

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 KIM THU**

**NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỬ  
BẰNG RỘNG SỬ DỤNG VẬT LIỆU BIẾN HÓA TÍCH HỢP  
PHẦN TỬ TỖN HAO**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ  
NGÀNH KHOA HỌC VẬT LIỆU**

**Mã số: 9 44 01 23**

**Hà Nội – Năm 2024**

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 Lãm

Phản biện 1: GS. TS. Lê Anh Tuấn

Phản biện 2: PGS. TS. Trịnh Xuân Hoàng

Phản biện 3: PGS. TS. Nguyễn Thanh Bình

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 9 giờ 00, thứ 6 ngày 22 tháng 3 năm 2024.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

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

## MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết của luận án

Năm 2008, Landy và cộng sự đã phát triển mô hình vật liệu có thể hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ (MPAs: Metamaterials Perfect Absorbers) dựa trên vật liệu biến hóa với kích thước mỏng, dễ chế tạo, giá thành thấp, và dễ dàng điều khiển tính chất hấp thụ thông qua các tham số cấu trúc [6]. Từ đó, MPA đã nhanh chóng được triển khai cả về lý thuyết và thực nghiệm từ vùng tần số MHz tới vùng quang học [7] [8] với nhiều tiềm năng ứng dụng.

Bất kịp xu thế chung của thế giới, lĩnh vực nghiên cứu MMs nói chung tại Việt Nam được triển khai đầu tiên tại Viện Khoa học Vật liệu thuộc Viện Hàn lâm KHCN VN. Gần đây, hướng nghiên cứu này mở rộng đến Trường Đại học Sư phạm Hà Nội; Trường Đại học Vinh; Trường Đại học Khoa học Thái Nguyên; Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội; Đại học Mỏ địa chất; Đại học VinUni. Về MPA, các nghiên cứu đều nhằm mục tiêu đạt được độ hấp thụ cao với sự tối ưu về cấu trúc, hấp thụ được trên nhiều dải tần, ít nhạy với sự thay đổi của góc tới và góc phân cực [9]. Ngoài ra, MPAs còn được mở rộng nghiên cứu với những vật liệu có tính năng đàn hồi [10] và khả năng hấp thụ đẳng hướng hai chiều [11] nhằm nâng cao hơn nữa khả năng ứng dụng thực tế của MPAs. Tuy nhiên, do bản chất hoạt động của vật liệu biến hóa phụ thuộc vào cấu trúc cộng hưởng nên dải tần của bộ hấp thụ khá hẹp, trong khi tính chất băng rộng được yêu cầu trong nhiều ứng dụng khác nhau, trong cả dân sự và quân sự, chẳng hạn như quang điện (PV), phát hiện quang, công nghệ tàng hình [12]. Một số các phương pháp mở rộng băng thông hấp thụ của MPAs được đề xuất bao gồm: cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương ngang [13] hoặc cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương dọc [14] theo sự phân cực của sóng tới, cấu trúc sử dụng các thành phần tổn hao [15], cấu trúc plasmonic nanocomposites [16], cấu trúc cộng hưởng điện môi [17], hoặc sử dụng vật liệu thay đổi pha [18].

Các kết quả nghiên cứu về MPA trong nước có thể kể đến như: TS. Đỗ

Thành Việt bảo vệ thành công luận án với đề tài nghiên cứu MPAs hấp thụ dải hẹp với cấu trúc hình chữ I và vòng tròn rỗng; và MPA hấp thụ dải rộng với cấu trúc 2 thanh kim loại so le và sắp xếp các cộng hưởng dạng đĩa tròn có bán kính khác nhau theo phương ngang. Các thiết kế đề xuất đều hoạt động ở vùng tần số GHz (Năm 2015) [19]. Năm 2018, TS. Đặng Hồng Lưu trình bày luận án kết hợp lý thuyết và mô phỏng để thiết kế MPAs đa đỉnh hoạt động ở vùng tần số THz [20]. Năm 2020, TS. Đinh Hồng Tiệp đã trình bày các kết quả chính của luận án nghiên cứu chế tạo MPAs dải rộng (BMPA: Broadband Metamaterial Absorber) hoạt động bằng cách tích hợp một phần hoặc hoàn toàn polymer có độ dẫn thấp vào cấu trúc cộng hưởng kim loại [21]. Tuy nhiên, các nghiên cứu chỉ mới thực hiện ở vùng tần số GHz. Năm 2022, TS. Trần Văn Huỳnh đề xuất và chứng minh khả năng điều khiển tính chất hấp thụ đẳng hướng hai chiều của MPA tích hợp graphene hoạt động ở vùng tần số THz theo cơ chế kết hợp cộng hưởng điện và cộng hưởng từ hoặc lai hóa các cộng hưởng từ. Cho đến nay, các nghiên cứu trong nước về MPA băng rộng mới chỉ thực hiện ở tần số GHz, trong khi ở vùng tần số THz chỉ có nghiên cứu MPA băng hẹp hoặc đa đỉnh. Như vậy, phương pháp mở rộng băng thông hấp thụ của MPA ở cả vùng tần số GHz và THz hiện đang là một chủ đề nghiên cứu hấp dẫn nhằm hướng đến ứng dụng che chắn cũng như hấp thụ và chuyển hóa năng lượng sóng điện từ. Vì vậy, nghiên cứu sinh đã lựa chọn đề tài “Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ băng rộng sử dụng vật liệu biến hóa tích hợp phân tử tổn hao” với cách tiếp cận hoàn toàn khác với các luận án đã được thực hiện trước đây. Cụ thể, luận án thiết kế và chế tạo các BMPA tích hợp điện trở nhằm tăng trở kháng của bề mặt cộng hưởng, hoạt động ở vùng tần số GHz. Bên cạnh đó, luận án đề xuất các thiết kế mô phỏng các cấu trúc BMPA tích hợp nước nhằm tăng tổn hao lớp điện môi, hoạt động ở cả vùng tần số GHz và THz. Các thiết kế đề xuất có cấu trúc đơn giản, mỏng nhẹ và dễ chế tạo; có độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số rộng, ít nhạy với góc tới và góc phân cực.

## 2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

Bổ sung cơ sở lý thuyết về MPA nói chung và BMPA nói riêng. Trong đó, tập trung giải quyết các vấn đề mở rộng băng thông hấp thụ của MPA.

Thiết kế và tối ưu các cấu trúc BMPA tích hợp điện trở hoạt động ở vùng tần số GHz, và BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz và THz thông qua mô phỏng.

Làm chủ quy trình, công nghệ chế tạo và đo kiểm tính chất của các BMPA hoạt động ở vùng tần số GHz

## 3. Các nội dung nghiên cứu chính của luận án

Xây dựng mô hình vật lý và khảo sát ảnh hưởng của các tham số cấu trúc, vật liệu đến tính chất của BMPA tích hợp các điện trở và tích hợp nước ở vùng tần số GHz và THz.

