

**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**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Vật liệu điện tử

Mã số: 9 44 01 23

Hà Nội - 2026

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ,
Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học:

1. Người hướng dẫn 1: GS.TS. *Vũ Đình Lãm, Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam*
2. Người hướng dẫn 2: TS. *Bùi Sơn Tùng, Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam*

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp cơ sở tại Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi 09 giờ 00, ngày 03 tháng 02 năm 2026.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
2. Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Trong bối cảnh chuyển đổi số diễn ra mạnh mẽ với các hệ thống truyền thông vô tuyến thế hệ mới (5G và xu hướng 6G) và sự phổ cập của IoT, mật độ trường/bức xạ điện từ trong môi trường sinh hoạt và làm việc gia tăng nhanh do số lượng nguồn phát và thiết bị điện-điện tử hoạt động ở dải vi sóng ngày càng dày đặc [1 - 5]. Tác động của điện từ lên hệ sinh học vẫn tiếp tục được quan tâm và khảo sát trên cả mô hình lẫn thực nghiệm. Trong lĩnh vực quốc phòng-an ninh, yêu cầu kiểm soát bức xạ điện từ gắn chặt với công nghệ tàng hình, nhằm giảm tiết diện phản xạ radar của khí tài trước các hệ thống trinh sát hiện đại chủ yếu làm việc ở dải tần GHz; do đó, phát triển các giải pháp che chắn/giảm tương tác điện từ trở thành nhu cầu thiết yếu trong nhiều ứng dụng [6, 7].

Đáp ứng yêu cầu này, vật liệu hấp thụ sóng điện từ (EMWAM) được nghiên cứu mạnh theo hướng chuyển hóa năng lượng điện từ thành nhiệt thông qua các cơ chế tổn hao nội tại. Theo cơ chế chi phối, EMWAM thường gồm ba nhóm: vật liệu hấp thụ điện môi; vật liệu dựa trên điện trở/dẫn điện; và vật liệu hấp thụ từ. Mỗi nhóm có ưu thế riêng: điện môi thường thuận lợi cho phối hợp trở kháng; vật liệu cacbon/dẫn điện có tổn hao điện mạnh và khối lượng riêng thấp; vật liệu từ (ferrite, kim loại, hợp kim từ...) có thể đồng thời cải thiện phối hợp trở kháng và tiêu tán năng lượng qua thông qua độ từ thẩm, do đó đặc biệt có ý nghĩa trong vùng GHz [9, 10]. Tuy nhiên, mục tiêu “mạnh, rộng, nhẹ và mỏng” [11] khó đạt đồng thời: vật liệu điện môi thuần thiếu kênh tổn hao từ nên hiệu quả ở GHz phụ thuộc mạnh vào tối ưu độ điện thẩm theo độ dày; vật liệu cacbon/dẫn điện dễ suy giảm phối hợp trở kháng gây tăng phản xạ bề mặt và ô nhiễm thứ cấp [12, 13]; còn vật liệu từ nền Fe/kim loại tuy có thể hấp thụ mạnh nhưng thường nặng, dễ oxy hóa và khó phối hợp trở kháng với không khí, dẫn đến dải hấp thụ hẹp hoặc khó đạt hấp thụ cao ở độ dày thấp.

Nhu cầu hiện nay không chỉ là hấp thụ cao mà còn tối ưu băng thông, giảm nhạy theo phân cực và góc tới và đặc biệt là khả năng điều chỉnh tần số hấp thụ chủ động. Trên cơ sở đó, vật liệu biến hóa (metamaterial-MM) mở ra hướng thiết kế theo cấu trúc, nổi bật là vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ (metamaterial absorber -MA) do Landy và cộng sự đề xuất năm 2008 [19]. Dù MA đã được chứng minh từ vi sóng đến quang học, việc triển khai ứng dụng vẫn đối mặt các bài toán cốt lõi: giảm độ phức tạp chế tạo nhưng duy trì hấp thụ cao; tăng ổn định theo phân cực/góc tới; mở rộng dải tần (đa đỉnh/băng rộng); và phát triển cơ chế điều khiển tần số hấp thụ theo tác động ngoại vi. Ở dải GHz, các cách tiếp cận như tích hợp nhiều phần tử cộng hưởng hoặc MA đa lớp có thể mở rộng phổ hấp thụ [24] nhưng thường phải đánh đổi bằng ô cơ sở lớn hoặc cấu trúc dày, làm suy giảm lợi thế “mỏng - nhẹ”. Giải pháp dùng linh kiện ngoại vi (điện trở, tụ...) giúp điều chỉnh trở kháng và cộng hưởng [25] song làm tăng đáng kể độ phức tạp chế tạo. Một trong những hướng nghiên cứu tiềm năng để khắc phục những hạn chế này là tích hợp vào MA các vật liệu có tổn hao nội tại để tăng cường và mở rộng vùng hấp thụ. Trong đó, tích hợp vật liệu từ vào cấu trúc MA để tạo vật liệu tổ hợp (từ - metamaterial) (Composite based on magnetic material - metamaterial absorbers - CM-MA) là một hướng nghiên cứu thu hút được sự quan tâm của các nhà nghiên cứu. Trên thế giới, vật liệu tổ hợp CM-MA hấp thụ dải rộng hiện chủ yếu sử dụng vật liệu từ ở dạng tấm phủ, với nhiều hệ vật liệu như sắt carbonyl, ferrite, FeCo-C, CoNi/epoxy... [26-30]. Tuy nhiên, các nghiên cứu về tối ưu độ dày cấu trúc CM-MA còn hạn chế, và hướng sử dụng vật liệu từ như một phần tử/cấu trúc cộng hưởng vẫn chưa được khảo sát rộng rãi. Bên cạnh đó, nghiên cứu điều khiển phổ hấp thụ chủ yếu tập trung vào dịch chuyển tần số hấp thụ, thường dùng $MgFe_2O_4$ và YIG [27, 31, 32]; trong khi đó, các hệ vật liệu từ khác cho điều khiển hấp thụ, đặc biệt là điều khiển biên độ tại tần số cố định và điều khiển phổ đa đỉnh, vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ.

Trong nước, các nghiên cứu về vật liệu từ hấp thụ sóng điện từ và cấu trúc MA cộng hưởng kim loại trong vùng GHz đang được quan tâm phát triển [33-36]. Nhiều hệ vật liệu như Ni-Zn ferrite, hexaferrite, vật liệu từ-điện môi... đã được nghiên cứu [37-39], cùng với một số luận án tiêu biểu về vật liệu hấp thụ sóng điện từ và vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ [40-45]. Tuy nhiên, hướng nghiên cứu tổ hợp vật liệu từ với vật liệu biến hóa nhằm tạo hấp thụ dải rộng hoặc điều khiển đặc tính hấp thụ bằng từ trường ngoài vẫn là hướng mới, không trùng lặp với các nghiên cứu trước đây và có tiềm năng phát triển các hệ hấp thụ sóng điện từ hiệu quả, linh hoạt 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 vật liệu tổ hợp.

2. Mục tiêu nghiên cứu

- Thiết kế và chế tạo vật liệu tổ hợp 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 vật liệu tổ hợp 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

Luận án kết hợp các phương pháp nghiên cứu như tính toán, mô phỏng, chế tạo và đo đạc thực nghiệm. Các vật liệu từ sau khi chế tạo sẽ được đo đạc thông số điện từ và tích hợp vào phần mềm CST để mô phỏng. Các mẫu MA được chế tạo bằng phương pháp quang khắc, vật liệu từ được tích hợp vào cấu trúc MA thông qua các chất kết dính parrafin và epoxy.

Phạm vi nghiên cứu tập trung vào vật liệu tổ hợp CM-MA hấp thụ sóng điện từ.

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

Luận án có ý nghĩa khoa học trong 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 biên độ và tần số hấp thụ sóng điện từ thông qua từ trường ngoài.

5. Những đóng góp mới

Luận án đã đề xuất và chế tạo thành công các cấu trúc CM-MA giúp 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 hóa. Cũng như đã điều khiển biên độ không thay đổi tần số cộng hưởng và tần số hấp thụ đa đỉnh của vật liệu biến hóa sử dụng vật liệu từ nền MFe_2O_4 bằng từ trường ngoài. Kết quả cho thấy tiềm năng ứng dụng của CM-MA trong che chắn sóng điện từ, bộ thu giữ năng lượng, cảm biến... phục vụ mục đích quân sự - quốc phòng và dân sinh.

Bố cục của luận án

Luận án gồm có 135 trang, bao gồm phần mở đầu, 4 chương nội dung và các kết luận.

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

1.1. Cơ chế hấp thụ sóng điện từ của vật liệu

1.1.1. Cơ chế tổn hao từ

Tổn hao từ gồm các nhóm cơ chế chính: cộng hưởng sắt từ, cộng hưởng vách domain, tổn hao do dòng xoáy, và tổn hao từ trễ 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.[52, 53].

1.1.2. Cơ chế tổn hao điện môi

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. 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 [58, 59].

1.2. Các hệ vật liệu từ hấp thụ sóng điện từ

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, độ từ hóa bão hòa M_s từ trung bình đến cao, tổn hao từ trễ thấp, dễ đảo từ dưới từ trường ngoài yếu. Nhờ điện trở suất cao và độ tổn hao dòng xoáy nhỏ, ferrite từ mềm thích hợp cho ứng dụng ở vùng tần số GHz, nơi các vật liệu kim loại từ (Fe, Co, Ni) thường chịu tổn hao dòng xoáy quá lớn. Trong các ferrite spinel, hệ Ni - Zn ($Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$) là một trong những họ vật liệu được nghiên cứu nhiều nhất cho mục đích hấp thụ vi sóng nhờ: M_s và μ' tương đối cao, tần số cộng hưởng nằm trong vùng GHz, điện trở suất cao, tính chất điều chỉnh linh hoạt bằng cách thay đổi tỷ lệ Ni/Zn và chất pha trộn [97]. Cũng trong hệ vật liệu từ mềm hấp thụ sóng điện từ vùng GHz, hợp kim FeCo nhờ độ từ hóa bão hòa cao và 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 suy hao điện môi và độ dẫn cao gây phản xạ mạnh; dễ oxy hóa; mật độ lớn 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) [100].

1.2.2. Vật liệu từ cứng hấp thụ sóng điện từ

Vật liệu từ cứng có lực kháng từ lớn (H_c cao), đường trễ rộng, thích hợp cho các ứng dụng nam châm vĩnh cửu. Trong bối cảnh hấp thụ sóng điện từ, ưu điểm của vật liệu từ cứng là tần số cộng hưởng từ tự nhiên có thể mở rộng lên vùng tần số rất cao (tới hàng chục - hàng trăm GHz) nhờ trường dị hướng lớn [104]. Các hệ hexaferrite M-type như $BaFe_{12}O_{19}$,

$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, La - Sr - M... là đại diện điển hình của vật liệu từ cứng trên nền oxide; chúng có Ms 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].

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 [108]. 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 băng thông hấp thụ rộng hơn và RL_{\min} đạt giá trị nhỏ hơn [109, 110].

1.3. Vật liệu biến hoá hấp thụ sóng điện từ

1.3.1. Hiện tượng phối hợp trở kháng

Về bản chất vật lý, hiệu suất hấp thụ của MA bắt nguồn từ sự tương tác giữa hiện tượng cộng hưởng điện từ mạnh mẽ và sự tối ưu hóa trở kháng trong các cấu trúc nhân tạo. Nhờ thiết kế các phần tử kim loại sắp xếp tuần hoàn, 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. Cơ chế hấp thụ cực đại thường được thực hiện bằng cách lựa chọn hình học và vật liệu để thành phần phản kháng tổng (phần ảo) của Z_{in} 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 (điện môi, từ, và ohmic) [108].

1.3.2 Hiện tượng giao thoa triệt tiêu

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. 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 [116].

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

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. 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 [119, 120].

Cộng hưởng từ xảy ra khi thành phần từ trường H kích thích phần 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 [122].

Khác với MA dựa trên kim loại, MA điện môi khai thác dòng dịch chuyển trong các phần tử cộng hưởng điện môi có chiết suất cao (Si, TiO_2 , gốm điện môi, ferroelectric/ceramic...). Khi kích thước phần 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 (ED) và lưỡng cực từ (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 từ thẩm âm và độ điện thẩm âm, hình thành các đỉnh hấp thụ [123].

Bằng cách sử dụng các cấu trúc đa dạng, một số nghiên cứu đã quan sát thấy hiện tượng hấp thụ đa băng tần dựa trên cộng hưởng bậc cao [124].

1.3.4. Cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ

MA được nhắc đến rộng rãi bắt nguồn từ công trình đề xuất của Landy và cộng sự (2008) [19]. 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 băng thông rộng, vì đây là yêu cầu then chốt trong nhiều ứng dụng thực tế. Tùy theo khả năng hấp thụ, MA có thể được chia thành ba nhóm chính: đơn đỉnh, đa đỉnh và hấp thụ dải rộng [129-132].

1.4. Vật liệu tổ hợp (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. Các nghiên cứu nhằm mở rộng băng thông 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 [134-136].

Các nghiên cứu áp dụng từ trường ngoài lên CM-MA để điều khiển tần số cộng hưởng 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. Tiếp đó, năm 2009, Zhao và cộng sự [141] đã kết hợp các thanh ferrite YIG với dây kim loại, hiện thực hóa khả năng điều khiển từ trường dải rộng, động, liên tục và thuận nghịch Huang và cộng sự (2014) đã tổng hợp và thực nghiệm một cấu trúc hấp thụ biến hóa điều khiển bằng từ tính, làm lớp vật liệu ferrite trên cơ sở magie (TT1-390) và vật liệu biến hóa kim loại trên bề mặt, hoạt động trong băng X [32]. Khi tăng H_0 , đỉnh hấp thụ tại tần số gần 10 GHz dịch tần rõ rệt, đồng thời đạt A xấp xỉ 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 0,2 - 7,6 GHz, sử dụng tám ferrite YIG làm lớp nền [27]. 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 [142].

1.5 Một số ứng dụng tiêu biểu của vật liệu tổ hợp (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 băng thông hấp thụ điện từ rộng hơn. Trong lĩnh vực điện từ, CM-MA được sử dụng để giảm sự hiện diện của nhiễu sóng điện từ (EMI) [147-149]. Ngoài ra, CM-MA còn được sử dụng trong cảm biến kiểm tra khuyết tật [150].

1.4. Kết luận chương 1

Luận án trình bày tình hình nghiên cứu về CM-MA. 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. Luận án cũng đã tổng hợp các cấu trúc CM-MA và tình hình nghiên cứu về điều khiển tính chất hấp thụ của cấu trúc CM-MA, đồng thời đề cập đến một số ứng dụng tiêu biểu của CM-MA trong Chương này.

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

2.1.1. Phương pháp mô phỏng

Các phần mềm chuyên dụng như CST Microwave Studio, HFSS và Comsol thường được dùng để thiết kế và mô phỏng MM. Chúng cho phép mô phỏng vật liệu trong không gian 2D hoặc 3D. Các đặc tính điện từ của MM có thể được xác định bằng cách mô phỏng cấu trúc một ô cơ sở, thiết lập đầy đủ các tham số, loại vật liệu và các điều kiện biên phù hợp.

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 không gian tự do/môi trường không khí để triệt phản xạ và tồn tại tổn hao điện môi hoặc từ để tiêu tán năng lượng. 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.

2.2. Một số phương pháp chế tạo và đo đạc đặc trưng điện từ

2.2.1 Phương pháp nghiên cứu cơ năng lượng cao

Các vật liệu từ sử dụng trong nghiên cứu của luận án được chế tạo bằng phương pháp nghiên cứu cơ năng lượng cao. Nghiên cứu cơ năng lượng cao 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...), nghiên cứu 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.

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 trên hệ phân tích mạng Keysight PNA-X N5242A. Các thông số S_{11} và S_{21} đo được sẽ sử dụng thuật toán Nicolson-Ross-Wei [155] để tính hằng số điện môi (ϵ_r) và độ từ thẩm (μ_r).

2.2.3 Phương pháp đo từ kế mẫu rung

Trong luận án, các thông số từ tính (đường cong từ trễ $M(H)$, độ từ hóa bão hòa, lực kháng từ) của mẫu được xác định bằng hệ từ kế mẫu rung để xác định khả năng đáp ứng từ của vật liệu.

2.2.4 Phương pháp hiển vi điện tử quét

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 .

2.2.5 Phương pháp nhiễu xạ tia X

Luận án sử dụng phương pháp nhiễu xạ tia X để xác định độ đơn pha của vật liệu.

2.3. Phương pháp chế tạo vật liệu biến hóa và vật liệu tổ hợp 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 [120, 159].

2.3.2 Phương pháp tích hợp vật liệu từ lên vật liệu biến hóa

Các tấm vật liệu từ chế tạo ở dạng bột trộn với vật liệu kết dính thành tấm mỏng làm lớp phủ. 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.

2.4 Phương pháp đo đặc đặc trưng điện từ của CM-MA

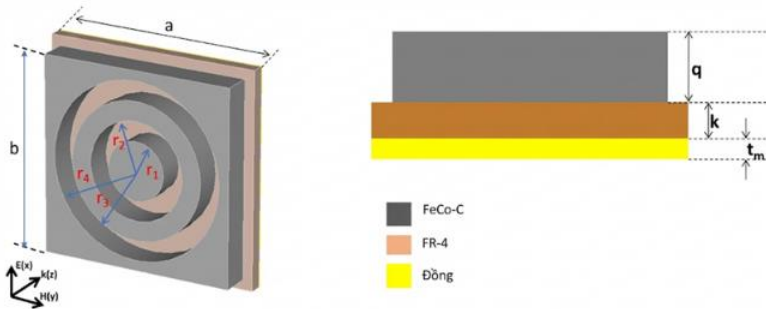
Hệ phân tích mạng VNA-Vector Network Analyzer tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam được trang bị giúp đo độ phản xạ của CM-MA. Hệ đo sử dụng hai ăng-ten với vai trò là nguồn phát và nguồn thu. Tùy thuộc và phép đo, vị trí của các ăng-ten được thiết lập khác nhau. Kết quả đo đưa ra các tham số tán xạ dạng phức S-parameter. Tham số tán xạ S-parameter cho biết thông tin về tính chất phản xạ và truyền qua của CM-MA. Độ hấp thụ được tính toán thông qua các tham số tán xạ.

2.5. Kết luận chương 2

L luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu cơ năng lượng cao kết hợp nung thiêu kết để chế tạo vật liệu từ. Các tham số điện từ thực nghiệm (độ thấm và hằng số điện môi) của vật liệu từ sau khi được đo đạc và tính toán sẽ được tích hợp vào phần mềm mô phỏng CST Microwave Studio để làm cơ sở dữ liệu đầu vào. Cấu trúc CM-MA được thiết kế và tối ưu. Từ các kết quả mô phỏng, MA được chế tạo bằng phương pháp quang khắc, vật liệu từ được tích hợp lên MA tạo cấu trúc CM-MA thông qua chất kết dính paraffin hoặc epoxy. Sau khi chế tạo CM-MA, các tính chất điện từ của mẫu được đo trên hệ thiết bị phân tích mạng VNA.

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

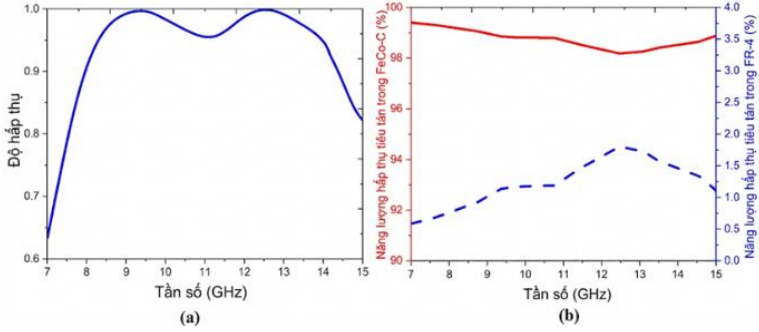
3.1. Vật liệu biến hóa sử dụng vật liệu từ như cấu trúc cộng hưởng



Hình 3.5 Cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu từ như cấu trúc cộng hưởng.

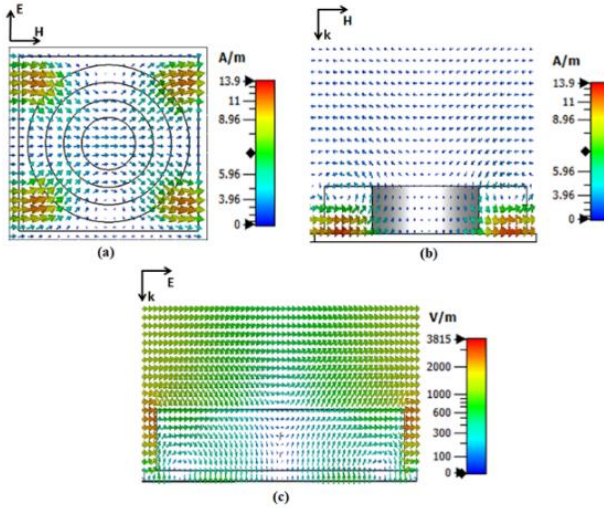
Cấu trúc gồm 3 lớp: tấm phẳng từ vật liệu FeCo-C với hai vòng tròn đục lỗ đồng tâm ở lớp trên cùng, lớp giữa là lớp điện môi từ vật liệu FR-4 có độ điện thẩm là 3,4 và độ tổn hao là 0,025, lớp dưới cùng (lớp phản xạ) là tấm đồng liên tục với độ điện dẫn là $\sigma = 5,8 \times 10^7$ S/m [162].

Cấu trúc được đề xuất có khả năng hấp thụ băng thông 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 1 ở lần lượt là 9,4 và 12,5 GHz [Hình 3.6 (a)].



Hình 3.6 (a) Phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA và (b) mức năng lượng bị tiêu tán trong lớp FeCo-C và FR-4.

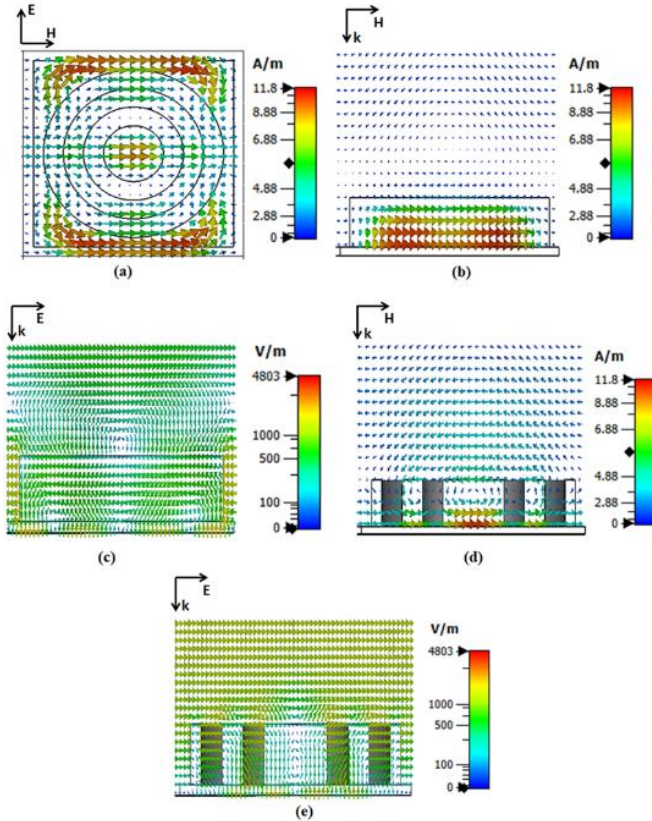
Trong cấu trúc CM-MA, hơn 98% năng lượng bị mất xảy ra trong lớp FeCo-C, trong khi tổn thất trong lớp FR-4 chỉ giới hạn ở mức 2%. Kết quả tiêu tán năng lượng chứng minh rằng lớp FeCo-C trong CM-MA là yếu tố chính góp phần vào khả năng hấp thụ băng thông rộng.



Hình 3.7 Phân bố từ trường và điện trường của cấu trúc 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 9,4 GHz.

Phân bố từ trường và điện trường tại các đỉnh hấp thụ được nghiên cứu để làm rõ cơ chế hấp thụ. 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 9,4 GHz là do cộng hưởng Mie

lưỡng cực từ, gây ra bởi cộng hưởng điện môi [164, 165]. Cũng tương tự, tại tần số 12,5 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). Trong đó, 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.

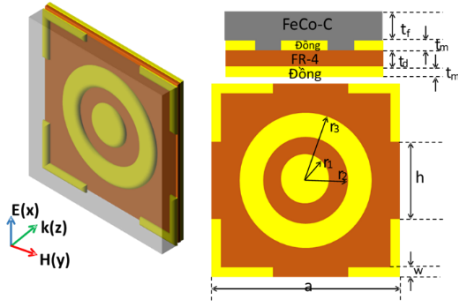


Hình 3.8 Phân bố từ trường và điện trường của cấu trúc CM-MA: (a) Từ trường trong mặt phẳng (E, H), (b) và (d) từ trường trong mặt phẳng (H, k), (c) và (e) điện trường trong mặt phẳng (E, k) tại tần số 12,5 GHz.

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

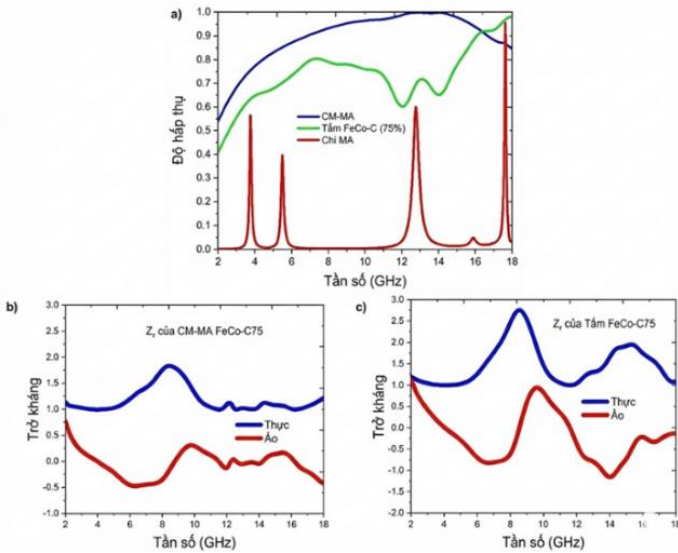
Cấu trúc CM-MA được sử dụng trong mô phỏng của luận án có kích thước ô cơ sở là $20 \times 20 \text{ mm}^2$ (Hình 3.17) và bao gồm bốn lớp, với lớp trên

cùng là tấm vật liệu từ, lớp MA ở giữa là đồng bao gồm hai vòng đục lỗ có bốn cạnh hình chữ L và lớp dưới cùng là tấm đồng liên tục.

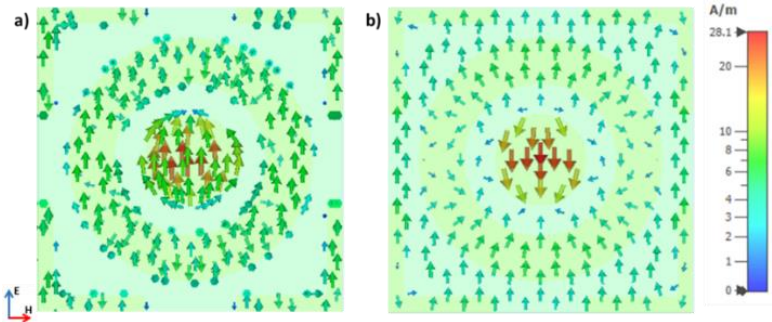


Hình 3.17 Sơ đồ cấu trúc vật liệu CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C với các thông số hình học

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. Cấu trúc CM-MA được đề xuất thể hiện bằng thông hấp thụ rộng hơn đáng kể đạt 9,9 GHz (dao động từ 6,9 đến 16,8 GHz).

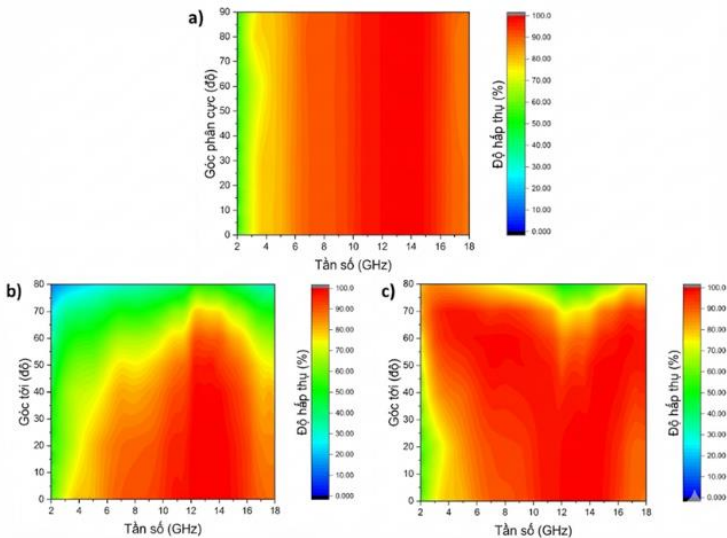


Hình 3.22 (a) Phổ hấp thụ so sánh giữa vật liệu FeCo-C thông thường, cấu trúc MA và cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (75%), (b-c) phần thực và phần ảo của phối hợp trở kháng Z_r của cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C (75%) và vật liệu FeCo-C75 thông thường tương ứng.



Hình 3.24 Phân bố dòng điện bề mặt tại (a) lớp kim loại phía trên và (b) lớp kim loại phía dưới tại tần số 13,50 GHz.

Dòng điện bề mặt phân bố tập trung tại vòng tròn trung tâm, một phần ở vòng tròn ngoài và ở các đường hình chữ L tại các góc của cấu trúc. Tại đây, dòng điện bề mặt tại lớp kim loại song song và ngược hướng với dòng điện tại lớp dưới cùng, tạo thành cộng hưởng từ.

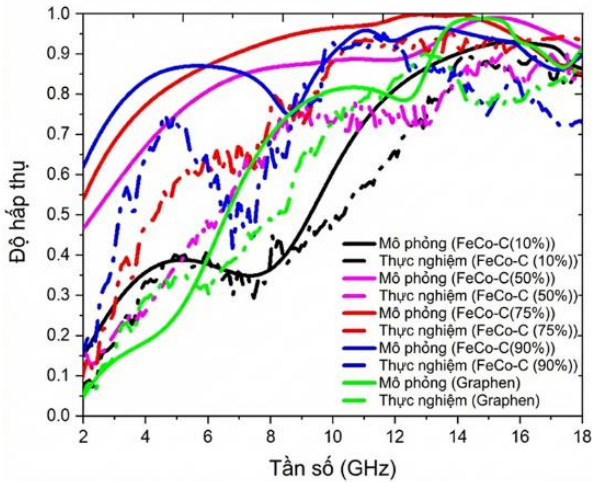


Hình 3.27 Phổ hấp thụ của cấu trúc (a) dưới các góc phân cực khác nhau và các góc tới khác nhau của chế độ phân cực (b) TE và (c) TM

Nghiên cứu về tính ổn định của cấu trúc khi thay đổi góc tới và góc phân cực cho thấy cấu trúc hầu như không bị ảnh hưởng bởi góc phân cực [Hình 3.24 (a)]. Cấu trúc CM-MA vẫn cho thấy khả năng hấp thụ tốt cả

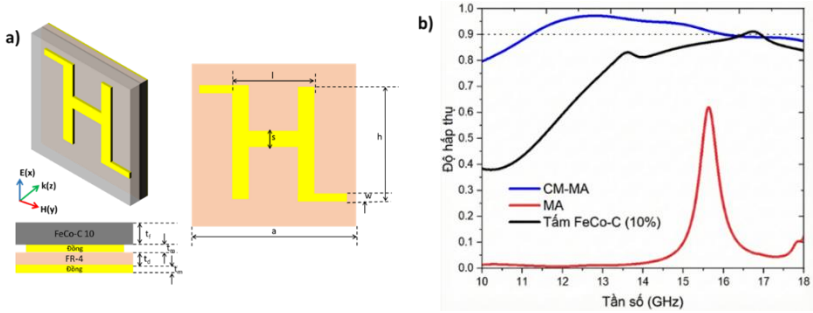
trong phân cực TE và phân cực TM ngay cả khi góc tới lớn. Cụ thể, ở phân cực TM, độ hấp thụ giảm khi góc tới tăng từ 0 đến 70° nhưng vẫn cao hơn 90% trong dải tần từ 6,9 đến 12 GHz [Hình 3.24(c)], FBW của CM-MA là 59,46%. Ở chế độ TE, độ hấp thụ được duy trì ở mức trên 90% trong vùng tần số từ 11,5 đến 16,3 GHz đối với góc tới lên đến 40° [Hình 3.24(b)], FBW của CM-MA giảm xuống còn 34,53%.

Năm mẫu CM-MA đã được chế tạo với các tỷ lệ carbon - FeCo khác nhau: 10%, 50%, 75%, 90% và graphene nguyên chất. Kết quả thực nghiệm trình bày trong (Hình 3.26). Có thể quan sát 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. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm nhìn chung là nhất quán.



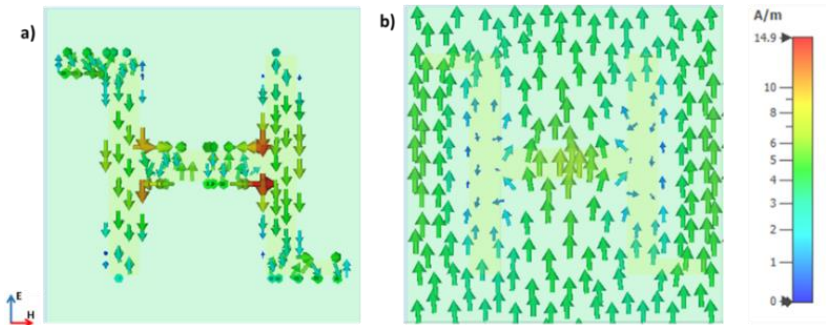
Hình 3.29 So sánh phổ hấp thụ (mô phỏng và thực nghiệm) của các cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu FeCo-C với các tỷ lệ carbon khác nhau: 10%, 50%, 75 %, 90 % và graphene nguyên chất

Luận án cũng đã tiến hành mô phỏng tích hợp vật liệu FeCo-C(10%) vào cấu trúc CM-MA có hình dạng cấu trúc cộng hưởng chữ H nhằm tăng cường và mở rộng vùng tần số hấp thụ của vật liệu FeCo-C(10%).



Hình 3.31. 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

Vật liệu FeCo-C vào cấu trúc MA giúp mở rộng đáng kể cả dải tần hấp thụ và độ hấp thụ so với vật liệu FeCo-C thông thường có độ dày tương đương và cấu trúc MA. 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 3.34. 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

Có thể thấy rằng, tại tần số 12,8 GHz, dòng điện bề mặt phân bố mật 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.

3.3. Kết luận chương 3

- 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

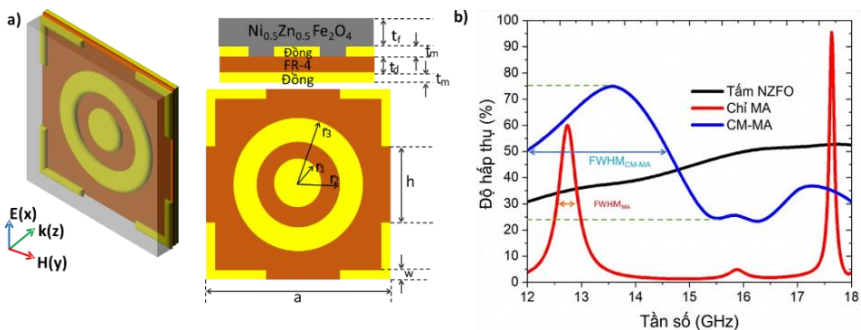
dải rộng với độ hấp thụ trên 90% trong vùng tần số từ 7,9 - 14,4 GHz. Độ hấp thụ được duy trì tốt ở chế độ phân cực TE và TM khi thay đổi góc tới từ 0-55°.

- 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

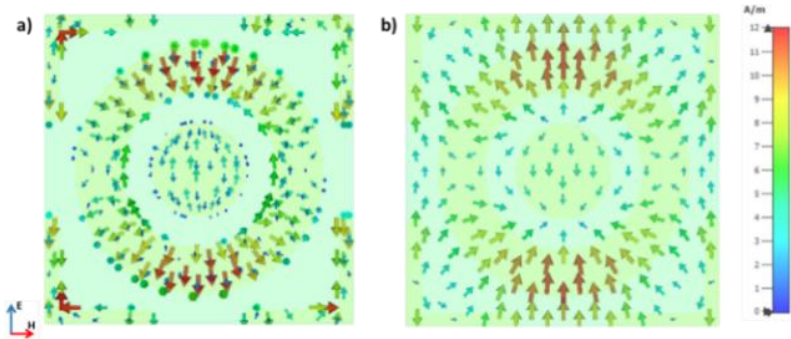
4.1. Điều khiển cường độ hấp thụ của vật liệu tổ hợp



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

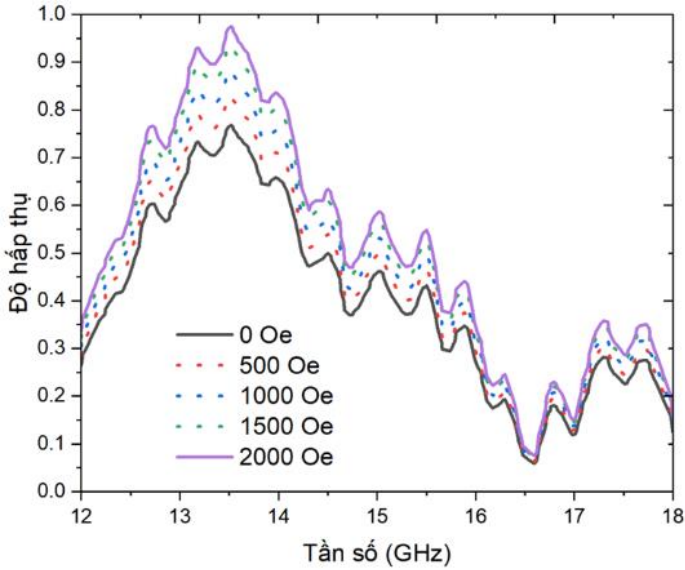
Kết quả cho thấy, tích hợp vật liệu NZFO vào cấu trúc MA giúp tăng cường cường độ và mở rộng phổ hấp thụ so với MA và vật liệu NZFO thông thường. Đối với NZFO thông thường cùng độ dày với CM-MA, độ dải hấp thụ chỉ đạt khoảng từ 30% đến 51% trong vùng tần số khảo sát. Đối với MA không có NZFO, chỉ có 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 13,6 GHz có độ hấp thụ 75%, FWHM tăng lên khoảng 4,6 GHz.

Để làm rõ cơ chế hấp thụ, luận án đã tiến hành khảo sát phân bố dòng điện bề mặt tại đỉnh hấp thụ 13,59 GHz. Kết quả cho thấy 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 song song và ngược chiều với lớp phản xạ, tạo ra cộng hưởng từ, dẫn đến hấp thụ mạnh sóng tới, hình thành đỉnh hấp thụ.



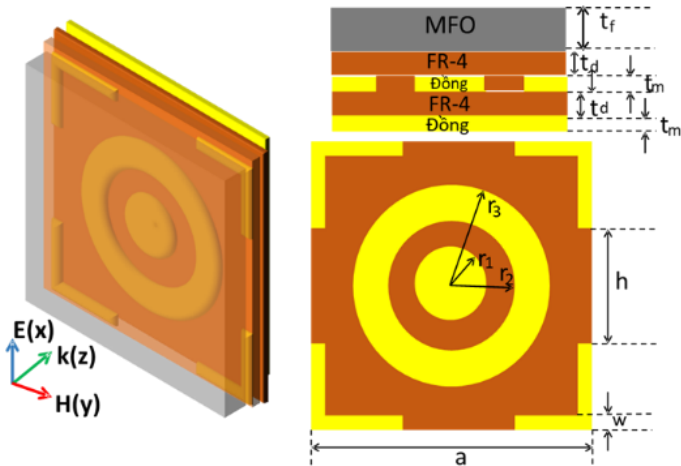
Hình 4.4 Phân bố dòng điện bề mặt (a) mặt trên cấu trúc tuần hoàn (b) Mặt sau tấm phản xạ tại tần số 13,59 GHz của CM-MA sử dụng NZFO

Biên độ hấp thụ của cấu trúc CM-MA được tăng cường từ 75% lên 97% khi cường độ từ trường ngoài áp dụng lên cấu trúc được thay đổi từ 0 đến 2000 Oe.



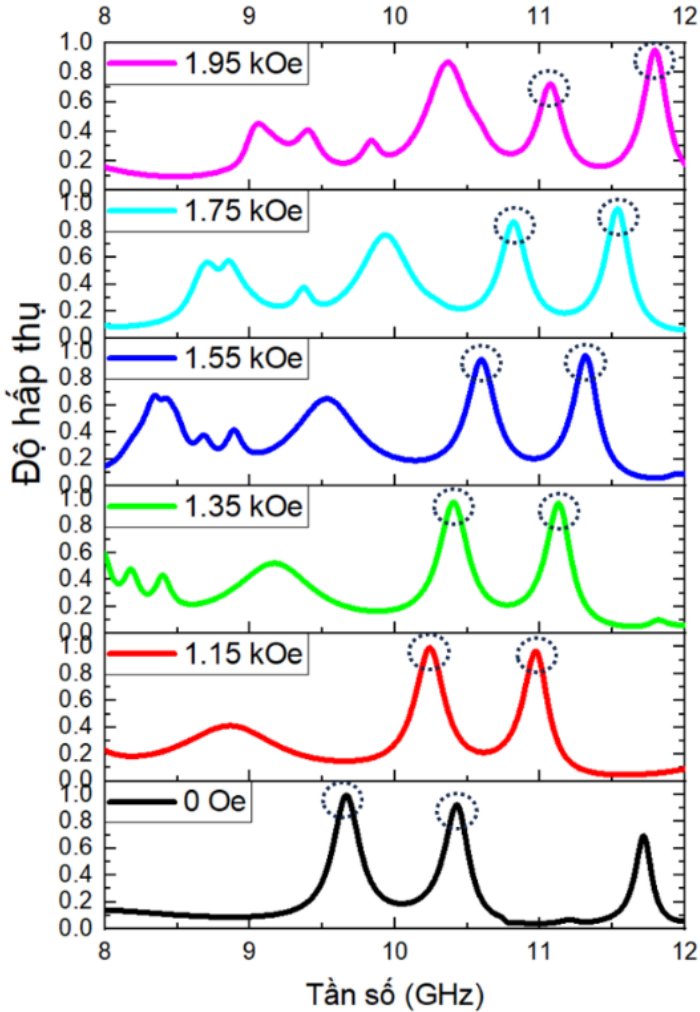
Hình 4.11 Phổ hấp thụ của cấu trúc CM-MA khi thay đổi giá trị từ trường từ 0 đến 2000 Oe

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



Hình 4.16. Sơ đồ cấu trúc CM-MA sử dụng vật liệu MFO

CM-MA có kích thước ô cơ sở là $20 \times 20 \text{ mm}^2$ (Hình 4.16) và bao gồm năm lớp, với lớp trên cùng là tấm vật liệu MgFe_2O_4 do HuangYoung Jun và cộng sự (2014) nghiên cứu tại công bố [32].



Hình 4.18. 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

Kết quả cho thấy, cấu trúc CM-MA có hai đỉnh hấp thụ tần số có khả năng dịch chuyển vùng tần số 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 10,42 GHz đến 11,78 GHz) đối với đỉnh thứ hai khi từ trường ngoài áp dụng vào mẫu thay đổi từ 0 đến 1,95 kOe.

4.3. Kết luận chương 4

- 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. 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 1,42 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.

KẾT LUẬN CHUNG

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.

- 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 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 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

1. Sử dụng kỹ thuật học máy, AI tối ưu cấu trúc CM-MA.

2. Ứng dụng kỹ thuật mới, tích hợp các vật liệu tiên tiến trong chế tạo CM-MA. Phát triển các hệ vật liệu từ mới có độ hấp thụ cao, phổ hấp thụ rộng, có khả năng điều khiển tần số hấp thụ với vùng dịch chuyển rộng.

3. Nghiên cứu, ứng dụng các cấu trúc CM-MA cho che chắn nhiễu sóng điện từ và cảm biến kiểm tra khuyết tật...

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

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.

3. Chấp nhận đăng: **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, 2026.

4. Sáng chế được chấp nhận đơn hợp lệ: Đỗ Khánh Tùng, Bùi Xuân Khuyển, Bùi Sơn Tùng, Nguyễn Thanh Hương, Vũ Đình Lâm, **Tăng Xuân Duong**, "Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ dải rộng trên cơ sở FeCo-C", Số đơn: 1-2023-08775, Quyết định số 123851/QĐ-SSTT-IP ngày 26/12/2023 của Cục Sở hữu Trí tuệ.

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).