

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

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

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Nguyễn Thị Minh

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

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Vật liệu điện tử

Mã số: 9 44 01 23

Hà Nội – Năm 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: PGS.TS. Nguyễn Thị Quỳnh Hoa

Người hướng dẫn khoa học 2: GS.TS. Vũ Đình Lâm

Phản biện 1: PGS.TS. Nguyễn Thị Thúy

Phản biện 2: PGS.TS. Nguyễn Mạnh Thắng

Phản biện 3: PGS.TS. Mai Hồng Hạnh

Luận án đã 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 giờ 00, thứ ngày tháng năm 2025.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

Gần đây, các nghiên cứu về vật liệu biến hóa (Metamaterials - MMs) tập trung vào việc điều khiển cấu trúc và tính chất của chúng nhằm định hướng cho các ứng dụng thực tiễn. Một số ứng dụng đầy triển vọng hiện nay của MMs bao gồm thiết kế bộ hấp thụ và bộ chuyển đổi phân cực sóng điện từ.

Các nghiên cứu về MMs hấp thụ sóng điện từ (Metamaterials Absorber - MA) chủ yếu tập trung vào việc mở rộng dải tần làm việc, nâng cao hiệu suất hấp thụ, và điều chỉnh vùng tần số hoạt động từ dải tần số vi ba đến dải tần số ánh sáng. Đồng thời, các nghiên cứu cũng chú trọng giảm sự ảnh hưởng của phân cực sóng và góc sóng tới đối với hiệu suất hấp thụ. Ngoài ra, với khả năng điều khiển biên độ và pha sóng của MMs, vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ (Metamaterials Polarization Converter - MPC) cũng đang nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu. Những ứng dụng tiềm năng của MPC bao gồm giảm tiết diện phản xạ radar (Radar Cross Section - RCS), ăng-ten thông minh, và nhiều ứng dụng khác. Các nghiên cứu về MPC tập trung vào việc cải thiện hiệu suất chuyển đổi và mở rộng băng thông hoạt động ở các dải tần số khác nhau. Mặc dù các nghiên cứu về MMs đã đạt được hiệu năng hoạt động cao và thiết kế kích thước nhỏ gọn trong ứng dụng thiết kế bộ hấp thụ hoặc bộ chuyển đổi phân cực sóng điện từ, nhưng các cấu trúc này hiện tại chỉ hoạt động với từng chức năng riêng lẻ là hấp thụ hoặc chuyển đổi phân cực. Trong khi đó, một số hệ thống yêu cầu tính di động, kích thước nhỏ gọn và khả năng hoạt động đa chức năng. Đặc biệt, các đặc tính như chuyển đổi phân cực và hấp thụ sóng điện từ đóng vai trò quan trọng trong các thành phần đo lường điện từ trường, thiết kế ăng-ten, cũng như các ứng dụng đòi hỏi hệ số RCS thấp. Cho đến nay, một số nghiên cứu ban đầu về vật liệu biến hóa đa chức năng (Multifunction Metamaterial - MFM) kết hợp khả năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ đã được đề xuất. Các nghiên cứu này chủ yếu sử dụng các phương

pháp như: (1) điều khiển cơ học để thay đổi cấu trúc trong đó thường sử dụng cấu trúc zig-zag hoặc origami có thể thay đổi hình dạng để điều chỉnh tính chất hoạt động [10, 11]; (2) tích hợp các linh kiện điện tử như Điốt [12-14]; (3) tích hợp vật liệu có khả năng thay đổi trạng thái như graphene hoặc VO_2 có thể được sử dụng để điều chỉnh tính chất hấp thụ và chuyển đổi phân cực mà không làm thay đổi cấu trúc thiết kế ban đầu [5, 15, 16] [17]; (4) tích hợp vật liệu nước, đây là phương pháp mới và có tiềm năng nhờ nước có tổn thất điện môi cao trong dải tần số rộng giúp hiệu quả trong hấp thụ băng rộng [18-20]. Mặc dù các phương pháp đề xuất cho thấy hiệu suất hoạt động hiệu quả trong dải tần làm việc, tuy nhiên, các thiết kế đã công bố có cấu trúc còn phức tạp khó khăn cho quá trình chế tạo hoặc dải tần hoạt động còn hẹp không thích hợp cho nhiều ứng dụng yêu cầu băng rộng trong thực tế hoặc hiệu suất chưa đạt mức đồng thời cao trong cả hai chế độ hoạt động. Ngoài ra, các cơ chế vật lý chi phối tính chất hấp thụ và chuyển đổi phân cực của vật liệu đa chức năng chưa được nghiên cứu một cách toàn diện.

Tại Việt Nam, nghiên cứu về MMs đang ngày càng phát triển với sự tham gia của nhiều nhóm nghiên cứu từ các trường đại học và viện nghiên cứu. Các kết quả nghiên cứu chủ yếu tập trung vào vật liệu có đặc tính hấp thụ sóng điện từ, trong khi các nghiên cứu về vật liệu chuyển đổi phân cực sóng điện từ và vật liệu đa chức năng còn hạn chế. Nghiên cứu bước đầu về MFM đã được thực hiện tại Học viện Khoa học và Công nghệ bởi TS. Lê Văn Long với cấu trúc tích hợp điốt [21]. Kết quả nghiên cứu đạt được cho thấy tiềm năng trong việc tích hợp các chức năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ.

Do đó, luận án tập trung vào việc nghiên cứu cơ chế hoạt động của MMs có đặc tính hấp thụ và đặc tính chuyển đổi phân cực sóng điện từ, từ đó hướng tới thiết kế cấu trúc, chế tạo MFM có khả năng chuyển đổi hoạt động giữa chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ trong vùng tần số GHz, THz. Các thiết kế đề xuất có cấu trúc nhỏ gọn, đạt hiệu suất hấp thụ và chuyển

đổi phân cực cao trong dải tần số rộng, đồng thời ít bị ảnh hưởng bởi góc tới và góc phân cực của sóng điện từ.