Tích hợp các phần tử điện trở với các BMPA hoạt động ở băng C, X và Ku. Từ đó, xây dựng quy trình chế tạo và kiểm chứng thực nghiệm đặc trưng hấp thụ của một số BMPA hoạt động ở vùng tần số GHz.

# CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

## 1.1. Tổng quan về vật liệu biến hóa

### 1.1.1. Giới thiệu chung

Vật liệu biến hóa (*MMs: Metamaterials*) cấu thành từ các “giả nguyên tử” là các cấu trúc cộng hưởng điện - từ có kích thước nhỏ hơn nhiều lần bước sóng hoạt động [30]. Khi sóng điện từ chiếu đến vật liệu sẽ tương tác với các thành phần vi mô cấu thành, tạo ra mômen cảm ứng điện từ và trực tiếp ảnh hưởng đến độ điện thẩm và độ từ thẩm ở cấp độ vĩ mô của MM. Vì vậy, có thể điều khiển tính chất điện từ của MM bằng cách thay đổi các tham số của thành phần cấu thành vật liệu dẫn tới một số hiệu ứng như đảo nghịch định luật Snell, dịch chuyển Doppler ngược.... Trong hơn hai thập kỷ qua, MMs thực sự đóng vai trò quan trọng trong các lĩnh vực hàng không vũ trụ, ô tô, chống địa chấn, quốc phòng, điện tử... và thu hút được nhiều sự quan tâm nghiên cứu của các nhà khoa học.

## **1.2. Phân loại vật liệu MPAs**

### **1.2.1. MPA có cấu trúc bất đẳng hướng**

Ô cơ sở của MPA bất đẳng hướng thường có ba lớp kim loại - điện môi - kim loại. Ý tưởng của MPA 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. Đối với hầu hết các MPA bất đẳng hướng, hấp thụ tuyệt đối dựa trên cộng hưởng từ có thể đạt tới độ hấp thụ gần tuyệt đối khi phần ảo của chiết suất được tăng cường tại tần số cộng hưởng [29].

### **1.2.2. MPA có cấu trúc đẳng hướng 2 chiều**

Nhược điểm của cấu trúc MPA bất đẳng hướng là chỉ hấp thụ tuyệt đối khi sóng truyền tới bề mặt MPA theo một chiều duy nhất, làm hạn chế khả năng ứng dụng của MPA trong thực tế. Vì vậy, tối ưu các cấu trúc MPA đẳng hướng là hướng nghiên cứu đang được triển khai cả về lý thuyết và thực nghiệm. Cơ chế hấp thụ của cấu trúc đẳng hướng là dựa vào sự “tương tác” của cộng hưởng điện và cộng hưởng từ hoặc sử dụng hiệu ứng lai hoá với sự “tương tác” của hai cộng hưởng từ [37,39].

## **1.3. Cơ chế hấp thụ của MPA**

### **1.3.1. Lý thuyết giao thoa**

Lý thuyết giao thoa là một trong các phương pháp tính toán độ hấp thụ của MA, dựa trên hiệu ứng giao thoa triệt tiêu giữa các thành phần sóng tới và phản xạ bởi vật liệu.

### **1.3.2. Nguyên lý phối hợp trở kháng và cộng hưởng**

Thông thường, phối hợp trở kháng xuất hiện tại một hoặc một số tần số đặc trưng mà tại đó  $\varepsilon = \mu$ . Vì vậy, có thể điều khiển thành phần điện thẩm hoặc từ thẩm thông qua việc khảo sát hình dạng và kích thước cấu trúc nhằm đạt tới sự cân bằng [29]. Lúc đó, độ phản xạ  $R = 0$  và sóng điện từ hoàn toàn đi qua được mặt giới hạn giữa không khí (chân không) với môi trường vật liệu và độ hấp thụ tuyệt đối đạt được xung quanh tần số cộng hưởng điện - từ.

### **1.3.3. Cơ chế chồng chập cộng hưởng điện và cộng hưởng từ**

Khi tương tác với sóng điện từ, cộng hưởng từ và cộng hưởng điện có thể xảy ra ở các tần số khác nhau trong cấu trúc MMs. Các tần số cộng hưởng phụ thuộc và thông số hình học của cấu trúc, nên có thể điều chỉnh từng tần số để chúng chồng chập với nhau. Khi xảy ra chồng chập cộng hưởng thì độ hấp thụ được tăng cường. Cơ chế này được phân tích trong một số nghiên cứu gần đây áp dụng với cấu trúc MPA đẳng hướng [39], [41]–[43].

### **1.3.4. Cơ chế lai hóa cộng hưởng từ**

MPA dựa trên cộng hưởng điện có độ hấp thụ phụ thuộc khá lớn vào góc sóng tới. Vì vậy, cơ chế lai hoá sử dụng hai cộng hưởng từ được đề xuất thay thế [37].

## **1.4. Các hướng nghiên cứu hiện nay về MPA**

Trong phạm vi nghiên cứu của luận án này, chúng tôi chỉ tập trung thiết kế cấu trúc MPA băng rộng có cấu trúc bất đẳng hướng.

### **1.4.1. Tối ưu hóa cấu trúc và nâng cao đặc tính hấp thụ**

Một trong những xu hướng nghiên cứu quan trọng của MPA là việc đơn giản hóa cấu trúc cộng hưởng để dễ dàng chế tạo mà vẫn đạt được tính chất hấp thụ phù hợp với ứng dụng cụ thể.

### **1.4.2. Tiểu hình hóa cấu trúc**

Các nhà nghiên cứu đã đề xuất một vài phương pháp khác nhau để tăng chiều dài điện hiệu dụng so sánh với bước sóng làm việc. Do đó, tần số cộng hưởng tại tần số thấp hơn có thể được kích thích.

### **1.4.3. Hoạt động của cấu trúc ở vùng tần số khác nhau**

Cùng với việc tối ưu hóa cấu trúc, các nghiên cứu về MPA cũng được thực hiện ở các vùng tần số khác nhau từ tần số vi ba [46], tới tần số cao [47] cho tới dải hồng ngoại, hay quang học [48].

### **1.4.4. Tối ưu phổ hấp thụ không phụ thuộc góc phân cực sóng và góc tới của sóng điện từ**

Các bộ hấp thụ sóng điện từ sử dụng cấu trúc đối xứng, nên tính chất

hấp thụ thường không phụ thuộc vào góc phân cực. Tuy nhiên, sóng điện từ chiếu tới bề mặt với các góc tới khác nhau thường khiến cho các cấu trúc MPAs khó duy trì được điều kiện phối hợp trở kháng dẫn tới độ hấp thụ giảm. Do vậy, yêu cầu thiết kế các MPA không nhạy với sự thay đổi góc tới và góc phân cực.

#### **1.4.5. Mở rộng băng thông hấp thụ**

Trong nhiều ứng dụng thực tế, đòi hỏi MPAs hấp thụ với dải tần rộng. Do đó, hướng nghiên cứu về bộ hấp thụ sóng điện từ băng rộng thu hút nhiều hơn sự quan tâm nghiên cứu.

