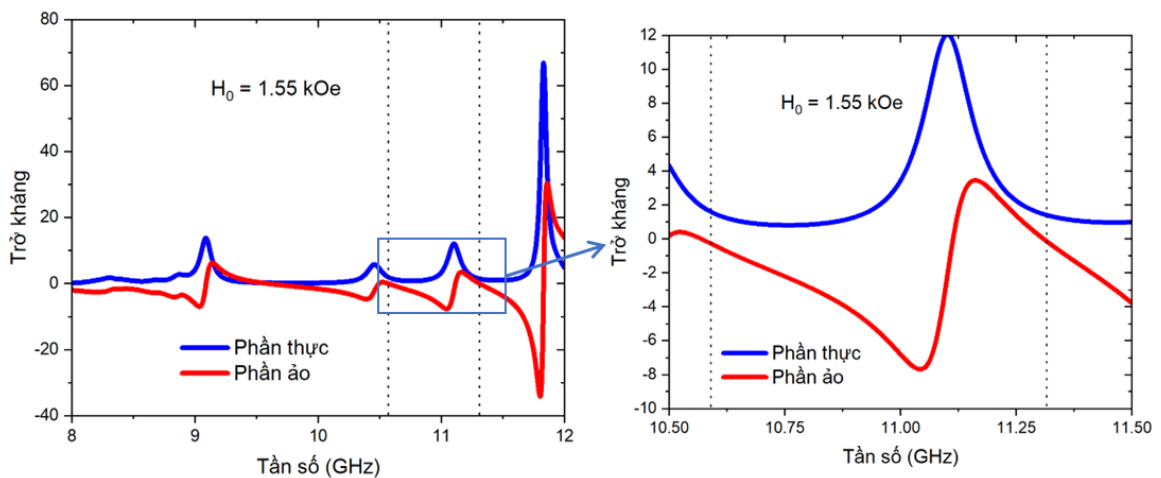
Hình 4.32. Trở kháng của cấu trúc CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,15 kOe

Hình 4.33 biểu thị trở kháng tương đối Z_r của CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,35 kOe. Trong đó, tại tần số 10,40 GHz mẫu CM-MA có phần thực của trở kháng $\text{Re}(Z_r)$ đạt 1,30 và phần ảo $\text{Im}(Z_r)$ là -0,20. Tại tần số 11,13 GHz, phần thực trở kháng của CM-MA $\text{Re}(Z_r)$ là 1,37 và phần ảo $\text{Im}(Z_r)$ là -0,19, cấu trúc CM-MA có trở kháng tốt với không khí.

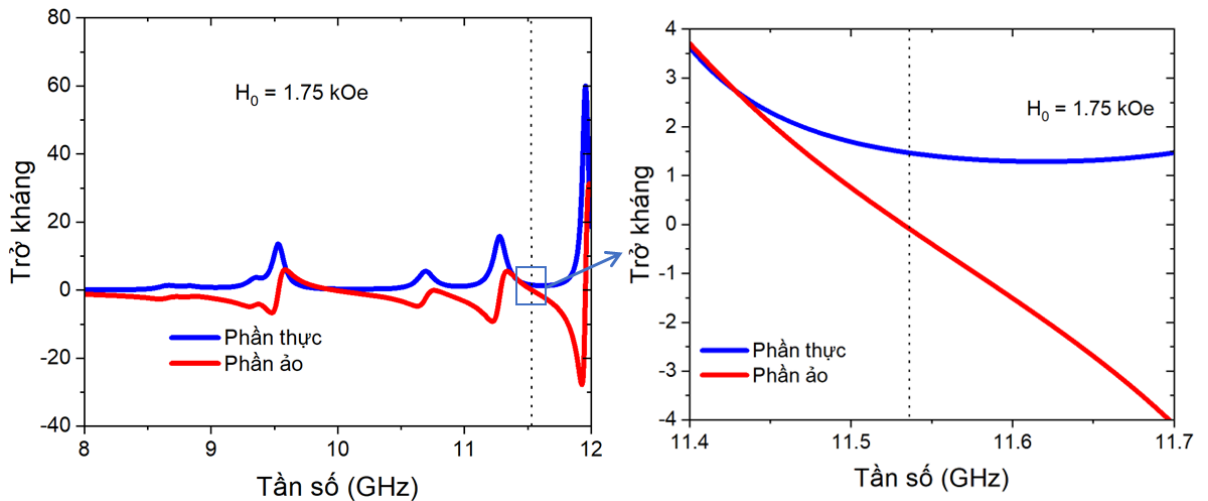


Hình 4.33. Trở kháng của cấu trúc CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,35 kOe

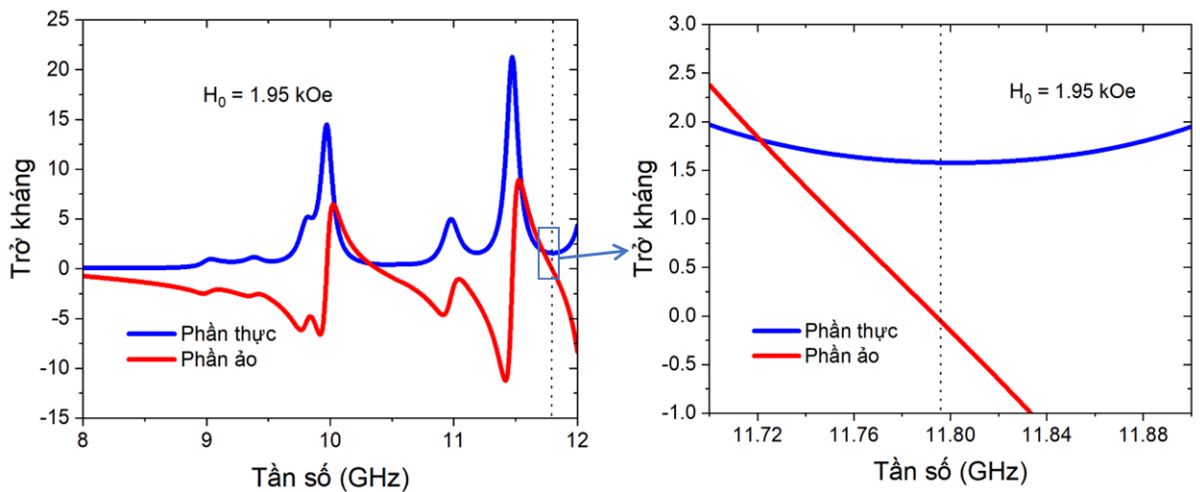
Kết quả tính toán trở kháng tương đối Z_r của CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,55 kOe được trình bày trong Hình 4.34, kết quả cũng cho thấy cấu trúc CM-MA có khả năng phối hợp trở kháng tốt với không khí tại các đỉnh hấp thụ. Cụ thể, tại tần số 10,60 GHz cấu trúc CM-MA có phần thực của trở kháng $\text{Re}(Z_r)$ đạt 1,49 và phần ảo $\text{Im}(Z_r)$ là -0,38. Tại tần số 11,32 GHz, phần thực trở kháng của CM-MA $\text{Re}(Z_r)$ là 1,15 và phần ảo $\text{Im}(Z_r)$ là -1,01.



Hình 4.34. Trở kháng của cấu trúc CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,55 kOe



Hình 4.35. Trở kháng của cấu trúc CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,75 kOe



Hình 4.36. Trở kháng của cấu trúc CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,95 kOe

Kết quả tính toán trở kháng tương đối Z_r của CM-MA khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,75 kOe được trình bày trong Hình 4.35, kết quả cũng cho thấy cấu trúc CM-MA có khả năng phối hợp trở kháng tốt với không khí tại, cụ thể tại tần số 11,54 GHz, cấu trúc CM-MA có phần thực của trở kháng $\text{Re}(Z_r)$ đạt 1,47 và phần ảo $\text{Im}(Z_r)$ là -0,09. Kết quả tương tự đối với trường hợp khi từ trường ngoài áp dụng có giá trị 1,95 kOe, cấu trúc CM-MA có phần thực của trở kháng $\text{Re}(Z_r)$ đạt 1,58 và phần ảo $\text{Im}(Z_r)$ là -0,05 tại tần số 11,80 GHz, kết quả được trình bày trong Hình 4.36.

Quan sát các Hình từ 4.31 đến 4.36 có thể thấy, tần số phối hợp trở kháng dịch chuyển về vùng tần số cao hơn khi từ trường tăng dần và mức độ phối hợp trở kháng (phần thực và phần ảo) nhìn chung được cải thiện tại vùng tần số 11

- 12 GHz khi tăng H_0 , kết quả này phù hợp với xu hướng dịch chuyển đỉnh hấp thụ quan sát được trên Hình 4.21.

Các kết quả nghiên cứu trên cho thấy, tần số cộng hưởng từ của CM-MA phụ thuộc vào sự dịch chuyển của độ từ thẩm của MFO theo tần số là cơ chế chính cho sự dịch chuyển của phổ hấp thụ đa đỉnh. Từ đó, nghiên cứu trong thời gian tới có thể tập trung theo hướng tối ưu vật liệu MFO theo hướng gia tăng tổn hao điện từ, qua đó nâng cao khả năng phối hợp trở kháng trên dải tần rộng và từng bước hiện thực hóa khả năng điều khiển vùng tần số của phổ hấp thụ dải rộng dưới tác động của từ trường ngoài.