Mục tiêu nghiên cứu

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

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

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

Nội dung nghiên cứu

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

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

Nghiên cứu chế tạo MFM có khả năng chuyển mạch hoạt động ở chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ có cấu trúc nhỏ gọn hoạt động vùng tần số GHz.

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

1.1. Tổng quan về vật liệu biến hóa

Vật liệu biến hóa (Metamaterials - MMs) là loại vật liệu nhân tạo được cấu thành từ các “giả nguyên tử” có kích thước nhỏ hơn nhiều lần bước sóng hoạt động. Một đặc điểm quan trọng của MMs là khả năng điều chỉnh các

thông số điện từ như độ điện thẩm (ϵ) và độ từ thẩm (μ), giúp kiểm soát sự truyền sóng theo những cách mới, chẳng hạn như tạo ra chiết suất âm. Điều này cho phép MMs có những tính năng đặc biệt như bề cong ánh sáng theo hướng bất thường, chế tạo áo tàng hình, tăng cường khả năng hấp thụ sóng radar, hoặc cải thiện hiệu suất của ăng-ten và cảm biến.

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

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

Cấu trúc ô cơ sở của các MA hiện nay chủ yếu bao gồm ba lớp: lớp trên cùng được hình thành bởi các lớp cộng hưởng kim loại sắp xếp tuần hoàn, lớp điện môi ở giữa và lớp kim loại liên tục ở dưới cùng. Nguyên lý thiết kế MA dựa trên nguyên lý phối hợp trở kháng để triệt tiêu thành phần phản xạ khi sóng điện từ chiếu tới bề mặt vật liệu. MA đã mở ra nhiều tiềm năng ứng dụng cho các ứng dụng tần số RF, mở rộng từ tần số sóng vi ba đến tần số quang, chẳng hạn như cảm biến, bộ tách sóng quang, pin mặt trời, truyền dẫn năng lượng không dây,...

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

MMs trong các bộ chuyển đổi phân cực sóng điện từ hiện đang nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu nhờ khả năng điều khiển biên độ và pha sóng điện từ. Đối với MPC thực hiện chuyển đổi sóng truyền qua thường không thể đồng thời đạt được hiệu suất cao và băng thông rộng, ngoài ra thiết kế đa lớp phức tạp, khiến việc chế tạo trở nên khó khăn. Đối với MPC thực hiện chuyển đổi phân cực sóng phản xạ, sử dụng các cấu trúc MMs hai chiều đơn lớp, mang lại giải pháp đơn giản và hiệu quả hơn. Để đạt hiệu quả chuyển đổi phân cực, sóng điện từ tương tác với vật liệu cần tạo ra sóng phản xạ hoặc sóng truyền qua có cường độ đáng kể ở phân cực mong muốn (TE hoặc TM). Khi sóng tới có một phân cực cụ thể (ví dụ TE) chiếu vào vật liệu, bề mặt với tính chất không đối xứng của vật liệu sẽ tạo ra các thành phần phản xạ và truyền qua mang phân cực khác nhau. Sự tương tác này dẫn đến hiệu ứng chuyển đổi phân cực của sóng điện từ.

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

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

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

Phương pháp tích hợp các linh kiện điện tử như điốt

Một trong những cách để cấu hình lại được các vật liệu biến hoá siêu bề mặt thì việc tích hợp các phần tử như điốt là một trong những giải pháp được thực hiện khá phổ biến hiện nay. Hoạt động đa chức năng của cấu trúc được thực hiện thông qua việc sử dụng điốt như một công tắc bên ngoài để điều chỉnh giữa chế độ hấp thụ và chế độ chuyển đổi phân cực.

Phương pháp thay đổi hình dạng cơ học

MMs hiện nay có thể được thiết kế linh hoạt với khả năng uốn cong, kéo dài, và thậm chí tạo thành các hình dạng tùy ý. So với cấu trúc MMs phẳng, MMs không phẳng có nhiều ưu thế vượt trội, bao gồm khả năng tích hợp đa chức năng, thu nhỏ kích thước vật liệu và tăng cường hiệu suất hấp thụ sóng điện từ.

Phương pháp tích hợp vật liệu nước

Gần đây, vật liệu nước được chú ý nghiên cứu trong các cấu trúc MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ nhờ nước là vật liệu có độ tổn hao cao trong dải tần số rộng, giúp hiệu quả trong hấp thụ băng rộng.

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

Việc kết hợp các siêu bề mặt với các vật liệu có khả năng thay đổi trạng thái, chẳng hạn như Chalcogenide GeSbTe, Vanadium dioxide (VO_2) và Graphene đã được đề xuất để tạo MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ. Các cấu trúc MFM tích hợp graphene thực hiện chuyển đổi hoạt động từ chế độ hấp thụ sang chế độ chuyển đổi phân cực bằng cách thiết lập tiềm

năng hóa học cho graphene.

Với các cấu trúc MFM tích hợp vật liệu VO_2 , quá trình chuyển đổi giữa chế độ hấp thụ và chế độ chuyển đổi phân cực bằng cách thay đổi trạng thái của VO_2 từ pha điện môi sang pha kim loại thông qua việc kích thích VO_2 bởi nhiệt độ, điện trường ngoài hoặc kích thích bằng quang học.

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

Các chất hấp thụ được sử dụng để hấp thụ và làm tiêu tan tác động của sóng điện từ, trong khi bộ chuyển đổi phân cực có khả năng điều chỉnh trạng thái phân cực của sóng chiếu sáng. Những thiết bị này được nghiên cứu rộng rãi trong thời gian gần đây cho đa dạng các lĩnh vực như quân sự, viễn thông, an ninh, cảm biến,...

1.4. Kết luận chương 1

Để hình thành cơ chế hấp thụ trong MMs, các cấu trúc MMs cơ bản gồm 3 lớp kim loại - điện môi - kim loại với lớp kim loại trên cùng có cấu trúc cộng hưởng giúp tạo trở kháng vào phù hợp với trở kháng của môi trường truyền. Lớp kim loại dưới cùng giúp triệt tiêu sóng điện từ, ngăn sóng điện từ truyền ra ngoài vật liệu, sóng điện từ chủ yếu bị hấp thụ bên trong lớp điện môi ở giữa. Bên cạnh đó, để hình thành cơ chế chuyển đổi phân cực sóng điện từ, tính đối xứng của cấu trúc ô cơ sở trong các MMs được lưu tâm trong thiết kế. Khi tính đối xứng của cấu trúc so với trường tới bị phá vỡ, vật liệu biến hóa có thể sinh ra đáp ứng điện từ ở các phương khác so với trường tới. Từ đó, trạng thái phân cực của sóng điện từ được chuyển đổi so với trạng thái phân cực của sóng điện từ tới.

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp tính toán lí thuyết

2.1.1. Mạch điện tương đương

Mô hình mạch tương đương là giải pháp đơn giản và hiệu quả để giải

quyết bài toán phối hợp trở kháng bằng cách thiết kế mô hình phần tử điện trở và điện dẫn phù hợp trong cấu trúc MPA kim loại-điện môi-kim loại. Với các cấu trúc MMs có đặc tính hấp thụ sử dụng vật liệu kim loại như vàng, bạc, đồng giá trị điện trở của các kim loại này có thể bỏ qua. Trong khi đó, các giá trị điện cảm L, điện dung C lại phụ thuộc vào kích thước hình học của cấu trúc và tính chất điện từ của loại vật liệu cấu thành nên MMs. Lúc này, MMs hoạt động tương ứng với mạch điện gồm điện cảm L và tụ điện C và cộng hưởng tại tần số $\omega = 1/\sqrt{LC}$.

Từ đó, tần số cộng hưởng của MMs và MMs có đặc tính hấp thụ có thể xác định được từ mô hình mạch LC tương đương.

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

Phối hợp trở kháng trong MA là một yếu tố quan trọng để tối ưu hóa hiệu suất hấp thụ. Trở kháng vào Z của cấu trúc được tính bằng biểu thức sau:

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

Khi trở kháng vào Z của MA thỏa mãn điều kiện phối hợp trở kháng với trở kháng môi trường truyền (phần thực của Z có giá trị gần bằng 1, phần ảo có giá trị gần bằng 0), sóng phản xạ sẽ bị suy giảm và khả năng hấp thụ sóng điện từ được tăng cường.

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

Hiệu suất hấp thụ của cấu trúc MMs có đặc tính hấp thụ được tính theo biểu thức: $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$

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

Hiệu suất chuyển đổi phân cực của cấu trúc MMs có đặc tính hấp thụ được tính theo biểu thức:

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

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

2.2. Phương pháp mô phỏng

Các đặc trưng điện từ của MMs, MFM được mô phỏng bằng phần mềm CST dựa trên cơ sở ứng dụng kỹ thuật tích phân hữu hạn để xác định các thông số đặc trưng khi sóng điện từ tương tác với vật liệu. Trong đó, phân bố trường điện từ, mật độ dòng điện,... được trích xuất từ kết quả mô phỏng làm dữ liệu để phân tích các tính chất của MM, MFM.

2.3. Phương pháp chế tạo và đo đạc thực nghiệm

Mẫu MPC và mẫu MFM tích hợp nước hoạt động vùng tần số GHz được lựa chọn nghiên cứu bằng phương pháp chế tạo thực nghiệm. Trong đó, mẫu MPC được chế tạo bằng kỹ thuật quang khắc, mẫu MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ tích hợp nước được chế tạo bằng kỹ thuật quang khắc kết hợp công nghệ in 3D. Sau khi chế tạo, các đặc trưng của MMs được đo đạc bằng máy phân tích mạng Rohde & Schwarz ZNB20, từ đó khảo sát và so sánh với kết quả tính toán lý thuyết và mô phỏng.

2.4. Kết luận chương

Chương 2 trình bày các phương pháp nghiên cứu bao gồm phương pháp tính toán lý thuyết, mô phỏng bằng phần mềm CST, chế tạo và đo đạc thực nghiệm. Các phương pháp nghiên cứu đều có độ chính xác và tin cậy, được sử dụng phổ biến trong nghiên cứu MMs.

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

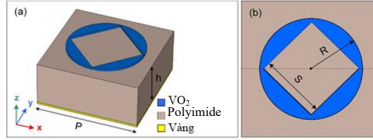
3.1. Thiết kế cấu trúc và khảo sát tính chất hấp thụ của MA hoạt động vùng tần số THz

3.1.1. Thiết kế cấu trúc MA hoạt động vùng tần số THz

Cấu trúc MA sử dụng cấu trúc đĩa tròn khoét lỗ hình vuông tích hợp vật liệu chuyển pha Vanadium dioxit (VO_2) được chúng tôi đề xuất.

Kết quả khảo sát độ hấp thụ cho thấy, cấu trúc đề xuất có khả năng thay đổi độ hấp thụ khi thay đổi độ dẫn điện của VO_2 . Bên cạnh đó, cấu trúc đề xuất thể hiện khả năng chuyển đổi hoạt động ở chức năng hấp thụ khi VO_2 ở pha kim loại và chức năng phản xạ khi VO_2 ở pha điện môi.

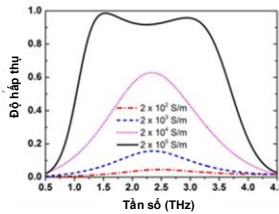
Tiến hành tối ưu cấu trúc đề xuất bằng cách khắc đĩa tròn bởi một hình vuông có cạnh s . Cấu trúc tối ưu được thể hiện trên Hình 3.3.



Hình 3.3. Ô cơ sở của MA đề xuất: (a) ảnh 3D và (b) hình ảnh mặt trên

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

Thiết kế sau khi tối ưu cho thấy khi tăng độ dẫn của VO_2 từ 2×10^2 S/m đến 2×10^5 S/m, độ hấp thụ của MA tăng dần từ 4% đến 98%, đồng thời băng thông cũng được mở rộng.



Hình 3.4. Phổ hấp thụ với các giá trị độ dẫn khác nhau của VO_2

Khảo sát phân bố điện trường ở lớp trên của cấu trúc chỉ ra rằng, khi VO_2 ở pha điện môi, lớp VO_2 ở trạng thái gần như trong suốt đối với sóng điện từ trong dải tần THz. Khi đó, hầu hết sóng điện từ xuyên qua lớp VO_2 và lớp điện môi, sau đó phản xạ trở lại từ lớp nền kim loại ở dưới cùng. Khi VO_2 ở pha kim loại, điện trường tập trung mạnh dần ở các cạnh hình vuông phía trong và hai phía vòng ngoài đĩa tròn của lớp VO_2 . Sự tập trung này tương ứng với sự gia tăng hiệu suất hấp thụ của cấu trúc MA.

Kết quả tính toán trở kháng vào Z của cấu trúc cho thấy trong dải tần từ

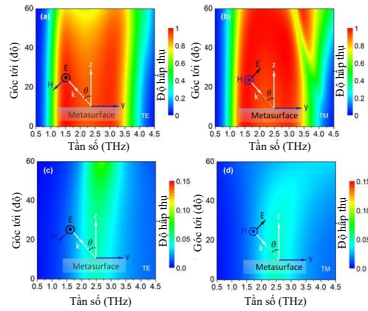
1,25 đến 3,5 THz, phần thực và phần ảo của trở kháng Z gần bằng 1 và 0. Điều này chứng minh cho hiệu suất hấp thụ cao của MA trong dải tần hoạt động.

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

Kết quả mô phỏng cho thấy, độ dày t của lớp vật liệu làm bề mặt cộng hưởng có ảnh hưởng đến độ hấp thụ của MA theo xu hướng giảm khi tăng độ dày t của lớp VO_2 , tuy nhiên, băng thông hấp thụ có xu hướng tăng nhẹ.

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

Khi VO_2 ở pha kim loại, cấu trúc hoạt động hiệu quả với các góc tới đến 60° . khi VO_2 ở pha điện môi, mức độ hấp thụ của cấu trúc này rất thấp ở tất cả các góc tới và góc phân cực, cho thấy hầu hết các sóng điện từ tới đều bị phản xạ.



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

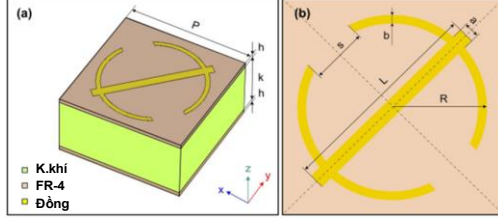
Ngoài ra, MA đề xuất có đặc tính không nhạy với phân cực do đặc tính đối xứng của cấu trúc.

So sánh hiệu suất của MA đề xuất với các MA sử dụng VO_2 trước đó cho thấy thiết kế đề xuất vượt trội với cấu trúc đơn giản, dễ chế tạo và đạt được băng thông rộng nhất và không nhạy cảm với góc tới.

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

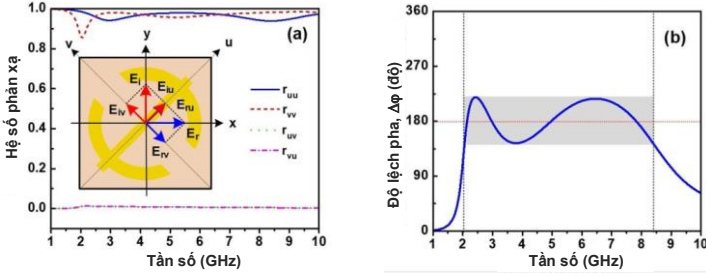
3.2.1. Thiết kế cấu trúc MPC cho ứng dụng băng tần S, C

Trong phần này chúng tôi đề xuất một thiết kế đơn giản của MPC cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh được đề xuất cho các ứng dụng băng tần S (2 – 4 GHz) và băng tần C (4 – 8 GHz). Thiết kế đạt hiệu suất chuyển đổi phân cực lớn hơn 90% trong dải tần từ 2 GHz đến 8,45 GHz bao phủ đầy đủ cả hai dải băng tần S và C, RBW đạt 123,4%.



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

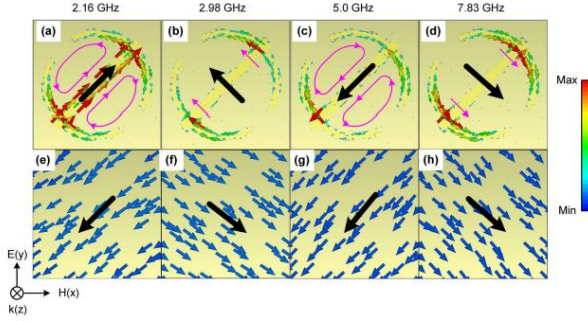
Nguyên lý hoạt động của cấu trúc được phân tích thông qua khảo sát các hệ số phản xạ đồng phân cực và phản xạ vuông góc của sóng phản xạ trên trục tọa độ uv (quay với trục xy một góc 45°).



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

Biên độ hệ số r_{uu} và r_{vv} gần bằng 1 và r_{uv} và r_{vu} gần như bằng 0 trong dải tần từ 2 đến 8,45 GHz. Kết quả này chứng tỏ sóng phản xạ được quay chính xác 90° so với sóng tới.

Để hiểu rõ cơ chế vật lí của quá trình chuyển đổi phân cực, sự phân bố dòng điện bề mặt trên lớp kim loại tại bốn tần số cộng hưởng được khảo sát.



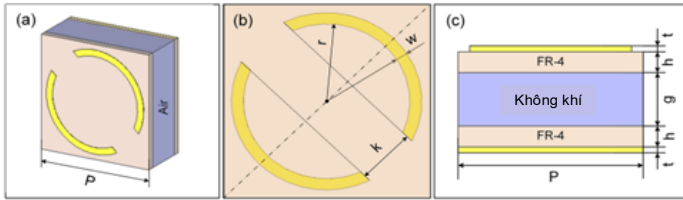
Hình 3.15. Phân bố dòng điện mô phỏng bề mặt của lớp trên và lớp dưới của ô đơn vị tại bốn tần số cộng hưởng.

Ngoài ra, ảnh hưởng của độ dày lớp không khí và góc sóng tới đến hiệu suất chuyển đổi được khảo sát. Kết quả cho thấy, khi thêm lớp không khí, hiệu suất chuyển đổi phân cực của các đỉnh cộng hưởng được cải thiện đáng kể. Góc tới của sóng điện từ có ảnh hưởng nhẹ đến hiệu suất chuyển đổi.

Mẫu MPC được chế tạo bằng phương pháp quang khắc, sau đó thực hiện khảo sát các đặc trưng điện từ bằng máy phân tích mạng cho thấy kết quả mô phỏng và kết quả đo đạc bằng thực nghiệm có sự tương đồng tốt với một chút sai lệch nhỏ do sai số trong quá trình chế tạo.

Cuối cùng, hiệu suất hoạt động của MPC đề xuất được so sánh với các MPC băng thông rộng hiện có đã được báo cáo gần đây cho thấy MPC đề xuất hoạt động trong dải tần số thấp nhất với băng thông cao nhất và có thiết kế nhẹ nhất trong tất cả các bộ chuyển đổi được so sánh.

3.2.2. Tối ưu cấu trúc MPC cho ứng dụng băng tần C, X và Ku



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

Thiết kế MPC đề xuất cho các ứng dụng băng tần C (4 – 8 GHz), X (8 GHz – 12GHz) và băng Ku (12 GHz – 18 GHz). Cấu trúc đề xuất được khảo sát bằng cả phương pháp mô phỏng và phương pháp thực nghiệm (hình 3.20).

Kết quả mô phỏng cho thấy, MPC đạt hiệu suất chuyển đổi phân cực trên 93% trong dải tần từ 4,0 đến 14 GHz như thể hiện trên Hình 3.21(b). Tỉ số băng thông RBW đạt tới 111,1%.

Kết quả phân tích các hệ số phản xạ trên trục tọa độ uv cho thấy sóng điện từ tới phân cực y được phản xạ thành sóng phân cực x và sóng phản xạ được quay pha một góc 90° so với sóng tới.

Khảo sát phân bố của điện trường, từ trường và dòng điện trên bề mặt lớp cộng hưởng kim loại tại bốn tần số cộng hưởng cho thấy, các tần số cộng hưởng 4,35 GHz và 7,42 GHz, dòng điện trên bề mặt của lớp cộng hưởng phía trên song song và ngược chiều với dòng điện trên bề mặt của lớp kim loại dưới cùng, điều đó cho thấy rằng các tần số cộng hưởng này bắt nguồn từ cộng hưởng từ. Ngược lại, tại các tần số cộng hưởng 12,39 GHz và 13,87 GHz được hình thành do cộng hưởng điện.

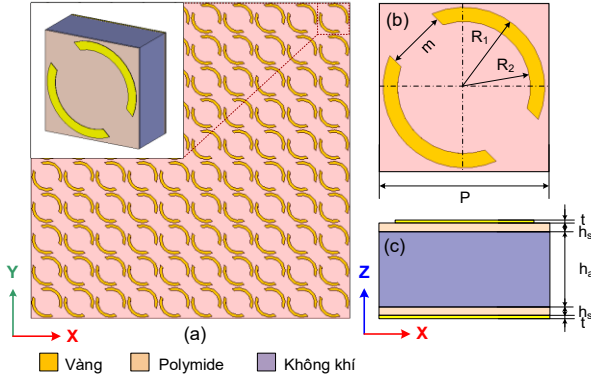
Khảo sát ảnh hưởng của góc sóng tới đến hiệu suất của MPC cho thấy, khi góc tới thay đổi từ 0° đến 50° , hiệu suất chuyển đổi phân cực vẫn duy trì trên 90% với góc tới từ 0° đến 10° và trên 80% khi góc tới nhỏ hơn 30° .

Kết quả đo đạc bằng thực nghiệm được so sánh với kết quả mô phỏng cho thấy sự tương đồng tốt giữa mô phỏng và thực nghiệm. Điều này giúp nâng cao độ tin cậy của phương pháp mô phỏng.

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

Trong nghiên cứu này, một MPC thiết kế cho các ứng dụng hoạt động trong vùng tần số THz đã được đề xuất (Hình 3.31).

Hiệu suất chuyển đổi phân cực của cấu trúc đề xuất đạt gần 100% tại các tần số cộng hưởng và lớn hơn 93% trong dải tần từ 1,6 THz đến 5,8 THz với tỉ số băng thông RBW là 113,5%.



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

Cơ chế chuyển đổi phân cực được làm rõ thông qua việc phân tích phân bố điện trường và dòng điện trên bề mặt ở các lớp kim loại. Kết quả khảo sát cho thấy tại một tần số xác định, điện trường được tích lũy ở một số vùng cụ thể của cấu trúc. Ngoài ra, khảo sát phân bố dòng điện bề mặt tại bốn tần số cộng hưởng cho thấy, các tần số cộng hưởng 1,74 THz, 3,13 THz được tạo bởi hiện tượng cộng hưởng từ, các tần số 5,1 THz và 5,7 THz được tạo bởi hiện tượng cộng hưởng điện. Những cộng hưởng này đóng vai trò quyết định trong việc đạt được hiệu suất chuyển đổi phân cực cao trong dải tần số rộng.

Ngoài ra, cấu trúc duy trì hiệu suất lớn hơn 93% khi góc tới thay đổi từ 0° đến 10° trong dải tần từ 1,6 THz đến 5,8 THz và duy trì lớn hơn 80% khi góc tới thay đổi từ 0° đến 30° .

3.3. Kết luận chương

Chương 3 đã thiết kế một MA tích hợp vật liệu chuyển pha VO_2 hoạt động vùng tần số THz với cấu trúc đơn giản và khả năng chuyển mạch chức năng phản xạ và hấp thụ thông qua việc điều khiển VO_2 chuyển từ pha điện môi sang kim loại. Khi VO_2 ở pha kim loại, MA có độ hấp thụ lớn hơn 90% trong băng thông rộng từ 1,29 - 3,26 THz. Ngoài ra, MA cho thấy khả năng điều chỉnh được độ hấp thụ khi thay đổi độ dẫn của VO_2 ,

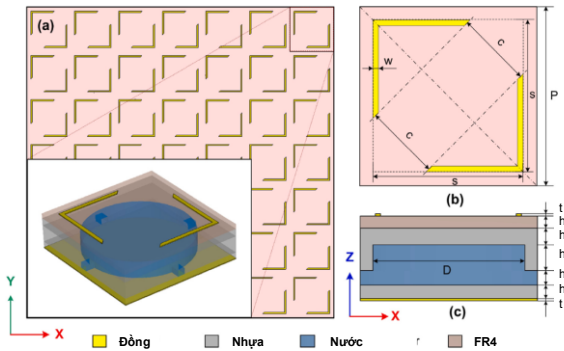
Tiếp theo, luận án trình bày thiết kế MPC cho các ứng dụng hoạt động trong các băng tần S, C, X, Ku và THz. Các thiết kế đều có hiệu suất cao trên 90% trong dải tần rộng. Ngoài ra, MPC hoạt động băng tần S, C và MPC hoạt động băng tần C, X, Ku được lựa chọn chế tạo thử nghiệm. Kết quả thực nghiệm cho thấy mẫu chế tạo tương đồng tốt với kết quả mô phỏng, chứng tỏ phương pháp nghiên cứu bằng mô phỏng hoàn toàn đáng tin cậy.

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

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

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

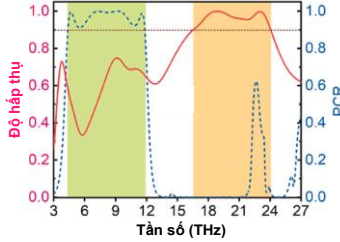
Một cấu trúc MFM tích hợp nước có khả năng chuyển mạch thực hiện ở chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số GHz được đề xuất.



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

Khi không có nước, MFM thực hiện chức năng chuyển đổi phân cực chéo với PCR đạt trên 90% trong băng tần rộng từ 4,38 – 11,9 GHz và tỉ số

băng thông RBW đạt tới 92,4%. Khi được tích hợp nước, MFM thực hiện chức năng hấp thụ với độ hấp thụ cao hơn 90% trong vùng tần số 16,4 - 24 GHz, tỉ số băng thông RBW đạt 38%.



Hình 4.4. Hiệu suất hấp thụ (đường nét liền) và chuyển đổi phân cực (đường nét đứt) tương ứng với khi MFM có tích hợp nước và không tích hợp nước

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

Khi MFM được tích hợp nước, trong dải tần số quan sát từ 3 - 27 GHz có 4 đỉnh hấp thụ tại các tần số 3,8 GHz, 9 GHz, 18,82 GHz và 23,15 GHz tương ứng với độ hấp thụ lần lượt là 73%, 75%, 70%, 100% và 100%.

Để giải thích cơ chế hấp thụ của vật liệu, trở kháng hiệu dụng $Z(\omega)$ của MFM được tính toán dựa trên lý thuyết giao thoa môi trường hiệu dụng.

Kết quả tính toán cho trở kháng vào $Z(\omega)$ cho thấy phần thực và phần ảo của $Z(\omega)$ gần với 1 và 0 trong dải tần từ 16,5 – 24 GHz. Điều này khẳng định rằng đã có sự phối hợp trở kháng tốt giữa cấu trúc MFM đề xuất và môi trường truyền trong băng tần rộng.

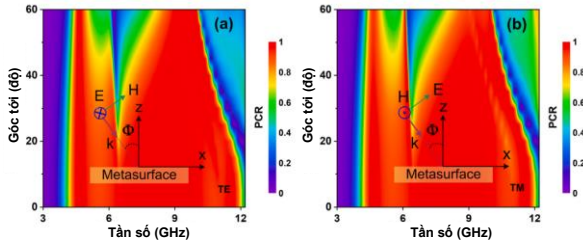
Mật độ tổn thất công suất của sóng tới tại hai tần số là 18,8 GHz và 23 GHz cho thấy, ở tần số 18,8 GHz, tổn thất công suất xảy ra ở cả bề mặt trên và dưới của lớp nước hình trụ. Tại tần số 23 GHz, tổn thất công suất chủ yếu xảy ra tại giao diện giữa bề mặt trên của lớp nước và bình chứa nước.

Kết quả khảo sát ảnh hưởng của góc tới đến hiệu suất hấp thụ của cấu trúc cho thấy, cấu trúc đề xuất đạt hiệu suất hấp thụ trên 80% ở cả hai chế độ TE và TM khi góc tới tăng đến 35°. Hơn nữa, cấu trúc đề xuất có thể hoạt động ổn định dưới các góc phân cực khác nhau.

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

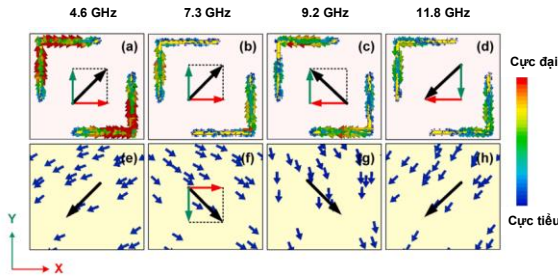
Hiệu suất chuyển đổi năng lượng ECR có giá trị thấp hơn giá trị của PCR, nhưng ECR vẫn đạt trên 80% trong dải tần từ 4,3 - 10 GHz. Điều này đã chứng tỏ rằng sóng tới được hấp thụ một phần trong cấu trúc MFM.

Khi sóng điện từ chiếu tới với các góc từ 0 - 60° cho thấy bằng thông hoạt động của MFM đề xuất bị thu hẹp lại ở cả hai chế độ TE và TM. Tuy nhiên cấu trúc MFM vẫn có khả năng duy trì hiệu suất chuyển đổi phân cực trên 80% trong hai dải tần: từ 4,38 GHz đến 6,3 GHz và từ 6,7 GHz đến 11 GHz, khi góc tới lên đến 40°.



Hình 4.10. Sự phụ thuộc của PCR vào góc tới ở chế độ (a) TE và (b) TM

Ngoài ra, r_{uv} và r_{vu} , gần như bằng 0 từ 4,38 – 11,9 GHz. Độ lệch pha $\Delta\varphi$ giữa r_{uu} và r_{vv} nằm trong khoảng $180^\circ - 35^\circ \leq \Delta\varphi \leq 180^\circ + 35^\circ$ trong vùng tần số từ 4,38 đến 11,9 GHz. Kết quả này chứng tỏ MFM thể hiện chuyển đổi phân cực chéo tuyến tính trong dải tần số rộng.



Hình 4.12. Phân bố dòng điện bề mặt ở lớp kim loại trên cùng (a - d) và lớp kim loại dưới cùng (e - h) của MFM đề xuất tại các tần số cộng hưởng

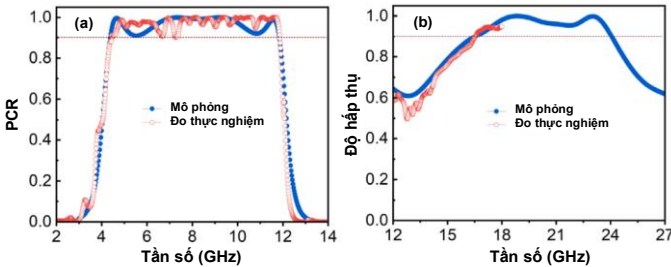
Để hiểu rõ hơn về cơ chế vật lý của quá trình chuyển đổi phân cực, chúng tôi khảo sát và phân tích phân bố dòng điện bề mặt tại bốn tần số cộng hưởng 4,6 GHz, 7,3 GHz, 9,2 GHz và 11,8 GHz như được trình bày trên Hình 4.12.

Kết quả quan sát được trên Hình 4.12 cho thấy, hai tần số cộng hưởng 4,6 GHz và 9,2 GHz được tạo ra bởi cộng hưởng từ. Ngược lại, tần số cộng hưởng 11,8 GHz được tạo do cộng hưởng điện và tần số cộng hưởng 7,3 GHz được tạo ra bởi cộng hưởng từ kết hợp với cộng hưởng điện.

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

MFM tích hợp nước không bị ảnh hưởng đáng kể bởi sự thay đổi lớn độ tổn thất và hằng số điện môi của vật liệu nhựa. Ngoài ra, phổ hấp thụ và chuyển đổi phân cực đều được dịch chuyển về vùng tần số thấp hơn khi tăng kích thước P theo tỉ lệ từ 0,6 đến 1,4 trong khi RBW gần như không thay đổi. Kết quả khảo sát này cho thấy khả năng kiểm soát tần số hoạt động bằng cách thay đổi kích thước của cấu trúc.

Kết quả khảo sát, đo đạc các đặc trưng của mẫu chế tạo bằng thực nghiệm được so sánh với kết quả mô phỏng cho thấy có sự tương đồng tốt giữa mô phỏng và thực nghiệm.



Hình 4.15. Kết quả mô phỏng và đo đạc (a) hiệu suất chuyển đổi phân cực và (b) hiệu suất hấp thụ

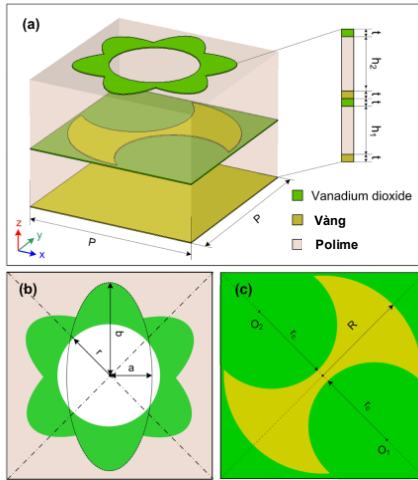
Cuối cùng, chúng tôi so sánh kết quả nghiên cứu với các báo cáo được công bố gần đây cho thấy cấu trúc đề xuất có thể hoạt động trong băng tần

rộng với chức năng kép, bao gồm cả khả năng hấp thụ và chuyển đổi phân cực. So với các cấu trúc MFM tương tự được so sánh, MFM đề xuất có dải tần làm việc hẹp hơn ở chế độ hấp thụ, nhưng lại cao hơn ở chế độ chuyển đổi phân cực.

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

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

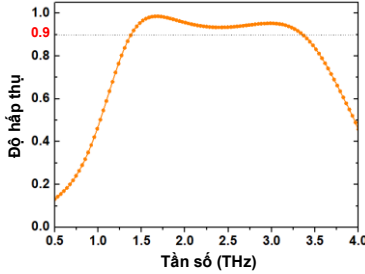
Dựa trên kết quả nghiên cứu về MMs tích hợp vật liệu chuyển pha VO_2 đã được trình bày ở Chương 3, chúng tôi thiết kế và tối ưu cấu trúc MFM hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ tích hợp VO_2 hoạt động trong dải tần THz. Kết quả mô phỏng cho thấy cấu trúc MFM được thiết kế có khả năng chuyển đổi chức năng từ hấp thụ băng thông rộng sang chuyển đổi phân cực chéo băng thông rộng trên cùng một dải tần, thông qua việc điều chỉnh trạng thái của vật liệu VO_2 từ chất cách điện sang kim loại.



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

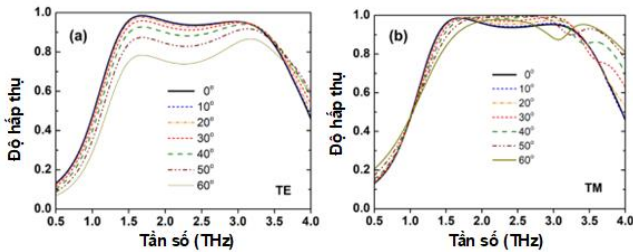
4.2.2. Khảo sát tính chất hấp thụ của MFM tích hợp VO₂

Khi VO₂ ở trạng thái hoàn toàn là kim loại với $\sigma = 2 \times 10^5$ S/m, lớp VO₂ ngăn chặn sự truyền ánh sáng do đó đạt được sự hấp thụ hoàn toàn như trong Hình 4.17. Có thể thấy cấu trúc thể hiện đáp ứng hấp thụ băng thông rộng với hiệu suất cao hơn 90% trong khoảng tần số 1,36 – 3,38 THz.



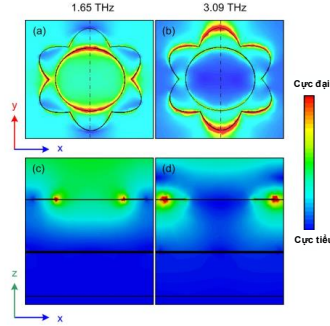
Hình 4.17. Hiệu suất hấp thụ của MFM đề xuất

Cấu trúc MFM đề xuất thể hiện hiệu suất hấp thụ cao trong một dải góc tới rộng lên tới 50° đối với cả hai phân cực sóng điện từ TE và TM. Trong phân cực TE, độ hấp thụ giảm dần khi góc tới tăng, nhưng vẫn duy trì ở mức cao hơn 80% với góc tới lên tới 50°. Với phân cực TM, độ hấp thụ tăng khi góc tới tăng và phổ hấp thụ được mở rộng sang tần số cao hơn khi góc tới vượt quá 30°.



Hình 4.18. Sự phụ thuộc của độ hấp thụ vào góc tới

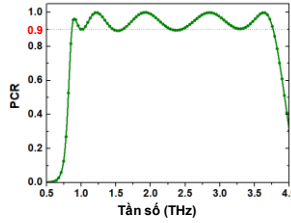
Cơ chế hình thành các đỉnh hấp thụ được nghiên cứu thông qua khảo sát sự phân bố của điện trường ở hai tần số cộng hưởng trong điều kiện chiếu sáng vuông góc. Kết quả thể hiện như trên Hình 4.22.



Hình 4.22. Phân bố điện trường trong ô cơ sở

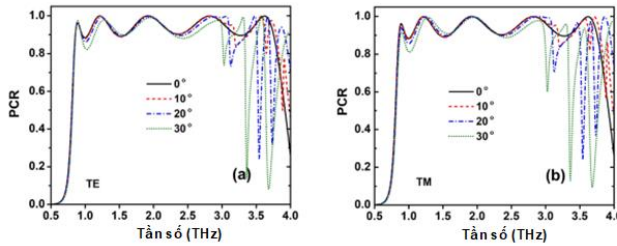
4.2.3. Khảo sát tính chất chuyển đổi phân cực sóng điện từ của MFM tích hợp VO₂

Khi VO₂ ở trạng thái pha điện môi với $\sigma = 200$ S/m, MFM đạt PCR trên 90% trong một dải tần số rộng từ 1.04 đến 3.75 THz, với RBW đạt 113%.



Hình 4.22. Hiệu suất hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực

Cấu trúc được thiết kế cho thấy hiệu suất chuyển đổi ổn định với góc tới lớn từ 0 đến 50° đối với cả hai phân cực TE và TM.



Hình 4.25. Sự phụ thuộc của PCR vào góc tới của MFM được đề xuất cho chế độ chuyển đổi phân cực: (a, c) chế độ TE và (b, d) chế độ TM

Sự phân bố dòng điện bề mặt lớp kim loại vàng phía trên và lớp kim loại vàng phía dưới ở năm tần số cộng hưởng được khảo sát. Ở các tần số cộng hưởng 1,91 THz, 2,83 THz và 3,63 THz, cộng hưởng từ mạnh góp phần tạo ra các tần số cộng hưởng này. Trong khi đó, ở tần số 0,89 GHz chủ yếu là kết quả của cộng hưởng điện. Tuy nhiên, ở tần số cộng hưởng 1,22 THz là sự kết hợp giữa cộng hưởng từ và cộng hưởng điện.

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

Để tối ưu hóa thiết kế và đạt được hiệu suất hấp thụ và hiệu suất chuyển đổi phân cực cao nhất, các thông số của cấu trúc đề xuất đã được khảo sát.

Ngoài ra, Phổ hấp thụ không bị thay đổi khi loại bỏ lớp vàng, chứng tỏ rằng tấm kim loại VO_2 có thể chặn sóng điện từ. Ngược lại, lớp nền vàng đóng một vai trò quan trọng trong việc ngăn chặn sự truyền sóng điện từ giúp cải thiện sóng phản xạ khi MMs hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực.

Cuối cùng, chúng tôi so sánh MFM đề xuất với các công bố khác gần đây cho thấy, cấu trúc đề xuất có thể cung cấp một cách tiếp cận mới để thiết kế hiệu suất cao và cho phép các chức năng siêu bề mặt cho các ứng dụng trong vùng tần số THz.

4.3. Kết luận chương

Bằng phương pháp mô phỏng, Luận án đã xây dựng mô hình và nghiên cứu tính chất hấp thụ, tính chất chuyển đổi phân cực của MFM tích hợp nước hoạt động trong vùng tần số GHz và MFM tích hợp VO_2 hoạt động vùng tần số THz. Các cấu trúc MFM đề xuất có hiệu suất hoạt động cao ở cả hai chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực, dải tần làm việc rộng, ít phụ thuộc vào góc tới và góc phân cực.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

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

Các kết quả chính của luận án bao gồm:

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

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

của mẫu cho thấy kết quả tương đồng giữa mô phỏng và thực nghiệm.

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

4. Đã thiết kế và khảo sát tính chất của cấu trúc MFM tích hợp vật liệu chuyển pha VO₂ có khả năng chuyển đổi giữa chế độ hấp thụ và chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động vùng tần số THz. Khi VO₂ ở pha kim loại, cấu trúc MFM đề xuất hoạt động ở chế độ hấp thụ với độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần 1,36 – 3,38 THz, tỉ số băng thông đạt 85%. Khi VO₂ ở pha điện môi, cấu trúc MFM đề xuất hoạt động ở chế độ chuyển đổi phân cực chéo với hiệu suất chuyển đổi phân cực đạt trên 90% trong dải tần rộng 1,04 - 3,75 THz, tỉ số băng thông đạt 113%.

2. Kiến nghị

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

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

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN

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