### **1.5. MPA băng rộng**

Bằng cách tích hợp một số thành phần hoạt tính (hoặc vật liệu) vào các kết cấu của MPA, tính chất hấp thụ của BMPA có thể được điều khiển nhờ tác động bên ngoài như nhiệt độ [58][59], điện trường [60], từ trường [61], và điện áp phân cực [62].

#### **1.5.1. Cơ chế hình thành hấp thụ băng rộng của MPA**

Sự hình thành cơ chế hấp thụ băng rộng của MPA bao gồm: xếp chồng các đỉnh cộng hưởng, giảm hệ số chất lượng  $Q$ , điều chỉnh tầng điện môi, điều chỉnh vật liệu cộng hưởng [52].

#### **1.5.2. Một số ứng dụng của BMPA**

BMPA đã được nghiên cứu hơn 15 năm qua với ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như hấp thụ năng lượng mặt trời, tách sóng quang, điều chỉnh các cộng hưởng cơ học....

### **1.6. Kết luận chương**

Chương 1 tập trung vào lịch sử phát triển MPA, phân loại MPA, và các hướng nghiên cứu hiện nay về MPA. Ngoài ra, chương 1 cũng nhấn mạnh các cơ chế hình thành hấp thụ băng rộng của BMPA và một số các ứng dụng nổi bật của BMPA.



## CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Luận án được thực hiện kết hợp giữa nghiên cứu tính toán bán lý thuyết, mô hình hóa bằng mô phỏng và chế tạo thực nghiệm. Các phương pháp được cộng đồng quốc tế sử dụng rộng rãi, được nhóm nghiên cứu tại Viện Khoa học Vật liệu, Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt nam kế thừa và phát triển.

### 2.1. Các phương pháp nghiên cứu MPA

#### 2.1.1. Phương pháp tính toán lý thuyết

Theo lý thuyết môi trường hiệu dụng, việc thay đổi tính chất vật lý của cấu trúc và thành phần vật liệu sẽ dẫn đến những biến đổi cơ bản tính chất của vật liệu MMs. Sóng điện từ có thể lan truyền trong môi trường vật liệu có chiết suất âm kép với véc tơ sóng  $k$  ngược chiều với véc tơ dòng năng lượng nên việc tính toán trước tiên nhằm xác định cấu trúc đề xuất đã đạt được đồng thời độ từ thâm âm và độ điện thâm âm. Tuy nhiên, việc đo đạc trực tiếp hay mô phỏng các thông số này gặp nhiều trở ngại. Chen và cộng sự [93] giới thiệu cách tính hàm phản xạ và truyền qua dựa trên chiết suất  $n$  và trở kháng chuẩn hóa  $Z$ . Từ đó, tính chất điện từ của MPAs cơ bản được xác định.

#### 2.1.2. Mô hình mạch 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. Hầu hết các cấu trúc MPAs sử dụng kim loại quý như đồng ( $Cu$ ), bạc ( $Ag$ ) và vàng ( $Au$ ) nên phần tử điện trở nhỏ không đáng kể và có thể bỏ qua. Các giá trị điện cảm  $L$  và điện dung  $C$  phụ thuộc vào các tham số hình học của cấu trúc và tính chất điện từ của các vật liệu. Dựa vào mô hình mạch điện LC tương đương có thể xác định được gần như chính xác tần số cộng hưởng của MPAs [62].

#### 2.1.3. Phương pháp mô phỏng

Phần mềm CST Microwave Studio được sử dụng để mô phỏng tính chất điện từ của các mẫu MPAs. Trong CST, có thể sử dụng phương pháp giải trên miền thời gian (T) hoặc miền tần số (F). Phương pháp miền tần số (F) thích hợp hơn với các cấu trúc có tính chất tuần hoàn như MPA hay vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ.

#### **2.1.4. Phương pháp thực nghiệm**

Quang khắc bằng ánh sáng được sử dụng trong ngành khoa học và công nghệ vật liệu để chế tạo các chi tiết vật liệu nhỏ, chế tạo các linh kiện vi cơ điện tử (MEMS). Hạn chế của quang khắc là do ánh sáng bị nhiễu xạ nên không thể hội tụ chùm sáng xuống kích cỡ nhỏ, vì thế nên không thể chế tạo các chi tiết có kích thước nano.

### **2.2. Quy trình chế tạo MPA hoạt động ở vùng tần số GHz**

Quy trình chế tạo thực tế có thể tóm tắt trong bốn bước chính sau đây:

Bước 1: *Chiếu sáng*

Bước 2: *Hiện hình cấu trúc*

Bước 3: *Ăn mòn và tạo cấu trúc*

Bước 4: *Tẩy rửa lớp cản quang bị biến đổi do quang hóa.*

### **2.3. Hệ đo**

Ở dải tần GHz, phép đo sử dụng hệ phân tích mạng véc tơ. Hệ mẫu được đặt trong buồng hấp thụ sóng GHz, hai ăng-ten dạng loa được sử dụng nhằm thu phát tín hiệu qua mẫu. Để đo thông số của mẫu MPA hoạt động ở dải tần GHz, sử dụng hệ phân tích mạng véc tơ số hiệu Rohde and Schwarz ZNB20.

### **2.4. Kết luận chương**

Chương 2 trình bày các phương pháp nghiên cứu MPAs bao gồm phương pháp tính toán bán lý thuyết, mô phỏng bằng phần mềm CST, mô hình mạch tương đương và chế tạo thực nghiệm. Các phương pháp nghiên cứu đều có độ chính xác và tin cậy, được sử dụng rộng rãi bởi cộng đồng các nhà nghiên cứu.

### CHƯƠNG 3

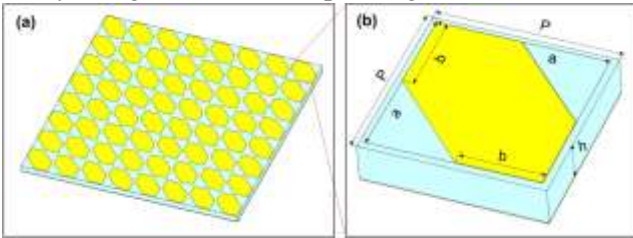
## THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO VẬT LIỆU BIẾN HÓA HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỬ BẰNG RỘNG Ở VÙNG TẦN SỐ GHz TÍCH HỢP CÁC PHẦN TỬ ĐIỆN TRỞ

Cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương ngang (2D) hoặc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương dọc (3D) được xác nhận có tính khả thi cao thông qua mô phỏng, nhưng gặp khá nhiều khó khăn khi chế tạo. MPA với cộng hưởng vòng hở kết nối bởi các phần tử điện trở tập trung tạo thành bề mặt trở kháng cao được chứng minh là phương pháp dễ dàng để mở rộng dải tần hấp thụ.

### 3.1. Cơ sở đề xuất thiết kế

Các cấu trúc MPA dạng đĩa tròn, vòng tròn, hình vuông... (đối xứng) có băng thông tương đối hẹp. Cường độ hấp thụ giảm dần và dải tần hấp thụ hẹp hơn khi góc tới tăng. Để hấp thụ đa dải tần có thể sử dụng nhiều hơn các CRRs có bán kính khác nhau hoặc kết hợp đĩa tròn và cấu trúc CRR.

Trong trường hợp biến đổi cấu trúc thành bất đối xứng như ví dụ trên hình 3.4 thiết kế có thể tối ưu hóa để trở thành vật liệu chuyển đổi phân cực sóng điện từ hay còn gọi là vật liệu hấp thụ nghèo.

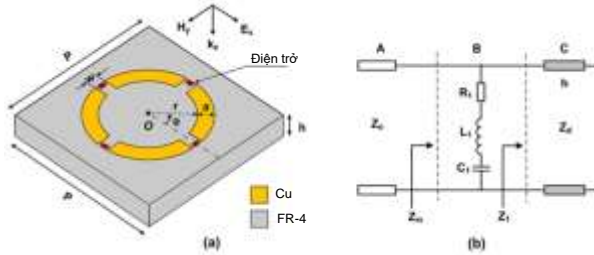


**Hình 3.4.** Cấu trúc của bộ chuyển đổi phân cực đề xuất (a) Mặt trên của ô cơ sở và (b) mô hình 3D của ô cơ sở [102].

### 3.2. Thiết kế BMPA tích hợp các phần tử điện trở cho ứng dụng băng X

Trong phần này chúng tôi đề xuất thiết kế đơn giản của BMPA với ô cơ sở gồm một vòng tròn hở được gắn bốn phần tử điện trở, cho các ứng dụng

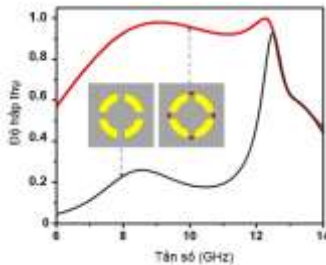
băng tần X (8-12 GHz).



**Hình 3.8.** Cấu trúc ô cơ sở (a) Hình ảnh 3D và (b) mô hình mạch tương đương [108].

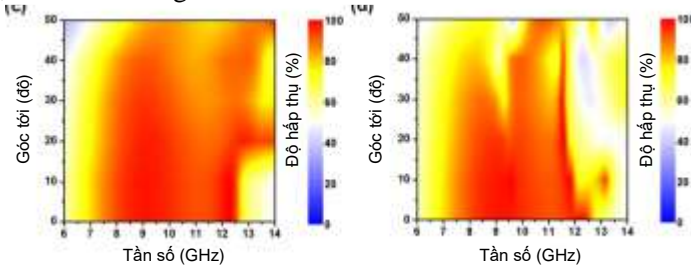
Hình 3.13 trình bày kết quả khảo sát trong trường hợp sử dụng điện trở và không sử dụng điện trở cho phân cực TE khi góc tới vuông góc bề mặt cấu trúc. Có thể thấy MPA không sử dụng phần tử điện trở chỉ có 2 đỉnh hấp thụ tại tần số 8.5 GHz và 12.5 GHz với độ hấp thụ tương ứng là 26.1% và 93.9%. Cấu trúc BMPA sử dụng 4 điện trở trong một ô cơ sở có độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số rộng từ 7.8 GHz đến 12.6 GHz.

Trong băng tần hoạt động, cần sự phối hợp trở kháng giữa BMPA và không gian tự do để đạt được độ hấp thụ gần tuyệt đối. Kết quả mô phỏng và tính toán trở kháng vào chuẩn hóa  $Z$  là tương đồng, cho thấy phần thực của trở kháng  $Z$  gần bằng 1 và phần ảo của trở kháng  $Z$  trong dải băng tần hoạt động.



**Hình 3.13.** Độ hấp thụ của MPA đề xuất trong trường hợp có và không có phần tử điện trở tập trung [108].

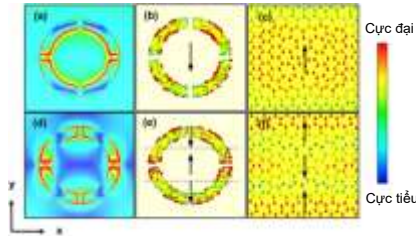
Kết quả được trình bày trên Hình 3.15 cho thấy phổ của BMPA phụ thuộc vào góc tới. Ngoài ra, BMPA đề xuất có đặc tính không nhạy với phân cực do đặc tính đối xứng của cấu trúc.



**Hình 3.15.** Phổ hấp thụ của BMPA với các góc tới khác nhau (a) và (c) cho phân cực TE và (b) và (d) cho phân cực TM [108].

Để hiểu rõ cơ chế hấp thụ, phân bố điện trường và dòng điện cảm ứng trên bề mặt của BMPA ở phân cực TE tại hai tần số cộng hưởng 9.1 GHz và 12.2 GHz trong mặt phẳng XOY dưới góc tới vuông góc được khảo sát.

Cuối cùng, độ hấp thụ của BMPA được đề xuất được so sánh với các BMPA được báo cáo khác dựa trên phần tử điện trở, cho thấy BMPA được đề xuất có cấu trúc đơn giản và mỏng nhẹ, với băng thông tương đối cao trên mỗi phần tử điện trở.

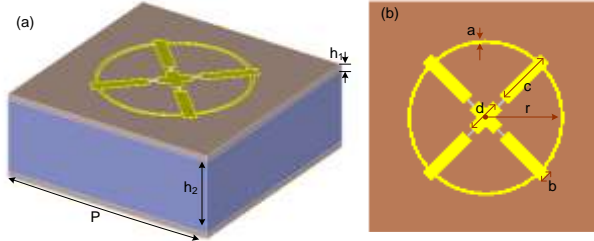


**Hình 3.17.** [Từ trái sang phải] Phân bố điện trường, dòng điện cảm ứng ở mặt trên và mặt dưới của BMPA tại các tần số cộng hưởng: (a)-(c) 9.1 GHz và (d)-(f) 12.2 GHz [108].

### 3.2. Thiết kế BMPA tích hợp các phần tử điện trở cho ứng dụng băng S và băng C, băng C và băng X

Từ thiết kế vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động

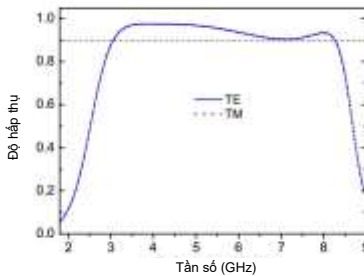
ở băng tần S và băng tần C [109], chúng tôi đề xuất điều chỉnh hình dạng bộ cộng hưởng thành hình bánh xe để thiết kế có tính đối xứng và có chức năng hấp thụ sóng điện từ. Để mở rộng dải tần hấp thụ, tích hợp thêm các điện trở tập trung như trên Hình 3.19 nhằm tăng trở kháng bề mặt và giảm hệ số Q.



**Hình 3.19.** Cấu trúc BPA đề xuất cho băng S và băng C.

Kết quả mô phỏng cho thấy, độ hấp thụ đạt trên 90% trong khoảng tần số từ 3 đến 9 GHz, bao phủ một phần băng tần S và hoàn toàn băng tần C như thể hiện trên Hình 3.21.

Ảnh hưởng của góc tới đến phổ hấp thụ của BPA cũng được khảo sát, cho thấy đối với phân cực TE, độ hấp thụ duy trì xấp xỉ 80% cho góc tới 40° trong khi đối với phân cực TM, phổ hấp thụ chia thành nhiều dải riêng biệt khi góc tới tăng.

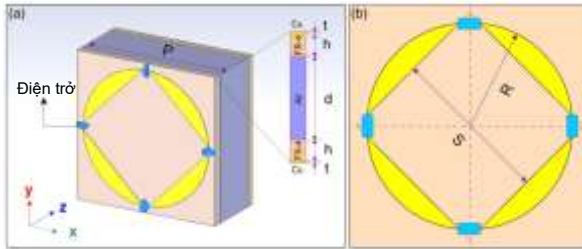


**Hình 3.21.** Độ hấp thụ của BPA.

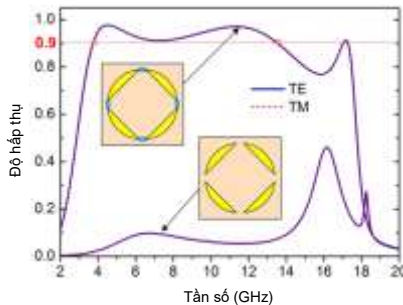
Cho ứng dụng băng C và băng X, chúng tôi tiếp tục đề xuất cấu trúc 2D với các phân tử điện trở, chèn thêm một lớp điện môi phụ trợ là không khí giữa hai lớp điện môi FR4, được mô tả trên Hình 3.25.

Cấu trúc BMPA khi loại bỏ các phần tử điện trở cho thấy độ hấp thụ rất thấp trong dải tần từ 2 đến 20 GHz. BMPA tích hợp các phần tử điện trở có hai đỉnh cộng hưởng phân biệt tại tần số 4.5 GHz và 11.4 GHz và bao phủ hoàn toàn băng tần C và băng tần X từ 4 đến 12 GHz.

Ngoài ra, chúng tôi cũng tiến hành mô phỏng với các góc tới khác nhau. Các kết quả nghiên cứu xác nhận rằng mức hấp thụ cao vẫn duy trì với góc tới rộng, là đặc tính hấp dẫn cho các ứng dụng BMPA. BMPA đề xuất có tính chất không nhạy với phân cực do đặc tính đối xứng của cấu trúc.



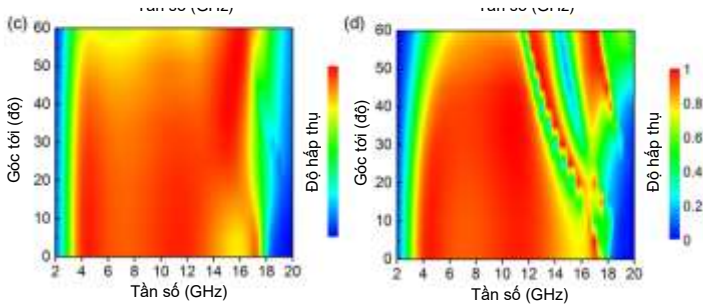
**Hình 3.25.** BMPA có các phần tử điện trở tập trung, với lớp không khí được chèn vào giữa hai lớp điện môi FR4 (a) mô hình 3D và (b) mặt trên của ô cơ sở [117]



**Hình 3.26.** Độ hấp thụ của MPA khi có và không có phần tử điện trở [117].

Phân bố điện trường tại các tần số cộng hưởng 4.5, 11.4 và 17.2 GHz được khảo sát. Dòng bề mặt ở tầng trên và tầng dưới của MPA là song song và ngược chiều tại tần số 4.5 GHz, chỉ ra rằng tần số cộng hưởng này xuất phát từ cộng hưởng từ. Ngược lại, tại tần số 11.4 GHz, dòng bề mặt ở hai

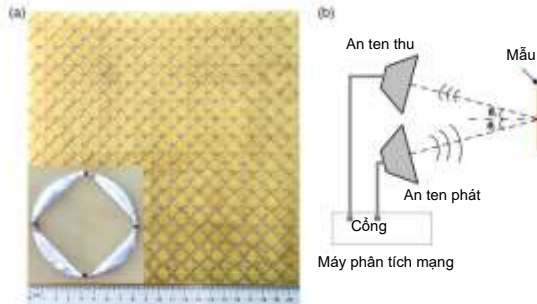
tầng này là song song cùng chiều, nên nó là cộng hưởng điện. Tại tần số 17.2 GHz, cộng hưởng gây ra bởi cộng hưởng từ bậc 3 [119].



**Hình 3.27.** Phổ hấp thụ của BMPA với các góc tới khác nhau, (a) và (c) cho phân cực TE và (b) và (d) cho phân cực TM [117].

Để đánh giá các kết quả mô phỏng, mẫu BMPA được chế tạo sử dụng phương pháp quang khắc. Các thông số cấu trúc mẫu được cố định theo thông số tối ưu của mô phỏng. Ảnh mẫu cho trên Hình 3.33 (a) và thiết lập phép đo hệ số phản xạ của mẫu được mô tả trên Hình 3.33 (b).

Một máy phân tích mạng số hiệu ZNB20 cùng với hai ăng-ten phân cực tuyến tính đóng vai trò như máy thu và máy phát được sử dụng để đo hệ số phản xạ. Khoảng cách từ ăng-ten tới mẫu được thiết lập 35 cm. Dải đo được thiết lập từ 2 đến 18 GHz.



**Hình 3.33.** (a) Mẫu chế tạo và (b) thiết lập đo hệ số phản xạ [117].

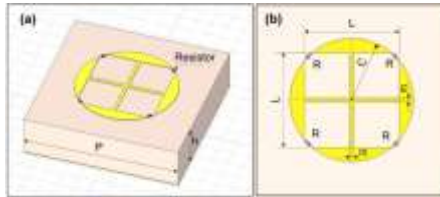
Các kết quả đo xác nhận rằng độ rộng băng thông với độ hấp thụ lớn hơn 88% của BMPA bao phủ hoàn toàn băng tần C và băng tần X cho cả phân cực TE và TM. Cường độ hấp thụ đo được thấp hơn mô phỏng do sự



không hoàn hảo trong chế tạo và sai số trong đo lường thực nghiệm. Mặc dù không phải là thiết kế có độ dày nhỏ nhất nhưng BMPA đề xuất đặc trưng bởi trọng lượng nhẹ, tỷ số  $RBW$  trên số phần tử điện trở là cao nhất, chứng tỏ nó là thiết kế có hiệu quả nhất.

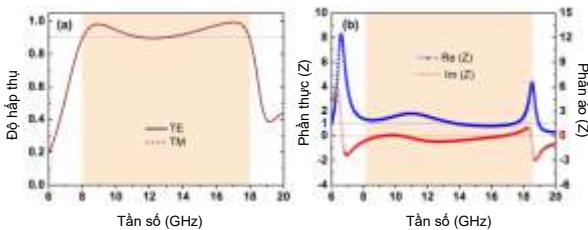
### 3.3. Thiết kế BMPA tích hợp phần tử điện trở cho ứng dụng băng X và băng Ku

Thiết kế đề xuất trong mục 3.1 cho ứng dụng băng X có băng thông tương đối chỉ đạt 47% và khá nhạy với góc tới [101]. Vì vậy, chúng tôi đề xuất một thiết kế của BMPA có cấu trúc bề mặt biến đổi, cho ứng dụng băng X và băng Ku với hệ số  $RBW$  cao và ít nhạy với góc tới [115]. Chúng tôi cũng thực hiện khảo sát ảnh hưởng của tham số cấu trúc tới độ hấp thụ của BMPA.



**Hình 3.35.** Cấu trúc BMPA (a) 3D và (b) mặt trên của ô cơ sở [122].

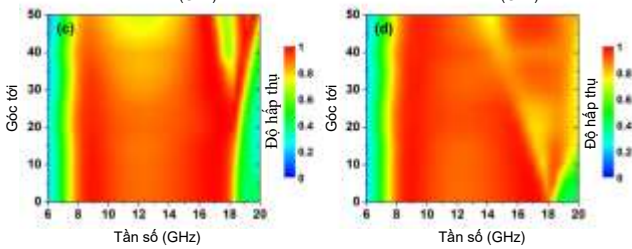
Hình 3.37 (a) cho thấy phổ hấp thụ của BMPA đề xuất đạt trên 90% trong dải tần số rộng từ 8-18 GHz bao phủ hoàn toàn băng X và băng Ku. Độ rộng băng thông tương đối là 76.92% chỉ ra rằng BMPA đạt được tính chất hấp thụ băng rộng trong dải tần số khảo sát. Cơ chế hấp thụ của BMPA có thể được giải thích bởi sự phối hợp trở kháng giữa cấu trúc BMPA và không gian tự do như mô tả trên Hình 3.37b.



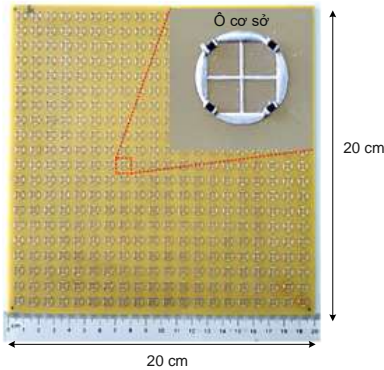
**Hình 3.37.** (a) Độ hấp thụ của BMPA và (b) trở kháng đầu vào chuẩn hóa [122].

Để giải thích cơ chế vật lý của cấu trúc, chúng tôi tiến hành mô phỏng phân bố dòng điện cảm ứng bề mặt của BMPA tại các tần số cộng hưởng 8.9 và 17.1 GHz trong mặt phẳng XOY nhằm xác định cộng hưởng điện hay cộng hưởng từ được tạo ra và góp phần vào cơ chế hấp thụ của BMPA.

Ngoài ra, sự phụ thuộc của độ hấp thụ vào góc sóng điện từ chiếu tới được khảo sát. Cho cả hai phân cực TE và TM, độ hấp thụ giảm khi góc tới tăng lên. Tuy nhiên, độ hấp thụ vẫn duy trì trên 70% trong toàn dải băng tần hoạt động khi góc tới tăng lên tới  $50^\circ$ . Điều này chứng tỏ BMPA có khả năng hấp thụ băng rộng với góc tới rộng.



**Hình 3.39.** Phổ hấp thụ của BMPA thay đổi theo góc tới (a)(c) cho phân cực TE và (b)(d) cho phân cực TM [122].



**Hình 3.41.** Mẫu BMPA chế tạo hoạt động ở băng tần X và Ku[122].

Để xác định hiệu suất thực tế, mẫu BMPA được chế tạo sử dụng kỹ thuật quang khắc truyền thống. Dữ liệu đo được thu thập trong dải tần từ 6-18 GHz. Có thể thấy rằng các kết quả đo có sự tương đồng tốt với các kết quả

mô phỏng. Độ hấp thụ duy trì trên 80% trong dải tần 8-18 GHz với góc tới  $40^\circ$  cho cả phân cực TE và TM. Điều này xác nhận rằng BMPA làm việc trong dải tần số rộng và ít nhạy với góc tới.

Cuối cùng, chúng tôi tiến hành so sánh cấu trúc BMPA đề xuất với các BMPA tích hợp phần tử điện trở được công bố trước đây. Kết quả cho thấy thiết kế đề xuất có cấu trúc đơn giản với độ dày thấp nhất, đặc tính hiệu suất tốt nhất thể hiện qua tỷ số RBW/số tầng là cao nhất.

### **3.4. Kết luận chương**

Chương 3 đã trình bày các kết quả mô phỏng, khảo sát các mô hình BMPA tích hợp phần tử điện trở hoạt động ở vùng tần số GHz. Một số mẫu BMPA được chế bằng phương pháp quang khắc, tại phòng thí nghiệm trọng điểm thuộc Viện Khoa học Vật liệu, Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Các kết quả đo và mô phỏng có sự tương đồng tốt. Các kết quả nghiên cứu được đăng tải 03 bài trên tạp chí ISI, trong “Danh mục các công trình công bố của luận án” là các công trình 1, 2 và 3.

## CHƯƠNG 4

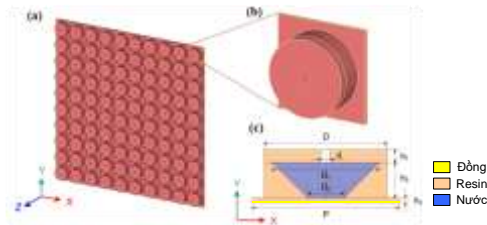
### THIẾT KẾ VẬT LIỆU BIẾN HÓA HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ BẰNG RỘNG TÍCH HỢP NƯỚC HOẠT ĐỘNG Ở VÙNG TẦN SỐ GHz VÀ THz

BMPA tích hợp vật liệu mới là nước, với điện môi phân tán trong khoảng tần số rộng, mở ra một cách thức đơn giản mà tiềm năng để đạt được hấp thụ băng rộng không nhạy với cả góc tới và góc phân cực. Phương pháp này được xem là mới hiện nay đối với các nghiên cứu sinh cùng lĩnh vực thiết kế BMPA. Vì vậy, trong chương này, nghiên cứu sinh đề xuất thiết kế BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz (5-38.5 GHz) và THz (0.6-10 THz) [133].

#### 4.1. Tính chất điện từ của nước

#### 4.2. Thiết kế BMPA tích hợp nước hoạt động ở tần số GHz

Nước là vật liệu có giá thành rẻ và có sẵn trong tự nhiên. Ngoài ra, nước có hằng số điện môi phân tán trong dải tần số rộng, nên tổn hao tương đối cao. Dựa vào những ưu điểm trên, nước được đề xuất trong thiết kế vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ băng rộng. Hình 4.2 giới thiệu mô hình BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz.

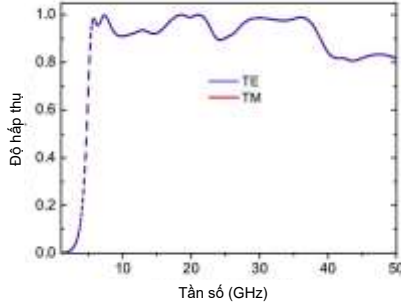


**Hình 4.2.** Cấu trúc của BMPA hoạt động ở vùng tần số GHz.

Hình 4.4 cho thấy hiệu suất hấp thụ đạt xấp xỉ 90% trong dải tần số rộng từ 5 đến 38.5 GHz cho cả phân cực TE và TM. Thiết kế đạt được độ hấp thụ cao do phối hợp trở kháng giữa BMPA và không gian tự do. Ngoài ra, dải tần hấp thụ rộng do nước điện môi của nước phân tán trong dải tần số rộng.

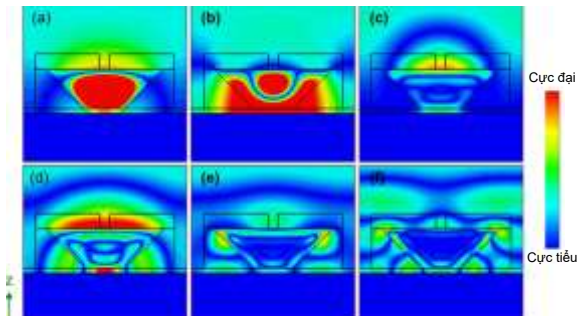
Khi có sự phối hợp trở kháng tuyệt đối giữa trở kháng vào của cấu trúc và trở kháng của không gian tự do, độ hấp thụ đạt giá trị tối ưu.

Để làm rõ cơ chế vật lý của cấu trúc BMPA, chúng tôi khảo sát phân bố từ trường trong ô cơ sở của BMPA trên mặt phẳng XOY tại các tần số cộng hưởng như chỉ ra trên hình 4.8.

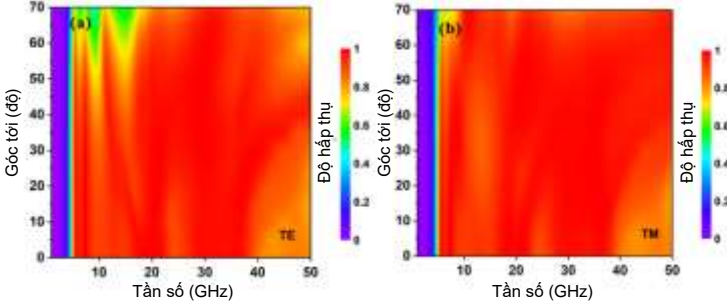


**Hình 4.4.** Độ hấp thụ của BMPA hoạt động ở vùng tần số GHz.

Độ hấp thụ của BMPA tại các góc tới khác nhau được khảo sát. Kết quả trên Hình 4.12 cho thấy BMPA đề xuất làm việc với góc tới rộng. Ở phân cực TE, độ hấp thụ giảm xuống xung quanh 80% ở dải tần số thấp (từ 5 đến 18 GHz) khi góc tới tăng lên  $50^\circ$  và xuất hiện các đỉnh phổ riêng biệt, tuy nhiên độ hấp thụ vẫn duy trì trên 90% ở dải tần số từ 18 đến 40 GHz. Với phân cực TM, độ hấp thụ duy trì trên 90% trong toàn dải tần số từ 5 đến 38.5GHz khi góc tới tăng đến  $70^\circ$ .



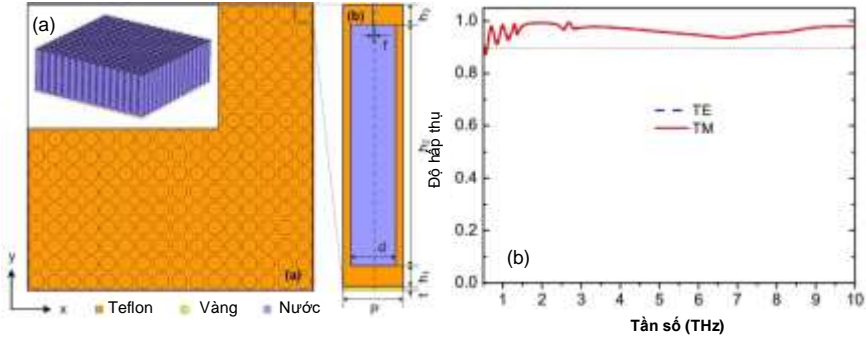
**Hình 4.8.** Phân bố từ trường H tại các tần số (a) 5.8 GHz, (b) 7.3 GHz, (c) 18.6 GHz, (d) 21.21 GHz, (e) 29.1 GHz và (f) 36 GHz.



**Hình 4.12.** Phổ hấp thụ của BIPA khi thay đổi góc tới.

### 4.3. Thiết kế BIPA tích hợp nước hoạt động ở tần số THz

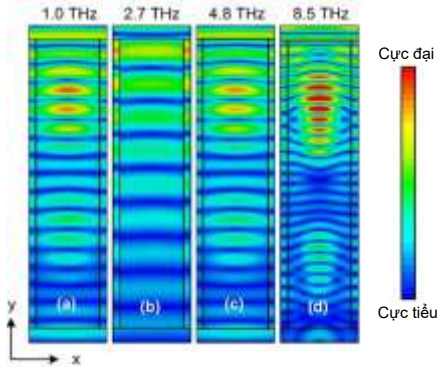
Trong phần này chúng tôi đề xuất thiết kế BIPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số THz [126]. Các ô cơ sở được sắp xếp theo trục  $x$  và trục  $y$  với chu kỳ  $P$  như thể hiện trong hình 4.15. Kết quả cho thấy BIPA dựa trên nước được đề xuất có độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số 0.6 đến 10 THz.



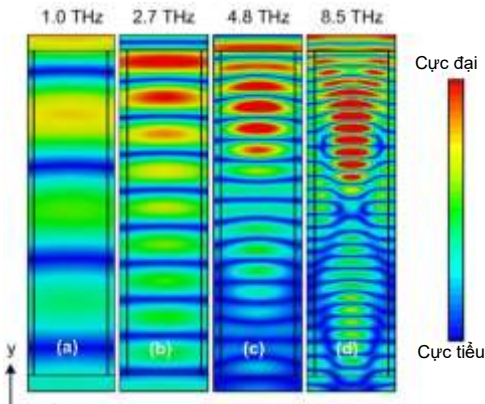
**Hình 4.15.** (a) Hình ảnh 3D của BIPA và (b) Độ hấp thụ của BIPA với góc tới vuông góc cho phân cực TE và TM [133].

Hình 4.19. Mô tả trở kháng vào chuẩn hóa của BIPA, cho thấy phần thực của trở kháng vào là gần bằng 1, trong khi phần ảo gần bằng 0 trong dải tần số từ 0.6 THz to 10 THz. Điều này chỉ ra rằng thiết kế đạt được độ hấp thụ gần tuyệt đối trong dải tần số rộng.

Chúng tôi cũng khảo sát phân bố điện trường và phân bố từ trường trong ô cơ sở của BMPA trên mặt phẳng  $XOY$  tại các tần số khác nhau như thể hiện trên Hình 4.20 và Hình 4.21 tương ứng.



**Hình 4.20.** Phân bố điện trường của BMPA tại các tần số khác nhau (a), 1.0 THz, (b), 2.7 THz, (c), 4.8 THz and (d) 8.5 THz [133].

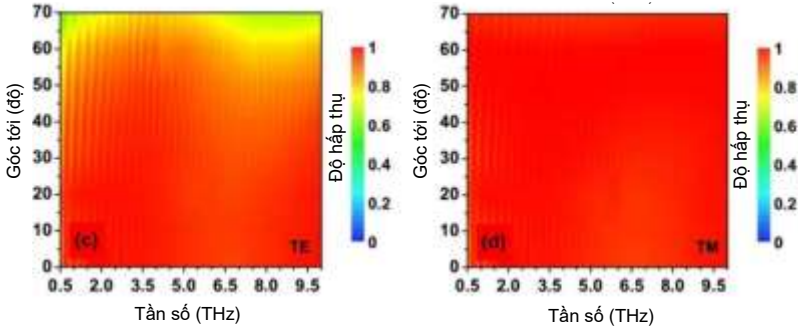


**Hình 4.21.** Phân bố từ trường của BMPA tại các tần số khác nhau (a), 1.0 THz, (b), 2.7 THz, (c), 4.8 THz and (d) 8.5 THz [133].

Xem xét tổn hao trên các lớp của cấu trúc BMPA, nhận thấy tổn hao chủ yếu ở lớp nước trong khi tổn hao ở lớp Teflon và lớp vàng là không đáng kể.

Trong thực tế, sóng điện từ chiếu tới bề mặt BMPA với các góc tới khác nhau. Do đó, độ hấp thụ của BMPA tại các góc tới khác nhau được khảo sát.

Từ kết quả thu được, có thể thấy thiết kế đề xuất đạt độ hấp thụ cao và không nhạy với góc tới cho cả phân cực TE và TM.



**Hình 4.23.** Phổ hấp thụ của BMPA với góc tới khác nhau (a, c) cho phân cực TE và (b,d) cho phân cực TM [133].

Như vậy, một thiết kế đơn giản của BMPA dựa trên nước hoạt động ở vùng tần số THz được đề xuất và nghiên cứu bằng mô phỏng. Thiết kế đạt độ hấp thụ cao trên 90% trong dải tần số rộng từ 0.6 tới 10 THz. Ngoài ra, độ hấp thụ được duy trì trên 90% cho góc tới  $40^\circ$  cho phân cực TE và  $70^\circ$  cho phân cực TM.

#### 4.4. Kết luận chương

Bằng phương pháp mô phỏng, Luận án đã xây dựng mô hình và nghiên cứu tính chất hấp thụ của BMPA hoạt động trong vùng tần số GHz và THz sử dụng vật liệu có tổn hao điện môi lớn (nước). Các mô hình BMPA đề xuất có độ hấp thụ cao trong dải tần số rộng, làm việc với góc tới rộng. Các kết quả nghiên cứu gồm 01 bài đăng trên tạp chí chuyên ngành trong nước thuộc danh mục HĐGSNN, trong “Danh mục các công trình công bố của luận án” là công trình 4. 01 kết quả nghiên cứu ở dải tần GHz đang gửi đăng trên tạp chí SCI-E.



## KẾT LUẬN CHUNG

Luận án “*Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ băng rộng sử dụng vật liệu biến hóa tích hợp phần tử tổn hao*” được thực hiện tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Những kết quả chính liên quan tới luận án đã được công bố bao gồm: 03 bài trên tạp chí SCI-E; 01 bài trên tạp chí trong nước trong danh mục tính điểm của HĐGSNN.

Luận án đã thực hiện đầy đủ các mục tiêu đặt ra và có những đóng góp nhất định cho nghiên cứu MMs nói chung và BMPAs nói riêng, bao gồm:

1. Luận án đã đề xuất mô hình vật lí, mô phỏng, khảo sát và tối ưu các thông số cấu trúc của BMPA tích hợp các phần tử điện trở cho các ứng dụng vùng tần số GHz. Từ đó, chế tạo thành công các mẫu BMPA tích hợp các phần tử điện trở hoạt động ở vùng tần số GHz như băng *S* (2-4 GHz), băng *C* (4-8 GHz), băng *X* (8-12 GHz) và băng *Ku* (12-18 GHz) và trình bày đầy đủ quy trình chế tạo BMPA ở vùng tần số GHz. Kết quả nghiên cứu chứng minh rằng tích hợp các phần tử điện trở vào cấu trúc cộng hưởng của MPA là phương pháp dễ dàng để mở rộng băng thông hấp thụ của MPA. Các BMPA có tích hợp điện trở giúp cường độ hấp thụ tại các đỉnh cộng hưởng đạt trên 90% so sánh với khoảng 30% khi loại bỏ các điện trở ra khỏi cấu trúc đó.

2. Luận án đã đề xuất mô hình vật lí, mô phỏng và khảo sát tối ưu các thông số cấu trúc của BMPA tích hợp chất lỏng (nước), hoạt động ở vùng tần số GHz (5-38.5 GHz) và THz (0.6-10 THz). Kết quả nghiên cứu cho thấy các BMPA tích hợp nước có cấu trúc đơn giản, dễ dàng mở rộng băng thông hấp thụ do nước có hằng số điện môi phân tán trong dải tần số rộng với tổn hao điện môi tương đối cao.

Các cấu trúc BMPA được đề xuất có độ hấp thụ cao, trong dải băng tần rộng, ít nhạy với góc tới và góc phân cực. Các kết quả nghiên cứu của Luận án được đăng tải trên các tạp chí khoa học trong nước và quốc tế uy tín.

## NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

1. Hợp tác với nhóm nghiên cứu ở Hàn Quốc nghiên cứu chế tạo và đo thực nghiệm BMPA tích hợp chất lỏng nước hoạt động ở vùng tần số GHz (5-38.5 GHz) và THz (0.6-10 THz) đã được tối ưu trong chương 4. Tiếp tục đề xuất và tối ưu cấu trúc BMPA tích hợp nước hấp thụ đẳng hướng hai chiều.

2. Tiếp tục nghiên cứu thử nghiệm các mẫu BMPA sử dụng vật liệu có tính chất đàn hồi, BMPA hấp thụ hai chiều nhằm tăng khả năng ứng dụng thực tế.

## DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN

**1. Thu N. T. K**, