

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

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

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Ngô Như Việt

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

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Vật liệu điện tử

Mã số: 9 44 01 23

Hà Nội - 2025

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

Phản biện 1: PGS.TS. Trịnh Xuân Hoàng

Phản biện 2: PGS. TS. Nguyễn Thanh Bình

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi 9 giờ 00, ngày 28 tháng 11 năm 2025.

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

MA là loại vật liệu nhân tạo được thiết kế đặc biệt nhằm hấp thụ hiệu quả sóng điện từ trong một dải tần số xác định [10–12]. Khái niệm về MA được giới thiệu lần đầu trong nghiên cứu của Landy và cộng sự [13], mở ra một hướng nghiên cứu mới trong lĩnh vực vật liệu biến hóa. Kể từ đó, nhiều công trình khoa học trên thế giới đã tập trung phát triển và mở rộng ứng dụng của MA trong các vùng tần số khác nhau, bao gồm cả vùng THz [14] và GHz [15]. Mặc dù các MA đơn lớp được thiết kế để đạt hiệu suất hấp thụ cao trong một dải tần số xác định, chúng thường chỉ thể hiện một đỉnh hấp thụ chính và bị hạn chế trong việc điều chỉnh các đặc tính như vị trí, số lượng và cường độ của các đỉnh hấp thụ. Bên cạnh đó, tính chất hấp thụ của MA còn bị ảnh hưởng đáng kể bởi góc tới và phân cực của sóng điện từ [17]. Để khắc phục những hạn chế này, vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ có cấu trúc đa lớp (MMA) đã được đề xuất. Cấu trúc đa lớp cho phép tối ưu hóa và mở rộng đặc tính hấp thụ của vật liệu thông qua việc điều chỉnh độ dày, thứ tự sắp xếp và hình dạng thiết kế của từng lớp. Nhờ đó, hiệu suất hấp thụ có thể được cải thiện đáng kể, đồng thời mở rộng vùng hấp thụ sang dải tần rộng hơn so với các cấu trúc MA đơn lớp [18–19].

Có thể thấy, việc nghiên cứu các MMA có thể giúp đạt được các tính chất như hấp thụ băng thông rộng, hấp thụ đa đỉnh, từ đó mở ra nhiều cơ hội ứng dụng loại vật liệu này trong thu năng lượng, che chắn sóng điện từ, cảm biến... Do đó, nghiên cứu sinh đã lựa chọn đề tài: “Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ dựa trên tương tác cộng hưởng trong cấu trúc vật liệu biến hóa đa lớp”. Ở trong nước, đề tài luận án cho thấy các điểm khác, các điểm mới so với các nghiên cứu về MA trước đây [17], [22–25],. Những nghiên cứu này gồm nhiều đối tượng MA khác nhau, tuy nhiên chúng chủ yếu đề cập đến MA có cấu trúc đơn lớp. Trong khi đó, đề tài luận án tập trung nghiên

cứu vào MMA để làm rõ về cơ chế hấp thụ, sự tương tác giữa các lớp cũng như tính chất của nó.

2. Mục tiêu nghiên cứu

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

3. Nội dung nghiên cứu

Luận án đã thiết kế, mô phỏng trên phần mềm CST và chế tạo bằng quang khắc các cấu trúc MMA. Phương pháp kết hợp tính toán, mô phỏng và thực nghiệm để đánh giá tính chất điện từ (hấp thụ, phản xạ, truyền qua). Phạm vi nghiên cứu tập trung vào sự tương tác giữa các lớp trong MMA ở vùng tần số GHz và THz.

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

Luận án có ý nghĩa khoa học trong xây dựng mô hình và làm rõ cơ chế hoạt động, sự tương tác giữa các lớp trong cấu trúc MMA. Ý nghĩa thực tiễn là cung cấp các kết quả đóng góp vào việc ứng dụng MMA trong thu giữ năng lượng, cảm biến và che chắn sóng điện từ.

5. Những đóng góp mới

Luận án đã đề xuất và chế tạo thành công các cấu trúc MMA dựa trên nguyên lý cộng hưởng điện-từ. Nghiên cứu đã làm rõ sự tương tác giữa các lớp thông qua việc khảo sát phổ hấp thụ, phân bố trường (dòng điện, từ trường, điện trường). Kết quả cho thấy tiềm năng ứng dụng của MMA trong hấp thụ băng rộng, điều chỉnh phân cực, và tích hợp cảm biến quang điện từ. Ngoài ra, luận án còn nghiên cứu các cấu trúc MMA đa chức năng, có khả năng chuyển đổi giữa hiệu ứng truyền qua trong suốt cảm ứng điện từ (EIT) và hấp thụ cảm ứng điện từ (EIA).

Bố cục của luận án

Luận án gồm có 145 trang, bao gồm phần mở đầu, 5 chương nội dung và các kết luận

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

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

1.1.1. Giới thiệu chung về vật liệu biến hoá

MM là cấu trúc được chế tạo nhân tạo, được thiết kế để đạt được các đặc tính điện từ có lợi và khác thường. Khác với vật liệu truyền thống, đặc tính của MM không phụ thuộc nhiều vào thành phần hóa học mà chủ yếu đến từ cấu trúc hình học của các ô cơ sở có kích thước nhỏ hơn bước sóng của sóng tương tác. Với việc thiết kế cấu trúc tuần hoàn theo những hình dạng và tỷ lệ nhất định, người ta có thể điều chỉnh các thông số hiệu dụng như độ thẩm điện (ϵ), độ thẩm từ (μ), và chỉ số khúc xạ (n). Nhờ những đặc tính nổi bật đó, hiện nay, MM đang được sử dụng trong nhiều lĩnh vực như siêu thấu kính [7],[29],[30], áo choàng tàng hình [8],[31],[32], và vật liệu hấp thụ tuyệt đối (MPA) [9],[33],[34], cảm biến [35],[36],[37]...

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

MA là một dạng MM được thiết kế đặc biệt nhằm đạt khả năng hấp thụ năng lượng điện từ hiệu quả trong một hoặc nhiều dải tần số xác định. Khả năng hấp thụ của MA chủ yếu bắt nguồn từ cấu trúc vi mô được sắp đặt nhân tạo, thay vì thành phần hóa học.

MA có thể được phân loại theo nhiều căn cứ khác nhau. Trong đó, nó có thể được chia thành MA băng tần rộng và MA băng tần hẹp phụ thuộc vào băng thông hấp thụ [38],[39]. Ngoài ra, MA còn có thể được phân loại

dựa trên tần số hoạt động bao gồm: MA hoạt động trong vùng vi sóng, vùng THz và vùng quang học.

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

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

Cộng hưởng điện xuất phát từ việc các phần tử dẫn điện tương tác mạnh với thành phần điện trường trong sóng điện từ tới. Khi thiết kế cấu trúc với kích thước nhỏ hơn bước sóng tác động, dòng điện cưỡng bức được tạo ra dao động mạnh tại tần số cộng hưởng nhất định, dẫn tới việc hằng số điện môi hiệu dụng có thể âm ở một số dải tần số nhất định [42],[43]. Nhờ điều này, vật liệu có thể hấp thụ, ngăn chặn hoặc dẫn truyền sóng điện từ một cách tùy chỉnh.

Cộng hưởng từ hình thành nhờ sự xuất hiện của dòng điện cảm ứng quay trong các phần tử hình vòng, đặc biệt là các cấu trúc như SRR, mạch vòng kín hoặc bán kín, khi tương tác với thành phần từ trường của sóng điện từ. Tại tần số cộng hưởng, các dòng xoáy này được khuếch đại mạnh, tạo ra từ trường cảm ứng thứ cấp ngược chiều hoặc cùng chiều với từ trường ngoài, dẫn đến hiện tượng từ thẩm μ âm – một tính chất chưa từng xuất hiện ở vật liệu tự nhiên [45],[46].

1.2.2. Lý thuyết phối hợp trở kháng

Sự phối hợp trở kháng nhằm điều chỉnh các đặc tính điện từ của MA sao cho trở kháng của nó gần bằng với trở kháng của môi trường xung quanh, qua đó giảm thiểu hiện tượng phản xạ trên bề mặt và tăng cường khả năng truyền năng lượng vào lớp hấp thụ. Khi sóng điện từ đi vào vật liệu, năng lượng của nó tiếp tục bị tiêu hao thông qua các cơ chế tổn hao nội tại, được quyết định bởi thiết kế hình học và các thông số điện từ của từng thành phần cấu trúc.

1.2.3. Tiêu tán năng lượng trong vật liệu biến hoá

Tổn hao điện môi xảy ra trong vật liệu nền không dẫn điện, nơi năng lượng bị tiêu tán khi các lưỡng cực phân cực dao động hoặc sắp xếp lại dưới tác động của trường điện ngoài. Khi sóng điện từ tương tác với vật liệu, các lưỡng cực này dao động và mất năng lượng qua ma sát nội phân tử, sinh ra nhiệt [53].

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

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

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

MMA là các MA được thiết kế gồm hai hay nhiều lớp vật liệu mỏng xếp chồng lên nhau, mỗi lớp có thể có thành phần, hình dạng hoặc cấu trúc vi mô khác nhau. Các lớp này có thể làm từ kim loại - điện môi hoặc vật liệu tổng hợp và được sắp xếp theo một cách tuần hoàn để tối ưu hóa tương tác với sóng điện từ. Khi các lớp này được xếp chồng lên nhau, chúng tạo ra sự cộng hưởng đa tầng với nhiều điểm cộng hưởng khác nhau tương ứng với các tần số hấp thụ đa băng tần hoặc dải rộng [58], [77-78].

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

MMA còn được sử dụng để thu được hiệu ứng tăng cường độ hấp thụ ở một số tần số khác nhau [61]. Hiệu ứng tăng cường khả năng hấp thụ của MMA có thể thu được nhờ sự chuyển đổi giữa hiệu ứng EIT (truyền qua cảm ứng điện từ) và EIA (hấp thụ cảm ứng điện từ) [61], [84].

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

MA có thể được thiết kế với cấu trúc nhiều lớp gồm các vật liệu khác nhau nhằm tạo thành vật liệu hấp thụ hiệu quả và tăng cường khả năng hấp thụ của chúng [88], [89], hoặc để cung cấp khả năng che chắn hiệu quả đối với bức xạ điện từ [90]. Các MMA có thể được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như thu năng lượng [91] và cảm biến [92].

1.4. Kết luận chương 1

Luận án trình bày các nội dung cơ bản về MA. Tiếp đó, các cơ chế hoạt động của MA như cộng hưởng điện, cộng hưởng từ, lý thuyết phối hợp trở kháng và cơ chế tiêu tán năng lượng được phân tích và đánh giá chi tiết. Bên cạnh đó, luận án cũng giới thiệu một số cấu trúc MMA với các cơ chế hoạt động khác nhau, đồng thời đề cập đến một số ứng dụng tiêu biểu của MMA 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. Mô hình tính toán mạch LC tương đương

Các tính chất điện từ của MA có thể được dự đoán và giải thích dựa trên mô hình mạch điện tương đương LC. Mô hình mạch điện LC phụ thuộc vào dạng cấu trúc của MA, trong đó các lớp kim loại được thay thế bằng các cuộn cảm có độ tự cảm hiệu dụng L và tụ điện với điện dung hiệu dụng C . Các giá

trị L và C được tính toán dựa trên thông số hình học của cấu trúc và phân bố năng lượng điện từ. Mỗi lớp kim loại - điện môi, ứng với 1 mạch LC, cấu trúc MMA tương ứng các mạch LC nối tiếp [87], [93-95].

2.1.3. Dao động từ tương tác

Truyền qua cảm ứng điện từ (EIT) được hiểu là hiện tượng giao thoa lượng tử giữa các nguồn kích thích khác nhau. Ban đầu, một nguồn kích thích thứ nhất được tác động vào môi trường; khi đó, môi trường hấp thụ sóng từ nguồn đó vì nó được xem là không trong suốt đối với nguồn kích thích này. Khi nguồn kích thích thứ hai được tác động đồng thời, môi trường cũng có thể hấp thụ sóng từ nguồn này. Khi đó, hiệu ứng giao thoa xảy ra, làm biến đổi tính chất hấp thụ thành tính chất truyền qua, khiến môi trường trở nên trong suốt đối với nguồn kích thích ban đầu [97–99].

2.2. Phương pháp chế tạo

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

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

Hệ phân tích mạng VNA-Vector Network Analyzer tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam được trang bị giúp đo độ phản xạ, truyền qua của MA và MMA. Hệ đo sử dụng hai ăng-ten với vai trò là nguồn phát và nguồn thu. Tùy thuộc và phép đo, vị trí của các ăng-ten được thiết lập khác nhau. Kết quả đo đưa ra các tham số tán xạ

dạng phức S-parameter. Tham số tán xạ S-parameter cho biết thông tin về tính chất phản xạ và truyền qua của MA và MMA.

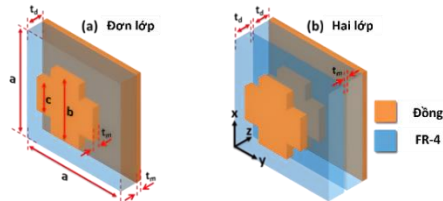
2.4. Kết luận chương 2

Luận án sử dụng phần mềm mô phỏng CST Microwave để thiết kế mô hình cấu trúc MA và MMA tối ưu. Phương pháp tính toán được thực hiện để so sánh, đối chiếu và tối ưu thiết kế của MA và MMA. Từ các kết quả mô phỏng và tính toán, MMA được chế tạo bằng phương pháp quang khắc, và một số phương pháp khác. Sau khi chế tạo MMA, các tính chất điện từ của mẫu được đo trên hệ thiết bị phân tích mạng Vector Network Analyzer với hai ăng ten kết nối. Kết quả thu được sau khi đo đạc các mẫu MA, MMA được so sánh, đối chiếu với các mô phỏng, tính toán.

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

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

3.1.1. MMA có độ tổn hao Ohmic nhỏ

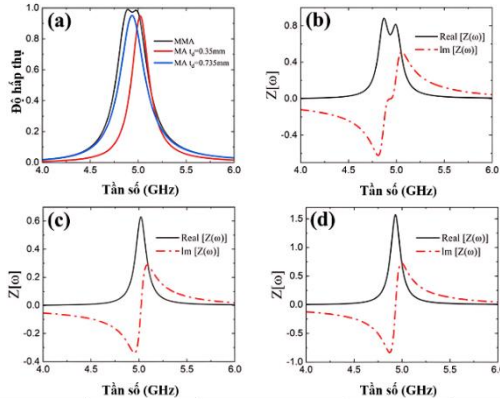


Hình 3.1 Mô phỏng cấu trúc MA (a) đơn lớp và (b) hai lớp

MA đơn lớp bao gồm một lớp kim loại-điện môi, được đặt trên một tấm kim loại liên tục, với kích thước ô cơ sở là a . MMA được tạo ra bằng cách tăng số lượng các lớp kim loại-điện môi. Trong lớp kim loại-điện môi, phần kim loại được tạo hoa văn với cấu trúc hình dấu cộng có độ dày t_m ,

chiều dài b và chiều rộng c , và được đặt trên một điện môi liên tục có độ dày t_d . Tấm kim loại liên tục dưới cùng có độ dày t_b . Các tham số cấu trúc của ô cơ sở được thiết lập như sau: $a = 18\text{mm}$, $b = 16\text{mm}$, $c = 7\text{mm}$, $t_b = 0.035\text{mm}$ và $t_m = 0.035\text{ mm}$. Điện môi được sử dụng là FR-4 với hằng số điện môi là 4.3 và tan tổn thất là 0.025. Các lớp kim loại được làm bằng đồng có độ dẫn điện là $5.96 \times 10^7\text{ S/m}$.

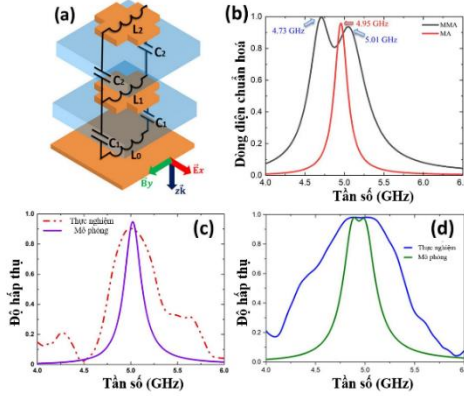
Cấu trúc MMA cho phổ hấp thụ với độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số 4.84 – 5.02 GHz, như trong Hình 3.2(a). Có hai đỉnh hấp thụ cực đại ở 4.89 và 4.97 GHz với độ hấp thụ lần lượt là 98.99% và 98.44%.



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

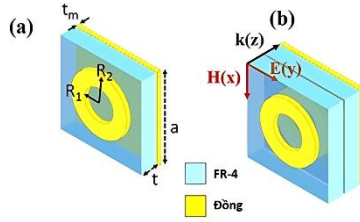
Mô hình mạch điện tương đương của MMA được thể hiện trong hình 3.10 (a). Hình 3.10 (b) trình bày phổ tính toán của tổng dòng điện của mô hình mạch cho MA và MMA. Trong trường hợp của MA, một đỉnh hấp thụ xuất hiện ở 4.95 GHz. Mặt khác, đối với MMA, hình dạng của phổ tính toán phù hợp với hình dạng của phổ hấp thụ mô phỏng, cho thấy hai đỉnh ở 4.73 và 5.01 GHz. So sánh phổ hấp thụ của MA và MMA trong thực nghiệm và mô phỏng được đưa ra trong Hình 3.10 (c) và 3.10 (d). Đối với cấu trúc MA,

kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy một đỉnh duy nhất ở 5.02 và 5.00 GHz với độ hấp thụ lần lượt là 94.7% và 90.3%. Đối với MMA, trong mô phỏng, độ hấp thụ của cấu trúc đa lớp được đề xuất đạt lớn hơn 90% trong dải tần số 4.84 – 5.02 GHz. Độ hấp thụ thực nghiệm đạt 90% trong dải tần số rộng hơn là 4.72 – 5.18 GHz.

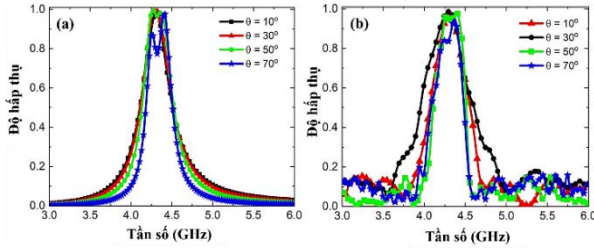


Hình 3.10. (a) Mô hình mạch tương đương của MMA. (b) Tính toán tổng dòng điện chuẩn hóa trong MA đơn lớp và MMA, theo mô hình mạch LC. Phổ hấp thụ được đo và mô phỏng của (c) MA đơn lớp và (d) MMA.

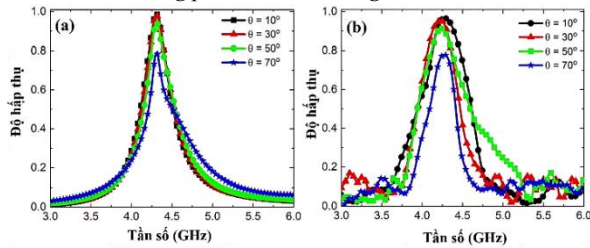
MMA được đề xuất bao gồm hai lớp cộng hưởng hình vòng (Hình 3.11). MMA cho đỉnh hấp thụ ở 4.31 GHz với độ hấp thụ là 98.9%. MMA được đề xuất có đặc tính không nhạy với góc tới cho cả phân cực TE và TM. Kích thước ô cơ sở $a = 20$ mm. Cấu trúc cộng hưởng kim loại được thiết kế như một vòng cộng hưởng tròn, với độ dày $t_m = 0.036$ mm, bán kính ngoài $R_1 = 8.5$ mm và bán kính trong $R_2 = 2.5$ mm. FR-4 có hằng số điện môi là 4.3 và hệ số tổn hao là 0.025 với độ dày $t = 0.9$ mm và các lớp kim loại được làm bằng đồng có độ dẫn điện là 5.96×10^7 S/m.



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



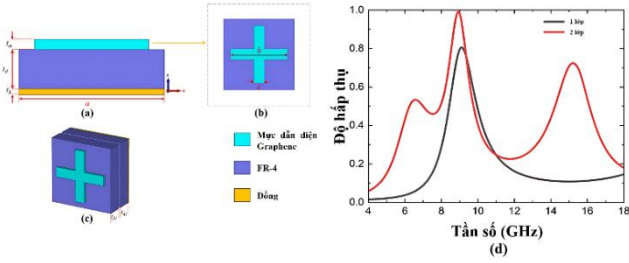
Hình 3.16. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng và (b) thực nghiệm của MMA ở các góc tới khác nhau dưới sóng phân cực TE, bao gồm 10° , 30° , 50° và 70° .



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

Khi sóng tới vuông góc, độ hấp thụ tăng từ 93.1% (đơn lớp) lên 98.9% (đa lớp) và MMA vẫn giữ được đỉnh hấp thụ với cường độ khoảng 97.5% khi góc tới là 70° . Đỉnh hấp thụ được quan sát thấy dưới sóng phân cực TM tới ở góc xiên và sự hấp thụ giảm dần.

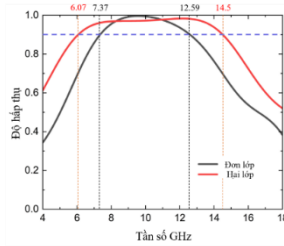
3.1.2. MMA có độ tổn hao Ohmic lớn



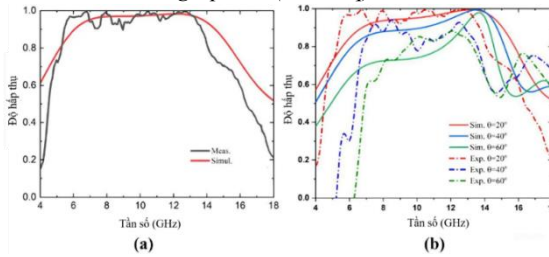
Hình 3.18. Cấu trúc MA, MMA được đề xuất (a) MA đơn lớp, (b) thiết kế lớp cộng hưởng, (c) MMA, (d) phổ hấp thụ của MA và MMA với lớp hấp thụ Graphene ($2\Omega/\text{sq}$).

Cấu trúc MA bao gồm một lớp graphene hình dấu cộng với chiều dài b , chiều rộng c và độ dày t_g (hình 3.18 b) và một lớp điện môi FR-4 có độ dày t_d được đặt trên một tấm kim loại đồng liên tục có độ dày t_m . Kích thước ô đơn vị là a , FR-4 được sử dụng với hằng số điện môi $\epsilon = 4.3$ và độ tổn hao là 0.025. Độ dẫn điện của đồng là $5.96 \times 10^7 \text{ S/m}$, trong khi mực dẫn điện graphene có điện trở bề mặt là khác nhau. Hình 3.18 (c) mô tả cấu trúc MMA gồm 2 lớp graphene-FR-4 có cùng kích thước và được thiết kế giống với MA được đặt trên một tấm kim loại đồng liên tục.

Hình 3.18 (d) cho thấy MA graphene có một đỉnh hấp thụ ở tần số 9.1 GHz với khả năng hấp thụ tương đối thấp là 80.55%. Khi số lớp tăng lên hai, số đỉnh hấp thụ tăng lên ba đỉnh trong phạm vi tần số 4-18 GHz. MA có phổ hấp thụ với đỉnh hấp thụ ở tần số 9.57 GHz và độ hấp thụ đạt 99.57%. Đồng thời cấu trúc cũng có băng thông hấp thụ đạt 5.22 GHz, với độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số 7.37–12.59 GHz. MMA có đỉnh hấp thụ ở tần số 8 GHz và 12.16 GHz đạt 96.86% và 98.29%. Cấu trúc này cho thấy băng thông hấp thụ rộng trên 8.43 GHz với độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số 6.07-14.5 GHz.



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

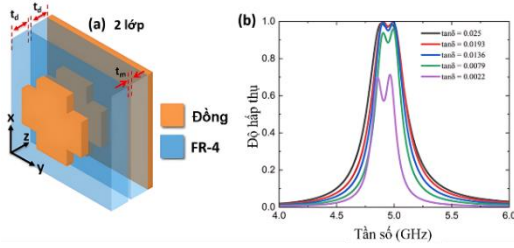


Hình 3.36. (a) Phổ hấp thụ được thực nghiệm và mô phỏng của MMA graphene. (b) Phổ hấp thụ thực nghiệm của MMA graphene với các góc tới khác nhau.

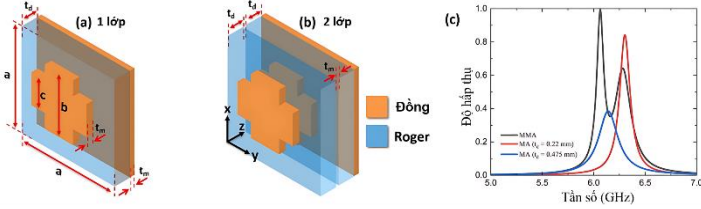
Hình 3.36 (a) cho thấy phổ hấp thụ thực nghiệm và mô phỏng của cấu trúc MMA được đề xuất. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm rất phù hợp, chứng minh rằng cấu trúc MMA được chế tạo đạt được khả năng hấp thụ trên 90% trong dải tần số từ 5.43 đến 13.65 GHz.

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

Khi giảm dần độ tổn hao của điện môi từ giá trị $\tan\delta$ từ 0.025 xuống 0.0022, độ hấp thụ của cấu trúc giảm dần. Tại tần số 4.85 GHz và 4.96 GHz độ hấp thụ đạt giá trị 69.67% và 71.26% với $\tan\delta = 0.0022$. Kết quả chỉ ra sự ảnh hưởng của điện môi hay tổn hao điện môi đến khả năng hấp thụ của cấu trúc MMA.



Hình 3.37. (a) Sơ đồ cấu trúc MMA, (b) phổ hấp thụ của MMA với $\tan \delta$ thay đổi



Hình 3.38. Sơ đồ cấu trúc (a) MA đơn lớp, (b) MMA, (c) Phổ hấp thụ của MA và MMA

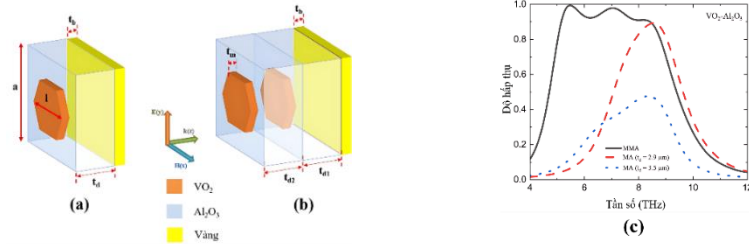
Các tham số cấu trúc của ô cơ sở bao gồm $a = 18$ mm, $b = 16$ mm, $c = 7$ mm, $t_b = 0.035$ mm, $t_d = 0.035$ mm và $t_m = 0.035$ mm. Phổ hấp thụ của cấu trúc MA và MMA được biểu diễn trong hình 3.38 (c). MA cho đỉnh hấp thụ tại tần số 3.13 GHz với độ hấp thụ 89.94%. Phổ hấp thụ của MMA cho 2 đỉnh hấp thụ đạt 95.1% và 69.41% tại tần số 3.03 GHz và 3.14 GHz.