Bảng 4.3. So sánh kết quả điều khiển tần số hấp thụ cấu trúc CM-MA sử dụng MFO thông qua từ trường ngoài với các nghiên cứu trước đây

STT	Vật liệu	Vùng tần số dịch chuyển	Từ trường áp dụng (Oe)	Cách sử dụng vật liệu từ trong cấu trúc	Độ dày cấu trúc (mm)	Dạng phổ hấp thụ	Tài liệu tham khảo
1.	MFO	10,99 - 11,29 (Cấu trúc MA1 - tấm phủ ở trên) 9,52 - 9,66 (Cấu trúc MA2 - tấm phủ ở dưới)	0 - 1950	Tấm phủ	2	Đơn đỉnh	[32]
2.	Yttri sắt garnet	10,71 - 11,06 10,42 - 10,86	0-2000 3200-6000	Cấu trúc cộng hưởng	5	Đơn đỉnh	[31]
3.	Yttri sắt garnet	8,14 - 11,8 8,14 - 9,5	1600 - 2650 1600-2000	Cấu trúc cộng hưởng	1,4 (5 lớp)	Đơn đỉnh	[143]
4.	Yttri sắt garnet	8,5 - 10 GHz	0-2700	Cấu trúc cộng hưởng	1,6	Dải rộng	[144]
5.	MFO	9,66 - 11,08 10,43 - 11,80	0 - 1950	Tấm phủ	3	Hai đỉnh	Nghiên cứu này

Kết quả của nghiên cứu được so sánh với các nghiên cứu trước đây được trình bày trong Bảng 4.4, cho thấy kết quả của nghiên cứu là khác biệt so với các nghiên cứu trước đây khi chủ yếu nghiên cứu về điều khiển phổ hấp thụ đơn đỉnh tại vùng FMR, vùng tần số dịch chuyển của cấu trúc CM-MA do luận án đề xuất tương đối rộng, đạt 1,42 GHz đối với đỉnh thứ nhất (từ 9,66 GHz đến 11,08 GHz) và 1,37 GHz (từ 10,43 GHz đến 11,80 GHz) đối với đỉnh thứ hai. Ngoài ra, độ dày tổng thể của cấu trúc là 3 mm là không lớn, bên cạnh đó cấu trúc sử dụng vật liệu từ dưới dạng tấm phủ đảm bảo khả thi trong chế tạo thực nghiệm. Cấu trúc CM-MA có phổ hấp thụ hai đỉnh có thể định hướng ứng dụng cho các cảm biến sử dụng các tần số mục tiêu khác nhau.

4.3 Kết luận chương 4

Đã điều khiển biên độ, tần số hấp thụ của cấu trúc CM-MA, làm rõ cơ chế hấp thụ và đặc tính hấp thụ của cấu trúc thông qua từ trường ngoài, cụ thể:

- Đã chế tạo và tích hợp vật liệu NZFO vào cấu trúc MA giúp tăng cường cường độ và mở rộng phổ hấp thụ so với MA và vật liệu NZFO đơn lẻ. Cấu trúc CM-MA sử dụng NZFO có dải hấp thụ trên 70% trong khoảng 13,1 - 14,1 GHz với đỉnh hấp thụ tại 13,59 GHz có độ hấp thụ 75%, FWHM khoảng 4,6 GHz. Biên độ hấp thụ của cấu trúc CM-MA được tăng cường từ 75% lên 97% khi cường độ từ trường ngoài được thay đổi từ 0 đến 2000 Oe. Cơ chế điều khiển biên độ hấp thụ được giải thích là do sự tăng cường giá trị phần thực độ từ thẩm của NZFO theo từ trường dẫn đến sự biến đổi trở kháng tổng cộng của CM-MA xung quanh tần số hấp thụ 13,59 GHz.

- Đã thiết kế, mô phỏng khả năng dịch chuyển vùng tần số hấp thụ của CM-MA sử dụng vật liệu MFO có phổ hấp thụ đa đỉnh với độ hấp thụ trên 90%, có khả năng dịch chuyển tần số hấp thụ trong vùng tần số X. Khi từ trường ngoài áp dụng vào cấu trúc có giá trị từ 0 đến 1,95 kOe, vùng tần số dịch chuyển tương đối rộng, đạt 1,412 GHz (từ 9,664 GHz đến 11,076 GHz) đối với đỉnh thứ nhất và 1,367 GHz (từ 10,429 GHz đến 11,796 GHz) đối với đỉnh thứ hai. Cơ chế điều khiển tần số hấp thụ được giải thích là do sự dịch chuyển tần số FMR của MFO khiến cho vị trí phối hợp trở kháng của CM-MA ở lân cận FMR bị dịch chuyển tương ứng.

KẾT LUẬN CHUNG

Luận án “*Nghiên cứu chế tạo và điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ tại vùng tần số GHz dựa trên tổ hợp vật liệu từ (nền FeCo và MFe_2O_4) và metamaterials*” đã được thực hiện tại Học viện Khoa học và Công nghệ và Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Luận án tập trung khảo sát đặc tính hấp thụ sóng điện từ dải rộng của cấu trúc CM-MA, đồng thời nghiên cứu các phương án điều khiển biên độ và tần số hấp thụ của cấu trúc nhằm nâng cao hiệu quả và tính linh hoạt. Các kết quả chính của luận án đã được công bố thông qua 02 bài báo trên tạp chí quốc tế thuộc danh mục SCIE, 01 bài báo trong nước được chấp nhận đăng, 01 sáng chế được cấp bằng độc quyền và 02 bài trong kỷ yếu hội thảo khoa học chuyên ngành.

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

- Đã thiết kế, mô phỏng cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C với vai trò như cấu trúc cộng hưởng, cấu trúc có khả năng hấp thụ dải rộng với độ hấp thụ trên 90% trong vùng tần số từ 7,9 - 14,4 GHz. Độ hấp thụ vẫn duy trì trên 90% ở khoảng góc tới rộng từ 0 đến 55° ở cả chế độ phân cực TE và TM.

- Đã thiết kế, mô phỏng và chế tạo thành công cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C với 5 tỷ lệ carbon khác nhau, lần lượt là 10%, 50%, 75 %, 90 % và graphene nguyên chất có khả năng hấp thụ dải rộng. Đối với tỷ lệ carbon tối ưu là 75%, cấu trúc có độ hấp thụ trên 90% với băng thông hấp thụ rộng trong dải C-Ku (6,9 - 16,8 GHz). Cấu trúc duy trì khả năng hấp thụ tốt khi thay đổi góc tới, ở chế độ TM cấu trúc duy trì khả năng hấp thụ tốt hơn chế độ phân cực TE.

- Đã chế tạo cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ và điều khiển cường độ hấp thụ từ 75% lên 97% tại tần số 13,59 GHz bằng cách tăng dần từ trường ngoài áp dụng lên cấu trúc đến 2000 Oe.

- Đã thiết kế cấu trúc CM-MA được tích hợp vật liệu $MgFe_2O_4$ cho hấp thụ đa đỉnh ở dải tần X có khả năng điều khiển tần số thông qua từ trường ngoài. Vùng tần số dịch chuyển tương đối rộng, đạt 1,42 GHz (từ 9,66 GHz đến 11,08 GHz) đối với đỉnh thứ nhất và 1,37 GHz (từ 10,43 GHz đến 11,80 GHz) đối với đỉnh thứ hai khi tăng dần từ trường áp dụng vào cấu trúc đến 1950 Oe.

KIẾN NGHỊ NHỮNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Đối với các nghiên cứu tiếp nối, xu hướng hiện nay không chỉ dừng ở việc đạt mức hấp thụ cao tại một vài tần số, mà hướng tới các mục tiêu tổng hợp hơn: mở rộng băng hấp thụ, duy trì hiệu quả dưới góc tới lớn, đồng thời dịch chuyển và điều khiển dải hấp thụ về cả vùng tần số thấp lẫn cao trong khi cấu trúc vẫn phải đáp ứng yêu cầu mỏng - nhẹ - dễ tích hợp. Những yêu cầu này đặc biệt có ý nghĩa đối với các ứng dụng quốc phòng, nơi đặc tính hấp thụ cần ổn định theo điều kiện làm việc và phù hợp với yêu cầu nhiệm vụ. Trên cơ sở đó, có thể định hướng các nghiên cứu tiếp theo theo ba hướng chính như sau:

1. Ứng dụng học máy và trí tuệ nhân tạo (AI) trong lựa chọn vật liệu và tối ưu cấu trúc MA, giúp rút ngắn thời gian khảo sát tham số, giảm phụ thuộc vào quy trình “thử - sai” lặp lại. Đồng thời, AI có thể gợi ý các cấu hình tối ưu trong không gian thiết kế nhiều chiều - nơi các phương pháp truyền thống thường khó bao phủ khi số lượng tham số tăng và quan hệ tương tác trở nên phức tạp.

2. Phát triển công nghệ chế tạo và tích hợp vật liệu tiên tiến cho CM-MA hướng tới cấu trúc mỏng - dẻo - phủ bề mặt cong: Một hướng quan trọng là triển khai CM-MA trên nền linh hoạt để phù hợp với các bề mặt không phẳng, đồng thời đánh giá độ ổn định cơ - điện của cấu trúc dưới biến dạng (uốn, kéo, rung) và độ bền môi trường (nhiệt độ, độ ẩm, ăn mòn) trong điều kiện khí hậu nhiệt đới. Đồng thời phát triển các hệ vật liệu từ có khả năng điều khiển tính chất hấp thụ tốt hơn, điều khiển tần số hấp thụ phổ rộng.

3. Mở rộng hệ vật liệu và thiết kế của cấu trúc theo định hướng dải tần mục tiêu để điều chỉnh dải hấp thụ theo ứng dụng cụ thể, cần mở rộng cả lựa chọn vật liệu (tồn hao điện môi, vật liệu từ có thể điều khiển tham số, tổ hợp vật liệu) lẫn hình dạng cấu trúc (đa cộng hưởng, cấu trúc gradient...). Mục tiêu là đạt được phổ hấp thụ mong muốn (đa đỉnh hoặc băng thông rộng), đồng thời vẫn duy trì tính mỏng nhẹ và khả năng chế tạo trên quy mô lớn.

Nhìn chung, nghiên cứu về tính chất điện từ và cơ chế điều khiển của CM-MA không chỉ cho thấy tiềm năng ứng dụng rõ rệt, mà còn tạo nền tảng học thuật và công nghệ để phát triển các cấu trúc hấp thụ thế hệ mới, có khả năng tích hợp vào hệ thống trang thiết bị phục vụ đồng thời mục tiêu quốc phòng và dân sinh.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

❖ Công bố trên tạp chí thuộc danh mục SCIE

1. **Tang Xuan Duong**, Do Khanh Tung, Pham Thanh Son, Nguyen Hai Anh, Bui Son Tung, Nguyen Phon Hai, Vu Thi Hong Hanh, Tran Quang Dat, Bui Xuan Khuyen, and Vu Dinh Lam. "Broadband metamaterial absorber in the C–Ku bands by exploiting FeCo–C." *Journal of Applied Physics* 137, no. 6 (2025).

2. **Tang Xuan Duong**, Do Khanh Tung, Bui Xuan Khuyen, Nguyen Thi Ngoc Anh, Bui Son Tung, Vu Dinh Lam, Liangyao Chen, Haiyu Zheng, and YoungPak Lee. "Enhanced electromagnetic wave absorption properties of FeCo-C alloy by exploiting metamaterial structure." *Crystals* 13, no. 7 (2023): 1006.

❖ Công bố trên tạp chí quốc gia

3. Tang Xuan Duong, Do Khanh Tung, Nguyen Hai Anh, Bui Son Tung, Dao Son Lam, Bui Xuan Khuyen and Vu Dinh Lam, "Enhanced and modulated Ku-band absorption of a hybrid $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ metamaterial structure", TNU Journal of Science and Technology, 231(06):309-318, 2026.

❖ Sở hữu trí tuệ

4. Sáng chế được cấp bằng độc quyền: Đỗ Khánh Tùng, Bùi Xuân Khuyến, Bùi Sơn Tùng, Nguyễn Thanh Hoàng, Vũ Đình Lãm, **Tăng Xuân Duong**, "Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ dải rộng trên cơ sở FeCo-C", Số bằng: 56247, Số đơn: 1-2023-08775, Quyết định số 16470/QĐ-SSTT.IP ngày 03/02/2026 của Cục Sở hữu Trí tuệ.

❖ Công bố trên Kỷ yếu Hội nghị quốc gia

5. **Tang Xuan Duong**, Do Khanh Tung, Bui Son Tung, Vu Dinh Lam, Bui Xuan Khuyen, "Metamaterial utilizing FeCo-C alloy for absorbing electromagnetic waves in the GHz frequency range", Proceedings of IWNA, 08-11 (2023).

6. **Tang Xuan Duong**, Do Khanh Tung, Pham Thanh Son, Nguyen Hai Anh, Nguyen Van Ngoc, Nguyen Thanh Tung, Bui Son Tung, Vu Thi Hong Hanh, Vu Dinh Lam, Young Park Lee, and Bui Xuan Khuyen, "Enhanced and expanded the absorption in the GHz frequency range by integrating magnetic materials into the metamaterial structure", Proceedings of IWAMSN 2024, 28-33, 22-25 September (2024).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Verbeek, J., Zeeb, H., van Deventer, E., Ijaz, S., Doré, J. F., Driessen, S., ... Whaley, P., 2025, Systematic reviews and meta-analyses for the WHO assessment of health effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields, an introduction. *Environment international*, 109751. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109751>.
- [2] Ramirez-Vazquez, R., Escobar, I., Vandenbosch, G. A., Arribas, E., 2024, Personal exposure to radiofrequency electromagnetic fields: A comparative analysis of international, national, and regional guidelines. *Environmental Research*, 246, 118124. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118124>.
- [3] Mohapatra, P. P., Sebastian, M. T., Singh, H. K., Dobbidi, P., 2025, Magnetic composites: A comprehensive review of microwave absorption and shielding properties. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 100978. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2025.100978>.
- [4] Saeedi, F., Ansari, R., Sahmani, S., 2025, Recent advances and comprehensive review of electromagnetic interference shielding materials and technologies. *Materials Today Physics*, 101917. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2025.101917>.
- [5] Hareesh, M. S., Joseph, P., George, S., 2025, Electromagnetic interference shielding: A comprehensive review of materials, mechanisms, and applications. *Nanoscale Advances*. <https://doi.org/10.1039/D5NA00240K>.
- [6] Nguyen, N. K., Lee, S., Nguyen, Q. D., Park, P., Yoon, I. J., Nah, J., 2024, Absorption-dominant electromagnetic interference shielding material using MXene-coated polyvinylidene fluoride foam. *Materials Today Physics*, 46, 101509. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2024.101509>.
- [7] Li, K., Liu, Z., Wang, Y., Zhang, P., Lin, Z., Fan, S., ... Yang, J., 2025, Microwave absorption properties and multilayer absorber design of $\text{La}_2\text{Fe}_x\text{Co}_{14-x}\text{B}$ with easy cone anisotropy. *Journal of Alloys and Compounds*, 1010, 177561. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177561>.
- [8] Li, Y., Liu, X., Nie, X., Yang, W., Wang, Y., Yu, R., Shui, J., 2019, Multifunctional organic-inorganic hybrid aerogel for self-cleaning, heat-insulating, and highly efficient microwave absorbing material. *Advanced Functional Materials*, 29(10), 1807624.
- [9] Zhou, W., Long, L., Li, Y., 2019, Mechanical and electromagnetic wave absorption properties of Cf-Si₃N₄ ceramics with PyC/SiC interphases. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(12), 2809-2813.
- [10] Li, X., Yu, L., Zhao, W., Shi, Y., Yu, L., Dong, Y., ... Fu, F., 2020, Prism-shaped hollow carbon decorated with polyaniline for microwave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 379, 122393. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122393>.
- [11] Singh, S. K., Prakash, H., Akhtar, M. J., & Kar, K. K., 2018, Lightweight and high-performance microwave absorbing heteroatom-doped carbon derived from chicken feather fibers. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(4), 5381-5393.
- [12] Yan, X., Huang, X., Chen, Y., Liu, Y., Xia, L., Zhang, T., ... Zhou, Y., 2021, A theoretical strategy of pure carbon materials for lightweight and excellent absorption performance. *Carbon*, 174, 662-672. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.11.044>.

- [13] Yan, X., Huang, X., Zhong, B., Wu, T., Wang, H., Zhang, T., ... Xia, L., 2020, Balancing interface polarization strategy for enhancing electromagnetic wave absorption of carbon materials. *Chemical Engineering Journal*, 391, 123538. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123538>.
- [14] Shu, X., Zhou, J., Lian, W., Jiang, Y., Wang, Y., Shu, R., ... Zhuang, Y., 2021 Size-morphology control, surface reaction mechanism and excellent electromagnetic wave absorption characteristics of Fe₃O₄ hollow spheres. *Journal of Alloys and Compounds*, 854, 157087. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157087>.
- [15] Wu, Z., Cheng, H. W., Jin, C., Yang, B., Xu, C., Pei, K., ... Che, R., 2022, Dimensional design and core-shell engineering of nanomaterials for electromagnetic wave absorption. *Advanced Materials*, 34(11), 2107538. <https://doi.org/10.1002/adma.202107538>.
- [16] Wang, L., Li, X., Shi, X., Huang, M., Li, X., Zeng, Q., Che, R., 2021, Recent progress of microwave absorption microspheres by magnetic-dielectric synergy. *Nanoscale*, 13(4), 2136-2156. <https://doi.org/10.1039/D0NR06267G>.
- [17] Jin, L., Wang, J., Wu, F., Yin, Y., Zhang, B., 2021, MXene@Fe₃O₄ microspheres/fibers composite microwave absorbing materials: Optimum composition and performance evaluation. *Carbon*, 182, 770-780. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.06.073>.
- [18] Walser, R. M., 2001, Electromagnetic metamaterials. In *Complex Mediums II: beyond linear isotropic dielectrics* (Vol. 4467, pp. 1-15). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.432921>.
- [19] Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., Padilla, W. J., 2008, Perfect metamaterial absorber. *Physical review letters*, 100(20), 207402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402>.
- [20] Yu, P., Besteiro, L. V., Huang, Y., Wu, J., Fu, L., Tan, H. H., ... Wang, Z., 2019, Broadband metamaterial absorbers. *Advanced Optical Materials*, 7(3), 1800995. <https://doi.org/10.1002/adom.201800995>.
- [21] Nguyen, T. Q. H., Nguyen, T. K. T., Cao, T. N., Nguyen, H., Bach, L. G., 2020, Numerical study of a broadband metamaterial absorber using a single split circle ring and lumped resistors for X-band applications. *AIP Advances*, 10(3). <https://doi.org/10.1063/1.5143915>.
- [22] Dang, P. T., Kim, J., Nguyen, T. K., Le, K. Q., & Lee, J. H., 2021, Ultra-broadband metamaterial absorber for high solar thermal energy conversion efficiency. *Physica B: Condensed Matter*, 620, 413261. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.413261>.
- [23] Muthukrishnan, K., & Narasimhan, V., 2019, An ultra-thin triple-band polarization-independent wide-angle microwave metamaterial absorber. *Plasmonics*, 14(6), 1983-1991. <https://doi.org/10.1007/s11468-019-00985-y>.
- [24] Tran, C. M., Van Pham, H., Nguyen, H. T., Nguyen, T. T., Vu, L. D., & Do, T. H., 2019, Creating multiband and broadband metamaterial absorber by multiporous square layer structure. *Plasmonics*, 14(6), 1587-1592. <https://doi.org/10.1007/s11468-019-00953-6>.
- [25] Zhang, H., Zhang, H. F., Liu, G. B., Li, H. M., 2019, Ultra-broadband

multilayer absorber with the lumped resistors and solid-state plasma. *Results in Physics*, 12, 917-924. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.12.059>.

[26] Shen, Z., Tan, R., Yuan, S., Chen, P., Wang, X., 2026, Synthesis of FeNi/FeCo@ C Composites with Multiple Heterointerfaces and Magnetic Phases for Low-Frequency Microwave Absorption. *ACS Applied Electronic Materials*, 8, 3, 1242-1252. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.5c02438>.

[27] Li, W., Wei, J., Wang, W., Hu, D., Li, Y., Guan, J., 2016, Ferrite-based metamaterial microwave absorber with absorption frequency magnetically tunable in a wide range. *Materials & Design*, 110, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.118>.

[28] Cui, H., Liu, K., Gao, H., Lu, L., Hu, G., 2024, Broadband absorptive metamaterials enhanced by magnetic rubber to broaden bandwidth. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 181, 108668. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108668>.

[29] Ding, Z., Zhang, J., Fu, R., Xu, M., Si, Y., Jin, W., Xu, R., 2024, An ultra-wideband magnetic composite metamaterial microwave absorber embedded with multilayered graphene FSS. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 603, 172268. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172268>.

[30] Li, Y., Han, Y., Yan, L., Zheng, X., Liu, P., Liu, P., 2025, Multifunctional design of radar absorbing structures based on material and structure synergistic effect. *Nano Research*, 18(9), 94907643. <https://doi.org/10.26599/NR.2025.94907643>.

[31] Kang, L., Zhao, Q., Zhao, H., Zhou, J., 2008, Magnetically tunable negative permeability metamaterial composed by split ring resonators and ferrite rods. *Optics express*, 16(12), 8825-8834. <https://doi.org/10.1364/OE.16.008825>.

[32] Huang, Y., Wen, G., Zhu, W., Li, J., Si, L. M., Premaratne, M., 2014, Experimental demonstration of a magnetically tunable ferrite based metamaterial absorber. *Optics express*, 22(13), 16408-16417. <https://doi.org/10.1364/OE.22.016408>.

[33] Nguyen, T. M., Vu, D. C., Vu, D. L., Pham, V. H., Pham, V. D., Nguyen, T. T., & Tran, M. C., 2025, Broadband metamaterial absorber using multi-disk structure in the THz region. *Communications in Physics*, 35(2), 181-181. <https://doi.org/10.15625/0868-3166/22113>.

[34] Khuyen, B. X., Tan, P. D., Tung, B. S., Hai, N. P., Tuan, P. D., Phong, D. X., ... Lee, Y., 2025, Numerical Optimization of Metamaterial-Enhanced Infrared Emitters for Ultra-Low Power Consumption. In *Photonics* (Vol. 12, No. 6, p. 583). <https://doi.org/10.3390/photonics12060583>.

[35] Lam, V. D., Dang, N. T., 2024, Various CVD-grown ZnO nanostructures for nanodevices and interdisciplinary applications. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 15(1), 1390-1399. <https://doi.org/10.3762/bjnano.15.112>.

[36] Pham, T. S., Khuyen, B. X., Lam, V. D., Chen, L., Lee, Y., 2025, Wide-Angle, Polarization-Independent Broadband Metamaterial Absorber by Using Plasmonic Metasurface-Based Split-Circular Structure. In *Photonics* (Vol. 12, No. 4, p. 334). <https://doi.org/10.3390/photonics12040334>.

[37] Thanh, T. D., Tung, B. S., Dat, T. Q., Linh, D. C., Khuyen, B. X., Giang, L. T., ... Lam, D. S., 2025, Improving the multiferroic properties and ability to absorb electromagnetic microwaves of NFO/BZT-BCT composites. *RSC advances*, 15(30),

24679-24695. <https://doi.org/10.1039/D5RA03621F>.

[38] Thanh, T. D., Tran, N., Chinh, N. T. V., Giang, T. T. H., Manh, D. H., & Tuan, N. Q., 2024, Development of high-efficiency tri-layer microwave absorbing materials based on SrMeFe₁₁O₁₉ hexaferrite. *Journal of Alloys and Compounds*, 970, 172421. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172421>.

[39] Nga, T. T. V., Lan, N. T., Loan, T. T., Dat, T. Q., 2024, Enhancement of the microwave absorption properties of the SrFe₁₂O₁₉@Fe₃O₄@rGO composite material. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 9(3), 100758. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2024.100758>.

[40] Chu Thị Anh Xuân, 2018, *Nghiên cứu chế tạo một số vật liệu hấp thụ sóng vi ba trên cơ sở tổ hợp vật liệu điện môi La_{1,5}Sr_{0,5}NiO₄ với các hạt nano từ*, Luận án Tiến sĩ Vật liệu điện tử, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Hà Nội.

[41] Hoàng Anh Tuấn, 2010, *Nghiên cứu tổng hợp và chế tạo sơn ngụy trang hấp thụ sóng điện từ radar trên cơ sở polyme dẫn chứa ferocen và spinel ferit*, Luận án Tiến sĩ Hóa học, Đại học Khoa học tự nhiên, Hà Nội.

[42] Đinh Hồng Tiệp, 2019, *Nghiên cứu chế tạo vật liệu hấp thụ băng tần rộng vùng GHz trên cơ sở MMs*, Luận án Tiến sĩ Vật liệu điện tử, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Hà Nội.

[43] 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 Vật liệu điện tử, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Hà Nội.

[44] Nguyễn Thị Kim Thu, 2022, *Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ băng rộng sử dụng MMs tích hợp phân tử tổn hao*, Luận án Tiến sĩ Vật liệu điện tử, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Hà Nội.

[45] Lê Văn Long, 2023, *Nghiên cứu điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa bằng tác động cơ học và điện áp*, Luận án Tiến sĩ Vật liệu điện tử, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Hà Nội.

[46] Tang, K., Long, F., Zhang, F., Yin, H., Zhao, J., Xie, M., ... Chi, B., 2025, Research Progress on High-Temperature-Resistant Electromagnetic Wave Absorbers Based on Ceramic Materials: A Review. *Nanomaterials*, 15(4), 268. <https://doi.org/10.3390/nano15040268>.

[47] Liu, G. H., Wei, C. Y., Huang, T., Wang, F., Chang, J. F., Sun, Q., Zhang, X. H., 2024, Metal-catalyzed carbon foams synthesized from glucose as highly efficient electromagnetic absorbers. *Materials*, 17(14), 3488. <https://doi.org/10.3390/ma17143488>.

[48] Pozar, D. M., 2011, *Microwave engineering: theory and techniques*. John Wiley & sons.

[49] Ján, K., Michaela, D., Lucia, B., Rastislav, D., 2025, Influence of Manganese–Zinc Ferrite and Ageing on EMI Absorption Shielding Performance and Properties of Rubber Composites. *Journal of Composites Science*, 9(12), 700. <https://doi.org/10.3390/jcs9120700>.

[50] Ma, C., Zhang, Y., 2025, Progress in High-Entropy Alloy-Based Microwave Absorbing Materials. *Symmetry*, 17(8), 1286. <https://doi.org/10.3390/sym17081286>.

[51] Buschow, K. H., Boer, F. R., 2003, *Physics of magnetism and magnetic*

materials (Vol. 7, pp. 11-17). New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.

[52] Bonneviot, L., Olivier, D., 1994, Ferromagnetic resonance. In *Catalyst Characterization: Physical Techniques for Solid Materials* (pp. 181-214). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9589-9_7.

[53] Houbi, A., Aldashevich, Z. A., Atassi, Y., Telmanovna, Z. B., Saule, M., Kubanych, K., 2021, Microwave absorbing properties of ferrites and their composites: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 529, 167839. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.167839>.

[54] Chow, A. N., Morris, K. A., Rabbah, G. F., 2023, Hysteresis and Stability. *SIAM Review*, 65(4), 1171-1184. <https://doi.org/10.1137/21M1420733>.

[55] Kumar, P., Kumar, A., 2025, Review of Morphology and Size-Biased Microwave Absorbing Nanomaterials. *ACS Applied Nano Materials*. <https://doi.org/10.1021/acsnm.5c02368>.

[56] Bhatia, E., Senapati, K., 2021, *Natural synthetic domain wall induced spin triplet correlations in superconducting multilayers and josephson junctions* (Doctoral dissertation, School of Physical Sciences, NISER, Bhubaneswar).

[57] Landau, L. A. L. E., Lifshitz, E., 1935, On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies. *Phys. Z. Sowjetunion*, 8(153), 101-114.

[58] Kittel, C., 1948, On the theory of ferromagnetic resonance absorption. *Physical review*, 73(2), 155.

[59] Yin, P., Lan, D., Lu, C., Jia, Z., Feng, A., Liu, P., ... Wang, J., 2025, Research progress of structural regulation and composition optimization to strengthen absorbing mechanism in emerging composites for efficient electromagnetic protection. *Journal of Materials Science & Technology*, 204, 204-223. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.04.007>.

[60] Bertotti, G., 1985, Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. I. Theoretical considerations. *Journal of applied Physics*, 57(6), 2110-2117.

[61] Liu, S., Cheng, Y., Yan, S., He, J., Deng, L., Luo, H., 2022, Unravelling the electromagnetic behavior in ordered double-perovskite Sr₂FeMoO₆. *Journal of Electronic Materials*, 51(7), 3430-3437. <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09603-w>.

[62] Zheng, W., Ye, W., Yang, P., Wang, D., Xiong, Y., Liu, Z., ... Zhang, Y., 2022, Recent progress in iron-based microwave absorbing composites: A review and prospective. *Molecules*, 27(13), 4117. <https://doi.org/10.3390/molecules27134117>.

[63] Mandal, D., Bhandari, B., Mullurkara, S. V., Ohodnicki, P. R., 2024, All-Around Electromagnetic Wave Absorber Based on Ni-Zn Ferrite. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(26), 33846-33854. <https://doi.org/10.1021/acsnami.4c06498>.

[64] Parke, L., Youngs, I. J., Gallagher, C. P., Hibbins, A. P., Sambles, J. R., 2022, Tailoring the refractive index of impedance-matched ferrite composites. *Scientific Reports*, 12(1), 15818. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19188-3>.

[65] Zhang, S., Lan, D., Zheng, J., Zhao, Z., Jia, Z., Wu, G., 2024. Insights into polarization relaxation of electromagnetic wave absorption. *Cell Reports Physical Science*, 5(9). <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102206>.

[66] Chen, L. F., Ong, C. K., Neo, C. P., Varadan, V. V., Varadan, V. K., 2004, *Microwave electronics: measurement and materials characterization*. John Wiley & Sons.

- [67] Wang, H., & Yang, L., 2023, Dielectric constant, dielectric loss, conductivity, capacitance and model analysis of electronic electroactive polymers. *Polymer Testing*, 120, 107965. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107965>.
- [68] Jonscher, A. K., 2002, The 'universal' dielectric response. I. *IEEE electrical insulation magazine*, 6(2), 16-22. <https://doi.org/10.1038/267673a0>.
- [69] Qin, M., Zhang, L., Wu, H., 2022, Dielectric loss mechanism in electromagnetic wave absorbing materials. *Advanced Science*, 9(10), 2105553. <https://doi.org/10.1002/advs.202105553>.
- [70] Nasir, N., Al Ahmad, M., 2020, Cells electrical characterization: dielectric properties, mixture, and modeling theories. *Journal of Engineering*, 2020(1), 9475490. <https://doi.org/10.1155/2020/9475490>.
- [71] Batyuk, L., Kizilova, N., 2018, Modeling of dielectric permittivity of the erythrocytes membrane as a three-layer model. <https://doi.org/10.30525/978-9934-571-31-2>.
- [72] Radoń, A., Łukowiec, D., Kremzer, M., Miśka, J., Włodarczyk, P., 2018, Electrical conduction mechanism and dielectric properties of spherical shaped Fe₃O₄ nanoparticles synthesized by co-precipitation method. *Materials*, 11(5), 735. <https://doi.org/10.3390/ma11050735>.
- [73] Hussein, H., Ibrahim, S. S., & Khairy, S. A., 2025, Eco-friendly CoFe₂O₄ ferrite nanoparticles prepared using greek yogurt solution: deep insights into optical properties and abnormal semiconductor–insulator–semiconductor transitions for optoelectronics and catalytic applications. *Materials Advances*, 6(7), 2297-2327. <https://doi.org/10.1039/D4MA01172D>.
- [74] Arras, R., Sharma, K., Calmels, L., 2024, Interplay between oxygen vacancies and cation ordering in the NiFe₂O₄ spinel ferrite. *Journal of Materials Chemistry C*, 12(2), 556-561. <https://doi.org/10.1039/D3TC03368F>.
- [75] Sebastian, M. T., Uvic, R., Jantunen, H. (Eds.), 2017, *Microwave materials and applications*. John Wiley & Sons.
- [76] Green, M., & Chen, X., 2019, Recent progress of nanomaterials for microwave absorption. *Journal of Materiomics*, 5(4), 503-541. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2019.07.003>.
- [77] Lu, B., Dong, X. L., Huang, H., Zhang, X. F., Zhu, X. G., Lei, J. P., Sun, J. P., 2008, Microwave absorption properties of the core/shell-type iron and nickel nanoparticles. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 320(6), 1106-1111. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.10.030>.
- [77] Liu, C., Yu, D., Kirk, D. W., & Xu, Y., 2017,. Electromagnetic wave absorption of silicon carbide based materials. *RSC advances*, 7(2), 595-605. <https://doi.org/10.1039/C6RA25142K>.
- [79] Rani, S., Marwaha, A., & Marwaha, S., 2018, Exploring the feasibility of development of nanomaterial-based microwave absorbers. *International Nano Letters*, 8(4), 241-254. <https://doi.org/10.1007/s40089-018-0254-2>.
- [80] Rusly, S. N. A., Matori, K. A., Ismail, I., Abbas, Z., Awang, Z., Zulkimi, M. M. M., ... Zulfikri, N. D., 2018, Microwave absorption properties of single-and double-layer coatings based on strontium hexaferrite and graphite nanocomposite. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(16), 14031-14045. <https://doi.org/>

10.1007/s10854-018-9535-9.

[81] Quan, B., Shi, W., Ong, S. J. H., Lu, X., Wang, P. L., Ji, G., ... Xu, Z. J., 2019, Defect engineering in two common types of dielectric materials for electromagnetic absorption applications. *Advanced Functional Materials*, 29(28), 1901236. <https://doi.org/10.1002/adfm.201901236>.

[82] Zhao, H., Han, X., Han, M., Zhang, L., Xu, P., 2010, Preparation and electromagnetic properties of multiwalled carbon nanotubes/Ni composites by γ -irradiation technique. *Materials Science and Engineering: B*, 167(1), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2010.01.003>.

[83] Li, Y., Chen, X., Wei, Q., Liu, W., Zhang, Y., Qin, G., ... Zhang, X., 2020, Oxygen-sulfur Co-substitutional Fe@C nanocapsules for improving microwave absorption properties. *Science Bulletin*, 65(8), 623-630. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.01.009>.

[84] Qing, Y. C., Zhou, W. C., Jia, S., Luo, F., Zhu, D. M., 2010, Electromagnetic and microwave absorption properties of carbonyl iron and carbon fiber filled epoxy/silicone resin coatings. *Applied Physics A*, 100(4), 1177-1181. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5738-5>

[85] Chen, X., Wang, X., Li, L., Qi, S., 2016, Preparation and microwave absorbing properties of nickel-coated carbon fiber with polyaniline via in situ polymerization. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(6), 5607-5612. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4466-9>.

[86] Choi, M., Lee, S., Kim, J., 2017, Clustering effect on the frequency-dependent magnetic properties of Fe–Co micro hollow fiber composites. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2718181>.

[87] Sui, M., Sun, X., Lou, H., Li, X., Lv, X., Li, L., & Gu, G., 2018, Synthesis of hollow Fe₃O₄ particles via one-step solvothermal approach for microwave absorption materials: Effect of reactant concentration, reaction temperature and reaction time. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(9), 7539-7550. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8746-4>.

[88] Ge, C., Wang, L., Liu, G., Wang, T., Chen, H., 2019, Effects of particle size on electromagnetic properties of spherical carbonyl iron. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(9), 8390-8398. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01156-9>.

[89] Zhao, B., Fan, B., Xie, Y., Zhang, R., 2015, Effect of particle sizes on the microwave absorption properties of monodispersed Ni submicrospheres. *Optik*, 126(23), 4597-4600. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.08.095>.

[90] Wu, H., Wu, G., Ren, Y., Yang, L., Wang, L., Li, X., 2015, Co²⁺/Co³⁺ ratio dependence of electromagnetic wave absorption in hierarchical NiCo₂O₄–CoNiO₂ hybrids. *Journal of Materials Chemistry C*, 3(29), 7677-7690. <https://doi.org/10.1039/C5TC01716E>.

[91] Hou, J., Zhang, L., Qiu, H., Duan, W., Wang, X., Wan, X., Du, X., 2017, Fabrication and microwave absorption performances of hollow-structure Fe₃O₄/PANI microspheres. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(13), 9279-9288. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6664-5>.

[92] Deng, Y., Zhao, L., Shen, B., Liu, L., Hu, W., 2006, Microwave

characterization of submicrometer-sized nickel hollow sphere composites. *Journal of applied physics*, 100(1). <https://doi.org/10.1063/1.2210187>.

[93] Cheng, Y., Cao, J., Li, Y., Li, Z., Zhao, H., Ji, G., Du, Y., 2018, The outside-in approach to construct Fe₃O₄ nanocrystals/mesoporous carbon hollow spheres core-shell hybrids toward microwave absorption. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(1), 1427-1435. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03846>.

[94] Huang, Y., Qi, Q., Pan, H., Lei, X., Liu, X., 2016, Facile preparation of octahedral Fe₃O₄/RGO composites and its microwave electromagnetic properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(9), 9577-9583. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5011-6>.

[95] Feng, W., Luo, H., Wang, Y., Zeng, S., Tan, Y., Deng, L., ... Peng, S., 2019, Mxenes derived laminated and magnetic composites with excellent microwave absorbing performance. *Scientific reports*, 9(1), 3957. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40336-9>.

[96] Xu, Z., Du, Y., Liu, D., Wang, Y., Ma, W., Wang, Y., ... Han, X., 2019, Pea-like Fe/Fe₃C nanoparticles embedded in nitrogen-doped carbon nanotubes with tunable dielectric/magnetic loss and efficient electromagnetic absorption. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(4), 4268-4277. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b19201>.

[97] Li, J., Yao, H., Huang, Y., Wang, H., 2024, Microwave Absorption and Magnetic Properties of M-Type Hexagonal Ferrite Ba_{0.95}Ca_{0.05}Fe_{12-x}Co_xO₁₉ (0 ≤ X ≤ 0.4) at 1–18 GHz. *Materials*, 17(21), 5327. <https://doi.org/10.3390/ma17215327>.

[98] Chen, X., Lan, D., Zhou, L., Liu, H., Song, X., Wang, S., ... & Wu, G., 2025, Review of recent advances in ferrite-based materials: From synthesis techniques to electromagnetic wave absorption performance. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 32(3), 591-608. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-3063-9>.

[99] Kaushik, S., Dabla, M., Kumar, P., Sharma, M., & Kuanr, B. K., 2026, Engineering the microstructural properties of Mg-doped Ni-Zn ferrite nanoparticles for enhanced microwave absorption. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2026.03.466>

[100] Kempa, M., Bovtun, V., Kukhar, V., Solopan, S., Belous, A., V'yunov, O., ... Kamba, S., 2025, High-Frequency and Microwave Magnetic Properties of Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ Spinel Ferrite Ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 181675. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.181675>.

[101] Aherrao, D. S., Singh, C., Srivastava, A. K., 2022, Review of ferrite-based microwave-absorbing materials: Origin, synthesis, morphological effects, dielectric/magnetic properties, composites, absorption mechanisms, and optimization. *Journal of Applied Physics*, 132(24). <https://doi.org/10.1063/5.0123263>.

[102] Kuang, D., Wang, S., 2024, Microwave absorption of FeCo-C core-shell nanoparticles with tunable thickness of C shells and the underlying mechanism. *Advanced Powder Technology*, 35(12), 104694. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2024.104694>.

[103] Jia, X., Zhang, H., Liu, F., Yi, Q., Li, C., Wang, X., Piao, M., 2024, Exploring the Microstructural Effect of FeCo Alloy on Carbon Microsphere Deposition and Enhanced Electromagnetic Wave Absorption. *Nanomaterials*, 14(14), 1194.

<https://doi.org/10.3390/nano14141194>.

[104] Liang, L., Wu, J., Wang, B., Kong, C., Pervikov, A., Shi, H., Li, X., 2025, Microstructure and electromagnetic wave absorption properties of FeCo/graphene composites prepared by electrical wire explosion method. *Applied Surface Science*, 681, 161577. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161577>.

[105] Cui, X. J., Jiang, Q. R., Wang, C. S., Wang, S. H., Jiang, Z. Y., Li, X. A., Deng, D. H., 2021, Encapsulating FeCo alloys by single layer graphene to enhance microwave absorption performance. *Materials Today Nano*, 16, 100138. <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2021.100138>.

[106] Namai, A., Yoshikiyo, M., Yamada, K., Sakurai, S., Goto, T., Yoshida, T., ... Ohkoshi, S. I., 2012, Hard magnetic ferrite with a gigantic coercivity and high frequency millimetre wave rotation. *Nature communications*, 3(1), 1035. <https://doi.org/10.1038/ncomms2038>.

[107] Sudrajat, N., Taryana, Y., Dedi, D., Adi, W. A., Darmawan, L., Manaf, A., 2022, Hard magnetic and broadband microwave absorption characteristics of heat-treated $\text{Pr}_{15-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ ($x = 0, 1, 2$, and 3) alloys. *Heliyon*, 8(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10707>.

[108] Chen, X., Lan, D., Zhou, L., Liu, H., Song, X., Wang, S., ... Wu, G., 2025, Review of recent advances in ferrite-based materials: From synthesis techniques to electromagnetic wave absorption performance. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 32(3), 591-608. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-3063-9>

[109] Xu, W., Liu, N., Lu, Z., 2024, Recent Progress of Iron-Based Magnetic Absorbers and Its Applications in Elastomers: A Review. *Materials*, 17(16), 4058. <https://doi.org/10.3390/ma17164058>.

[110] Fullerton, E. E., Jiang, J. S., Bader, S. D., 1999, Hard/soft magnetic heterostructures: model exchange-spring magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 200(1-3), 392-404. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00376-5](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00376-5).

[111] Maltoni, P., Sarkar, T., Barucca, G., Varvaro, G., Locardi, F., Peddis, D., Mathieu, R., 2021, Tuning the magnetic properties of hard-soft $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ nanostructures via composition/interphase coupling. *The Journal of Physical Chemistry C*, 125(10), 5927-5936. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c00355>.

[112] Pahwa, C., Narang, S. B., Sharma, P., 2019, Interfacial exchange coupling driven magnetic and microwave properties of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanocomposites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 484, 61-66. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.03.127>.

[113] Shi, Y., Zhang, M., Zhang, X., Zhang, L., Zhang, Y., Jiang, Z., ... Gong, C., 2019, Achieving excellent metallic magnet-based absorbents by regulating the eddy current effect. *Journal of Applied Physics*, 126(10). <https://doi.org/10.1063/1.5109538>.

[114] Shi, P., Wang, M., Zhu, Y., Li, X., Gao, R., Zhao, H., Liu, S., 2025, Topology Optimization Design for Broadband Water-Based Electromagnetic Metamaterial Absorber with High Absorption Rate. In *Photonics* (Vol. 12, No. 10, p. 984). <https://doi.org/10.3390/photonics12100984>.

[115] Wang, Y., Liu, Z., Zhou, F., Yi, Z., Wang, J., 2025, Perfect absorption properties of a near-infrared super-surface perfect absorber based on a multilayer

subwavelength array structure. *Physics Letters A*, 540, 130395. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2025.130395>.

[116] Staelin, D. H., 2011, *Electromagnetics and applications* (pp. 1-442). Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology.

[117] Ghafourivayghan, M., Shabunin, S., 2025, Design and analysis of a multi-layer circuit absorber with ultra-wideband and polarization insensitivity. *Scientific Reports*, 15(1), 34132. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99904-x>.

[118] Chen, H. T., 2012, Interference theory of metamaterial perfect absorbers. *Optics express*, 20(7), 7165-7172. <https://doi.org/10.1364/OE.20.007165>.

[119] Smith, D. R., Schultz, S., Markoš, P., Soukoulis, C. M., 2002, Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients. *Physical review B*, 65(19), 195104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.195104>.

[120] Tang, Q., He, J. X., Chai, Y. Q., Ouyang, P. H., Wei, L. F., 2025, Experimental verification of superconducting metamaterial quarter-wavelength transmission line resonators with non-uniform mode spacing. *Scientific Reports*, 15(1), 9119. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89931-z>.

[121] Zhang, Y., Wang, X., Yang, S., Zhang, J., Gao, Y., Li, Z., 2025, Ultrabroadband microwave metamaterial absorber with dielectric lossy layer. *Scientific Reports*, 15(1), 12547. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97277-9>.

[122] Ranjan, S. K., Sahoo, S., 2024, A review of metamaterial-based microwave absorbers and sensors. *Journal of Electronic Materials*, 53(2), 571-595. <https://doi.org/10.1007/s11664-023-10809-9>.

[123] Zhao, C., Jia, M., Zhang, N., Meng, S., Tian, Y., 2025, Ultra-wideband optically transparent flexible metamaterial absorber for satellite stealth. *Scientific Reports*, 15(1), 29093. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09951-7>.

[124] Hao, D., Liu, J., Zou, P., Zhang, Y., Moro, R., Ma, L., 2024, All-dielectric Metasurfaces and Their Applications in the Terahertz Range. *Laser & Photonics Reviews*, 18(9), 2301210. <https://doi.org/10.1002/lpor.202301210>.

[125] Babicheva, V. E., Evlyukhin, A. B., 2024, Mie-resonant metaphotonics. *Advances in Optics and Photonics*, 16(3), 539-658. <https://doi.org/10.1364/AOP.510826>.

[126] Khalil, M. A., Islam, M. T., Yong, W. H., Islam, M. S., Goh, H. H., Kurniawan, T. A., ... Khawaja, A. W., 2025, Design and validation of a multi-band metamaterial absorber for microwave applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 193, 155718. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2025.155718>.

[127] Bakir, M., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., Sabah, C., 2017, Microwave metamaterial absorber for sensing applications. *Opto-Electronics Review*, 25(4), 318-325. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2017.10.002>.

[128] Dai, X. W., Lin, S. Y., Mao, S. W., Luo, G. Q., 2020, Broadband metamaterial absorber with double resonant modes using single-layer substrate. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 119, 153179. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153179>.

[129] Garg, P., Jain, P., 2020, Novel ultrathin penta-band metamaterial absorber. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 116, 153063. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153063>.

[130] Xin, W., Binzhen, Z., Wanjun, W., Junlin, W., Junping, D., 2017, Design and characterization of an ultrabroadband metamaterial microwave absorber. *IEEE Photonics Journal*, 9(3), 1-13. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2700056>.

[131] Park, J. W., Van Tuong, P., Rhee, J. Y., Kim, K. W., Jang, W. H., Choi, E. H., ... & Lee, Y., 2013, Multi-band metamaterial absorber based on the arrangement of donut-type resonators. *Optics express*, 21(8), 9691-9702. <https://doi.org/10.1364/OE.21.009691>.

[132] Zheng, H. Y., Jin, X. R., Park, J. W., Lu, Y. H., Rhee, J. Y., Jang, W. H., ... Lee, Y. P., 2012, Tunable dual-band perfect absorbers based on extraordinary optical transmission and Fabry-Perot cavity resonance. *Optics express*, 20(21), 24002-24009. <https://doi.org/10.1364/OE.20.024002>.

[133] Ghosh, S., Bhattacharyya, S., Kaiprath, Y., Vaibhav Srivastava, K., 2014, Bandwidth-enhanced polarization-insensitive microwave metamaterial absorber and its equivalent circuit model. *Journal of Applied Physics*, 115(10). <https://doi.org/10.1063/1.4868577>.

[134] Wang, N., Tong, J., Zhou, W., Jiang, W., Li, J., Dong, X., Hu, S., 2015, Novel quadruple-band microwave metamaterial absorber. *IEEE Photonics Journal*, 7(1), 1-6. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2399356>.

[135] Long, L. V., Khiem, N. S., Tung, B. S., Tung, N. T., Giang, T. T., Son, P. T., ... Lee, Y., 2021, Flexible broadband metamaterial perfect absorber based on graphene-conductive inks. In *Photonics* (Vol. 8, No. 10, p. 440). <https://doi.org/10.3390/photonics8100440>.

[136] Cheng, Y., He, B., Zhao, J., & Gong, R., 2017, Ultra-thin low-frequency broadband microwave absorber based on magnetic medium and metamaterial. *Journal of Electronic Materials*, 46(2), 1293-1299. <https://doi.org/10.1007/s11664-016-5115-z>.

[137] Du, Z., Liang, J., Cai, T., Wang, G., Deng, T., Wu, B., 2022, Designing an ultra-thin and wideband low-frequency absorber based on lumped resistance. *Optics Express*, 30(2), 914-925. <https://doi.org/10.1364/OE.445081>.

[138] Zhang, Z., Zhang, L., Chen, X., Wu, Z., He, Y., Lv, Y., Zou, Y., 2020, Broadband metamaterial absorber for low-frequency microwave absorption in the S-band and C-band. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 497, 166075. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166075>.

[139] Huang, W., Zhu, Z., 2023, Broadband metamaterial absorbers based on magnetic composites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 576, 170792. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170792>.

[140] Shou, H., Qi, B., Lv, H., Feng, J., Mei, Z., 2024, A low-frequency ultrathin metamaterial absorber using magnetic material. *Journal of Applied Physics*, 135(8). <https://doi.org/10.1063/5.0192913>.

[141] Wang, Y., Zhang, P., Li, K., Xin, T., Yang, W., Liu, S., ...Yang, J., 2025, Tunable magnetic properties and microwave absorbing properties of $(\text{Nd}_{1-x}\text{Y}_x)_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{3-\delta}$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 613, 172677. <https://doi.org/10.1016/>

j.jmmm.2024.172677.

[142] Amano, M., Kotsuka, Y., 2003, A method of effective use of ferrite for microwave absorber. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 51(1), 238-245. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2002.806912>.

[143] Zhao, H., Zhou, J., Kang, L., Zhao, Q., 2009, Tunable two-dimensional left-handed material consisting of ferrite rods and metallic wires. *Optics Express*, 17(16), 13373-13380. <https://doi.org/10.1364/OE.17.013373>.

[144] Wang, W., Xu, C., Yan, M., Wang, A., Wang, J., Feng, M., ... Qu, S., 2019, Broadband tunable metamaterial absorber based on U-shaped ferrite structure. *IEEE Access*, 7, 150969-150975. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2947140>.

[145] Nguyễn Đức Nghĩa, 2003, Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng rada của vật liệu tầng hình từ conducting polyme, *Tạp chí Hóa học*, T. 41, 127 - 131.

[146] Hoàng Anh Sơn, Phạm Hồng Nam, Phan Ngọc Minh, 2009, Nghiên cứu tính hấp thụ sóng điện từ của vật liệu nanocompozit trên cơ sở nhựa epoxy và cacbon nanotube, *Tạp chí Hóa học*, 47(4), 414-421.

[147] Tran, M. C., Pham, V. H., Ho, T. H., Nguyen, T. T., Do, H. T., Bui, X. K., ...Vu, D. L., 2020, Broadband microwave coding metamaterial absorbers. *Scientific Reports*, 10(1), 1810. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58774-1>.

[148] Nguyen, T. H., Nguyen, T. A. H., Dinh, T. N., Bui, X. K., Bui, S. T., Nguyen, X. C., ... Vu, D. L., 2021, Multiband metamaterial absorber in a ring structure base on high-order magnetic resonance. *Communications in Physics*, 31(2), 199-199. <https://doi.org/10.15625/0868-3166/15520>.

[149] Nguyen, T. M., Nguyen, T. K. T., Phan, D. T., Le, D. T., Vu, D. L., Nguyen, T. Q. H., Kim, J. M.I, 2022, Ultra-wideband and lightweight electromagnetic polarization converter based on multiresonant metasurface. *IEEE Access*, 10, 92097-92104. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3202530>.

[150] Bakir, M., Karaaslan, M., Dincer, F., Delihacioglu, K., Sabah, C., 2015, Perfect metamaterial absorber-based energy harvesting and sensor applications in the industrial, scientific, and medical band. *Optical Engineering*, 54(9), 097102-097102. <https://doi.org/10.1117/1.OE.54.9.097102>.

[151] Jorwal, S., Dubey, A., Gupta, R., Agarwal, S., 2023, A review: Advancement in metamaterial based RF and microwave absorbers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 354, 114283. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114283>.

[152] Chowdhury, M. Z. B., Islam, M. T., Alqahtani, A., Alshammari, A. S., Soliman, M. S., Alamri, S., Samsuzzaman, M., 2024, Synthesis and characterization of Mn-Zn ferrite-based flexible penta-band metamaterial for sensing applications. *Optics & Laser Technology*, 175, 110744. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110744>.

[153] Das, D., Samal, R. R., Dikshit, A. P., Kerai, S., Majhi, S., Parashar, K., Parashar, S. K., 2025, Wideband Microwave Absorption-Dominant EMI Shielding Using Metasurface-Based Absorber with Barium Titanate Ceramic Substrate for X-Band and Ku-Band Application: D. Das et al. *Journal of Electronic Materials*, 54(9), 7848-7870. <https://doi.org/10.1007/s11664-025-12119-8>.

[154] "https://www.cst.com/."

[155] "https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss/."

- [156] "https://www.comsol.com/."
- [157] Yaw, K. C., 2012, Measurement of dielectric material properties. *Application Note. Rohde & Schwarz*, 1-35.
- [158] Goldfarb, R. B., Fickett, F. R., 1985, Units for magnetic properties.
- [159] Henning, S., Adhikari, R., 2017, Scanning electron microscopy, ESEM, and X-ray microanalysis. In *Microscopy methods in nanomaterials characterization* (pp. 1-30). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46141-2.00001-8>.
- [160] Duong, T. X., Tung, D. K., Pham, T. S., Nguyen, H. A., Tung, B. S., Hai, N. P., ... & Lam, V. D., 2025, Broadband metamaterial absorber in the C–Ku bands by exploiting FeCo–C. *Journal of Applied Physics*, 137(6). <https://doi.org/10.1063/5.0245714>.
- [161] Tang Xuan Duong, Do Khanh Tung, Nguyen Hai Anh, Bui Son Tung, Dao Son Lam, Bui Xuan Khuyen and Vu Dinh Lam, 2026, Enhanced and modulated Ku-band absorption of a hybrid Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ metamaterial structure, *TNU Journal of Science and Technology*, 231(06):309-318. <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.14236>.
- [162] Radoń, A., Ciuraszkiewicz, A., Hawelek, Ł., Kubacki, J., Kądziołka-Gaweł, M., Łukowiec, D., ... Kolano-Burian, A., 2024, NiZnFe₂O₄ core-shell nanoflowers as effective EMI shielding material dedicated to the absorption of electromagnetic waves in the UHF band and wide temperature range. *Scripta Materialia*, 244, 116020. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2024.116020>.
- [163] Kamarauskas, A., Seliuta, D., Šlekas, G., Sadauskas, M., Kvietkauskas, E., Trusovas, R., ... Kancleris, Ž., 2022, Experimental demonstration of multiple Fano resonances in a mirrored array of split-ring resonators on a thick substrate. *Scientific Reports*, 12(1), 15846. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20434-x>.
- [164] Huang, X., Pan, K., Hu, Z., 2016, Experimental demonstration of printed graphene nano-flakes enabled flexible and conformable wideband radar absorbers. *Scientific Reports*, 6(1), 38197. <https://doi.org/10.1038/srep38197>.
- [165] Li, X., Huang, C., Wang, Z., Xiang, Z., Lu, W., 2021, Enhanced electromagnetic wave absorption of layered FeCo@ carbon nanocomposites with a low filler loading. *Journal of Alloys and Compounds*, 879, 160465. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160465>.
- [166] Su, X., Wang, J., Zhang, X., Huo, S., Dai, W., & Zhang, B., 2020, Synergistic effect of polyhedral iron-cobalt alloys and graphite nanosheets with excellent microwave absorption performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 829, 154426. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154426>.
- [167] Duong, T. X., Tung, D. K., Khuyen, B. X., Anh, N. T. N., Tung, B. S., Lam, V. D., ... Lee, Y., 2023, Enhanced electromagnetic wave absorption properties of FeCo–C alloy by exploiting metamaterial structure. *Crystals*, 13(7), 1006. <https://doi.org/10.3390/cryst13071006>.
- [168] Zhang, F., Jiang, C., Wang, Q., Zhao, Z., Wang, Y., Du, Z., ... Huang, X., 2020, A multi-band closed-cell metamaterial absorber based on a low-permittivity all-dielectric structure. *Applied Physics Express*, 13(8), 084001. <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ab9877>.
- [169] Zhu, Y., Tian, X., Fang, J., Shi, Y., Shi, S., Zhang, S., ... Yang, F., 2022, Independently tunable all-dielectric synthetic multi-spectral metamaterials based on Mie

resonance. *RSC advances*, 12(32), 20765-20770. <https://doi.org/10.1039/D2RA03014D>.

[170] Bao, X., Wang, X., Zhou, X., Shi, G., Xu, G., Yu, J., ... Choi, C., 2018, Excellent microwave absorption of FeCo/ZnO composites with defects in ZnO for regulating the impedance matching. *Journal of Alloys and Compounds*, 769, 512-520. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.036>.

[171] Jiang, Y., Fu, X., Zhang, Z., Du, W., Xie, P., Cheng, C., Fan, R., 2019, Enhanced microwave absorption properties of Fe₃C/C nanofibers prepared by electrospinning. *Journal of Alloys and Compounds*, 804, 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.038>.

[172] Zhang, J., Shu, R., Guo, C., Sun, R., Chen, Y., & Yuan, J., 2019, Fabrication of nickel ferrite microspheres decorated multi-walled carbon nanotubes hybrid composites with enhanced electromagnetic wave absorption properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 784, 422-430. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.073>.

[173] Balanis, C. A., 2008, Fundamental parameters and definitions for antennas. *Modern Antenna Handbook*, 1-56.

[174] Zhou, W., Zhu, Z., Zou, Q., Yuan, Z., Liu, R., 2022, Broadband and ultra-low reflection metamaterial absorber embedded with magnetic materials. *Current Applied Physics*, 41, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2022.05.019>.

[175] Yang, S., Zhu, Z., Zhou, W., 2022, Composite structure design of a broadband metamaterial absorber based on magnetic composites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 564, 170123. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170123>

[176] Zhuang, H., Wang, X., Wang, J., Guo, M., Tang, D., Zhang, B., ... Yang, Y., 2020, Broadband microwave metamaterial absorber based on magnetic periodic elements. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(25), 255502. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab8138>.

[177] Wu, F., Tong, S., Niu, X., Xiang, J., & Zhou, Y., 2025, Ultrathin and lightweight double-layer microwave absorbing coatings based on electrospun FeCo@carbon nanofibers and commercial MWCNTs toward highly efficient microwave absorption. *Journal of Alloys and Compounds*, 182821. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182821>.

[178] Dong, S., Li, J., Li, N., Zhang, S., Li, B., Zhang, Q., Ge, L., 2023, Enhanced broadband microwave absorption of Fe/C core-shell nanofibers in X and Ku bands. *Ceramics International*, 49(5), 8181-8189. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.342>.

[179] Wei, Y., Xiaoyun, L., Qilong, S., 2025, Lightweight and flexible CNFs/FeCo composite Nanofibrous Membranes: Fabrication and High-Efficiency electromagnetic wave absorption. *Applied Surface Science*, 163961. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.163961>.

[180] Lei, D., Liu, J., Liu, C., Dong, C., Yang, D., Li, Y., ... Guo, Z., 2024, Metal–Organic Frameworks-Derived FeCo/C–CNT Nanocomposites Modified Epoxy Resin for Electromagnetic Protection Coatings for Buildings. *Buildings*, 14(4), 1096. <https://doi.org/10.3390/buildings14041096>.

[181] Deng, T., Liang, J., Cai, T., Wang, C., Wang, X., Lou, J., ... Wang, D., 2021, Ultra-thin and broadband surface wave meta-absorber. *Optics Express*, 29(12), 19193-

19201. <https://doi.org/10.1364/OE.427992>.

[182] Lu, T., Zhang, D., Qiu, P., Lian, J., Jing, M., Yu, B., ... Zhuang, S., 2018, Dual-band perfect metamaterial absorber based on an asymmetric H-shaped structure for terahertz waves. *Materials*, 11(11), 2193. <https://doi.org/10.3390/ma11112193>.

[183] Tang, Y., He, L., Liu, A., Chen, Z., Wang, X., Xu, H., Deng, L., 2024, Lightweight and dual-peak H-pattern metamaterial absorber based on discontinuous dielectric media in the L-band range. *International Journal of Modern Physics B*, 38(23), 2450316. <https://doi.org/10.1142/S0217979224503168>.

[184] Lv, H., Ji, G., Zhang, H., Li, M., Zuo, Z., Zhao, Y., ... Du, Y., 2015, $\text{Co}_x\text{Fe}_y\text{@C}$ composites with tunable atomic ratios for excellent electromagnetic absorption properties. *Scientific reports*, 5(1), 18249. <https://doi.org/10.1038/srep18249>.

[185] Vargas, L. F., Salazar-Tamayo, H., & Barrero, C. A., 2025, Structural, morphological and magnetic properties of MFe_2O_4 (M= Mg, Zn and Ni) synthesized by solid state reaction. *Interactions*, 246(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10751-025-02283-y>.

[186] Sunny, A., Venkataramana, K., Kumar, Y. R., Vasundhara, M., 2025, Low and high temperature magnetic properties of MgFe_2O_4 nanoparticles synthesized by a simple egg white albumin route. *Journal of Crystal Growth*, 662, 128174. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2025.128174>.

[187] Sarkar, S., Gorai, A., & Mandal, K., 2025, A Ferromagnetic Resonance Study of MgFe_2O_4 Nanoparticles as Efficient Microwave Absorber for Different Frequency Bands. *ACS Applied Nano Materials*. <https://doi.org/10.1021/acsanm.5c05016>.

[188] Huang, Q., Xie, W., Alqahtany, F. Z., Cao, T., Mersal, G. A., Toktarbay, Z., 2025, Study on thin-layer broadband metamaterial absorber based on composite multi-opening ring pattern of magnetic dielectric layers. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8(2), 180. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01250-z>.

[189] Araújo, J. C. R., Araujo-Barbosa, S., Souza, A. L. R., Iglesias, C. A. M., Xavier, J., Souza, P. B., ... Bohn, F., 2021, Tuning structural, magnetic, electrical, and dielectric properties of MgFe_2O_4 synthesized by sol-gel followed by heat treatment. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 154, 110051. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2021.110051>.

[190] Abdullah, N. H., Mustaffa, M. S., Hamidon, M. N., Shafie, F. N., Ismail, I., Ibrahim, I. R., 2021, Isochronal recovery behaviour on electromagnetic properties of polycrystalline nickel zinc ferrite ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$) prepared via mechanical alloying. *Scientific Reports*, 11(1), 19642. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99236-6>.

[191] Bajorek, A., Berger, C., Dulski, M., Łopadczak, P., Zubko, M., Prusik, K., ... Randrianantoandro, N., 2019, Microstructural and magnetic characterization of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite nanoparticles. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 129, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2018.12.045>.