3.3. Kết luận chương 3

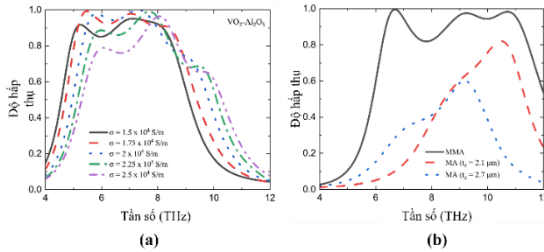
Nghiên cứu cho thấy ở cấu trúc MMA hai lớp, tổn hao nhỏ (vật liệu Cu-FR4, Cu-Roger) tạo ra các đỉnh cộng hưởng từ riêng biệt, tại các dải hẹp (như 4,89 – 4,97 GHz hoặc 6,06 – 6,28 GHz). Ngược lại, khi sử dụng tổn hao lớn (mực dẫn điện Graphene), các đỉnh cộng hưởng sát nhau sẽ có xu hướng nhập vào nhau, giúp mở rộng phổ hấp thụ lên đáng kể. Kết quả thực nghiệm cho thấy MMA Graphene đạt độ hấp thụ trên 90% trong dải tần rộng 6,07 – 14,5 GHz với FBW lên tới 81,96%, vượt trội so với các cấu trúc tổn hao thấp.

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

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



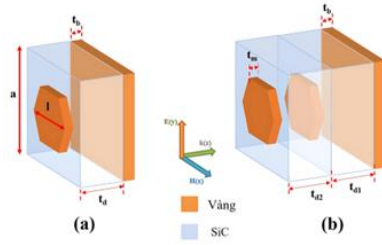
Hình 4.1. Sơ đồ cấu trúc (a) MA đơn lớp, (b) MMA hai lớp với lớp hấp thụ VO_2 , (c) phổ hấp thụ của MMA và MA đơn lớp ($\sigma = 17500 \text{ S/m}$)



Hình 4.7. Phổ hấp thụ của (a) MMA với độ dẫn VO_2 khác nhau; (b) MA và MMA với lớp hấp thụ VO_2 ($\sigma = 25000 \text{ S/m}$)

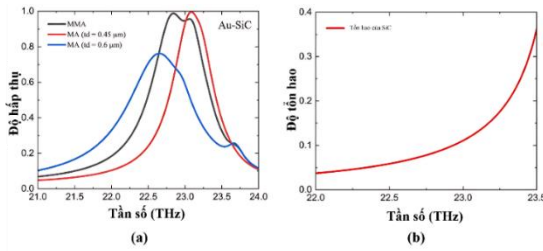
Khi VO_2 có độ dẫn thấp (17500 S/m) tương ứng tổn hao Ohmic cao, MMA chuyển sang hấp thụ dải rộng với FBW 47,89% trong khoảng 5,16–8,41 THz. Khi VO_2 có độ dẫn cao (25000 S/m) tương ứng tổn hao Ohmic thấp, cấu trúc tạo ba đỉnh hấp thụ mạnh tại 6,68, 9,24 và 10,7 THz.

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

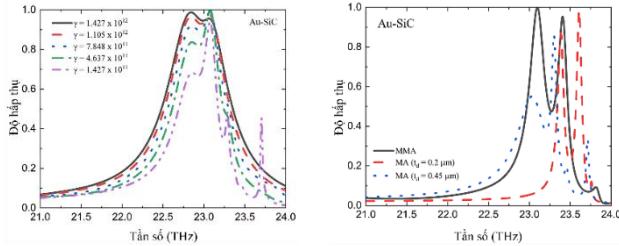


Hình 4.11. (a) Sơ đồ cấu trúc MA Au-SiC, (b) MMA

Cấu trúc MMA Au-SiC đã được đề xuất như hình 4.11, MMA cho 2 đỉnh hấp thụ cực đại tại tần số 22.84 và 23.06 THz với độ hấp thụ tương ứng là 98.77% và 95.62%, băng thông hấp thụ lớn hơn 90% với FBW đạt giá trị 1.78%.



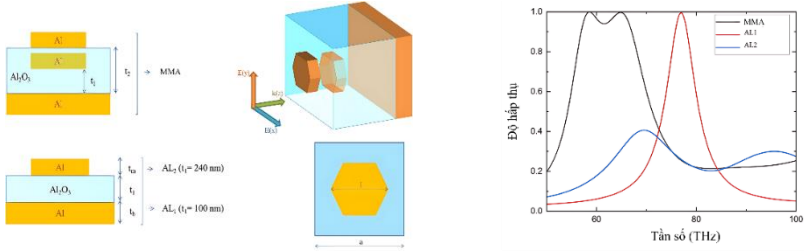
Hình 4.12. (a) Phổ hấp thụ của MA và MMA Al-SiC, (b) độ tổn hao của SiC



Hình 4.17. Ảnh hưởng của hệ số tổn hao điện môi γ đến tính chất hấp thụ của MMA, phổ hấp thụ của MMA và MA đơn lớp với $\gamma = 1.427 \times 10^{11}$

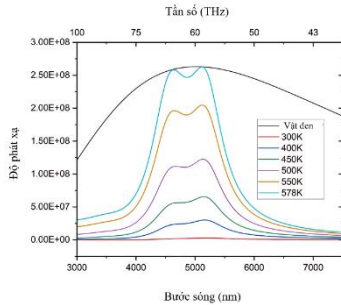
Phổ hấp thụ của MA và MMA Au-SiC với $\gamma = 1.427 \times 10^{11}$ được trình bày trong hình 4.17. Cấu trúc MMA có 2 đỉnh hấp thụ tại tần số 23.09 và 23.4 THz với độ hấp thụ đạt giá trị lần lượt là 99.96% và 95.21%.

4.3. Ứng dụng MMA trong phát xạ hồng ngoại



Hình 4.23. Cấu trúc MA đơn lớp và MMA, phổ hấp thụ của MA và MMA.

Ô cơ sở của MMA được đề xuất có kích thước a và gồm hai lớp. Các thông số cấu trúc của ô đơn vị được tối ưu với các giá trị $a = 1500\text{nm}$, $t_b = 200\text{ nm}$, $t_l = 100\text{ nm}$, $t_m = 100\text{ nm}$, $t_2 = 240\text{ nm}$, $l = 300\text{ nm}$. Hình 4.23 trình bày phổ hấp thụ của MMA đề xuất và MA đơn hình lục giác. Kết quả cho thấy cấu trúc AL1 ($t_l = 100\text{nm}$) và AL2 ($t_l = 240\text{nm}$) có hai đỉnh hấp thụ ở 41.3 THz và 69.5 THz với độ hấp thụ lần lượt là 94% và 40%. Cấu trúc AL1 + AL2 cho kết quả mô phỏng phổ hấp thụ tốt hơn với độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số 56.9 – 67.9 THz.



Hình 4.24. So sánh cường độ phát xạ của MA với các nhiệt độ khác nhau với cường độ phát xạ của vật đen tuyệt đối

Cường độ phát xạ của cấu trúc MA được trình bày trong Hình 4.24 cho thấy xu hướng tăng theo nhiệt độ. Ở 300 K, phát xạ gần như bằng không;

từ 400 K trở lên, dải phát xạ mở rộng, cường độ tăng dần, trong khi vị trí các đỉnh không thay đổi. Tại 578 K, cường độ phát xạ tại 4632 nm và 5115 nm đạt giá trị xấp xỉ vật đen.

4.3. Kết luận chương 4

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

- Đã thiết kế, mô phỏng các tính chất điện từ của MMA có độ tổn hao Ohmic lớn dựa trên vật liệu $\text{VO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. Khi độ dẫn VO_2 đạt giá trị 17500 S/m, MMA có FBW là 47.89% trong khoảng 5.16-8.41 THz

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

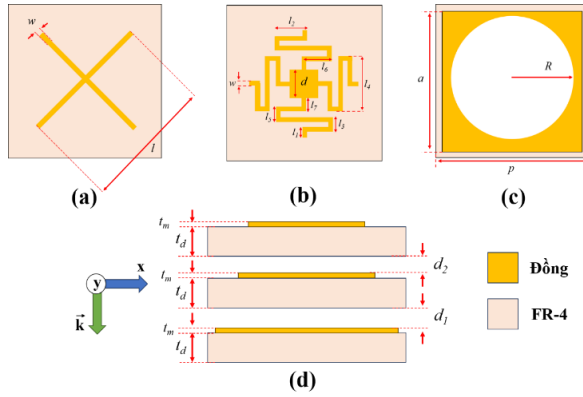
- Đã thiết kế, mô phỏng các tính chất điện từ của MMA có độ tổn hao điện môi lớn và nhỏ dựa trên vật liệu Au - SiC. Với độ tổn hao điện môi lớn, MMA cho 2 đỉnh.

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

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

Cấu trúc MMA đa chức năng được thiết gồm 3 lớp cấu trúc MA đơn lẻ khác nhau, như được thể hiện trong hình 5.1. Thông số cấu trúc được thể hiện trong bảng 5.1.

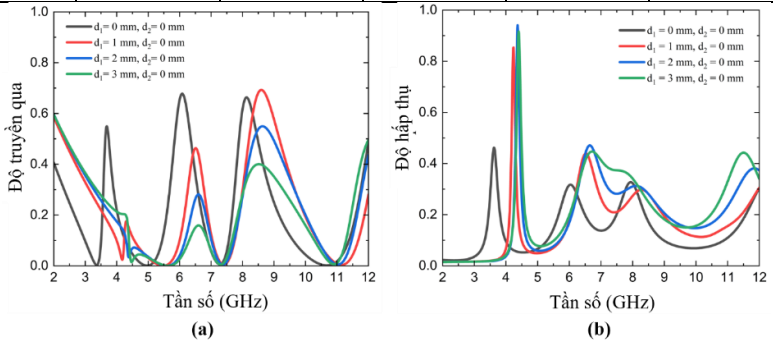
Khi tối ưu khoảng cách giữa các lớp, MMA cho phổ hấp thụ đạt giá trị cực đại 94.36% tại tần số 4.36 GHz, sau đó độ hấp thụ giảm xuống khi $d_1 = 3$ mm.



Hình 5.1. Sơ đồ thiết kế cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số GHz với (a) lớp phía trên cùng, (b) lớp ở giữa, (c) lớp dưới cùng và (d) tổng thể cấu trúc

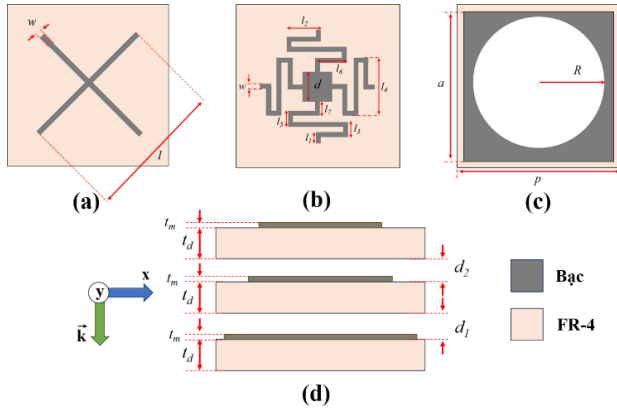
Bảng 5.1. Thông số cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng GHz

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



Hình 5.3. Phổ truyền qua (a) và phổ hấp thụ (b) của các cấu trúc MMA

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



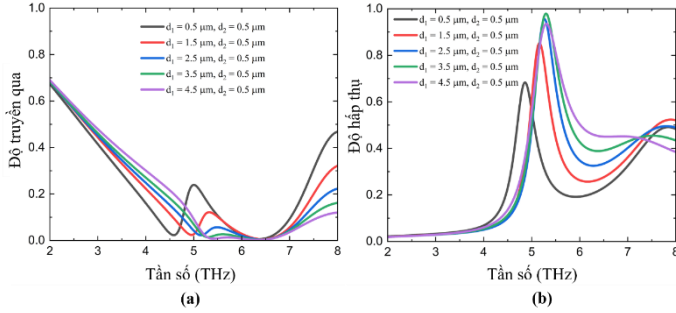
Hình 5.6. Sơ đồ thiết kế cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz với (a) lớp phía trên cùng, (b) lớp ở giữa, (c) lớp dưới cùng và (d) tổng thể cấu trúc

Cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng THz được thiết kế với hình dạng giống cấu trúc MMA hoạt động tại vùng GHz đã đề cập ở trên. Thông số cấu trúc được thể hiện trong bảng 5.2.

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

Bảng 5.2. Thông số cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng THz

Khi tối ưu khoảng cách giữa các lớp của MMA, phổ hấp thụ đạt giá trị cực đại 98.21% tại tần số 5.29 THz.



Hình 5.8. Phổ truyền qua (a) và phổ hấp thụ (b) của các cấu trúc MMA với $d_2 = 0.5 \mu\text{m}$ và d_1 thay đổi

5.3. Kết luận chương 5

Đã thiết kế và mô phỏng cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số GHz. Cấu trúc MMA đa chức năng được thiết kế gồm 3 lớp cấu trúc MA đơn lẻ đồng-FR-4 khác nhau. Cấu trúc MMA sau khi được tối ưu, phổ hấp thụ đạt giá trị cực đại 94,36% tại tần số 4,36 GHz.

Đã thiết kế và mô phỏng cấu trúc MMA đa chức năng hoạt động tại vùng tần số THz, gồm 3 lớp cấu trúc MA đơn lẻ bạc-PET khác nhau. Cấu trúc MMA sau khi được tối ưu, phổ hấp thụ đạt giá trị cực đại 98,21% tại tần số 5,29 THz.

Khi thay đổi khoảng cách giữa các lớp, sự tương tác giữa các lớp cũng thay đổi. Các cấu trúc này có thể chuyển đổi giữa hiệu ứng truyền qua EIT đa dải và hiệu ứng hấp thụ EIA, đạt truyền qua cao tại nhiều tần số và hấp thụ cực đại trên 90% ở chế độ EIA.

KẾT LUẬN CHUNG

Trong luận án, các cấu trúc metamaterial absorber (MMA) với các mức tổn hao Ohmic và tổn hao điện môi khác nhau đã được thiết kế, chế tạo và mô phỏng thành công.

- Đã thiết kế và chế tạo thành công các cấu trúc MMA đa dải và dải rộng hoạt động ở vùng GHz dựa trên Cu-FR4 và graphene-FR4. MMA Cu-FR4 đạt hai đỉnh hấp thụ tại 4,89 và 4,97 GHz (>98%), MMA graphene hai lớp đạt hấp thụ >90% từ 6,07–14,5 GHz với FBW 81,96%.

Đã thiết kế và mô phỏng MMA đa đỉnh và dải rộng dựa trên $\text{VO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. Khi VO_2 có độ dẫn cao (25000 S/m) tương ứng tổn hao Ohmic thấp, cấu trúc tạo ba đỉnh hấp thụ mạnh tại 6,68, 9,24 và 10,7 THz. Khi VO_2 có độ dẫn thấp (17500 S/m) tương ứng tổn hao Ohmic cao, MMA chuyển sang hấp thụ dải rộng với FBW 47,89% trong khoảng 5,16–8,41 THz.

Đã thiết kế các cấu trúc MMA đa chức năng ở vùng GHz và THz gồm ba lớp cộng hưởng đơn lẻ. Các cấu trúc này có thể chuyển đổi giữa hiệu ứng truyền qua EIT và hiệu ứng hấp thụ EIA, đạt truyền qua cao tại nhiều tần số và hấp thụ cực đại trên 90% ở chế độ EIA.

Đã làm rõ cơ chế tương tác giữa các lớp trong MMA: tổn hao cao làm các đỉnh hấp thụ tiến gần nhau, còn tổn hao thấp khiến các đỉnh hấp thụ tách rời nhau. Với các lớp cộng hưởng khác nhau, việc điều chỉnh khoảng cách lớp cho phép chuyển giữa tương tác triệt tiêu và tăng cường, từ đó đạt khả năng chuyển đổi giữa EIT và EIA trong vật liệu biến hóa.

KIẾN NGHỊ NHỮNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

1. Sử dụng kỹ thuật học máy, AI tối ưu cấu trúc MMA.
2. Ứng dụng kỹ thuật mới, tích hợp các vật liệu tiên tiến trong chế tạo MMA.
3. Nghiên cứu, ứng dụng các cấu trúc MMA cho thu năng lượng và cảm biến khí

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

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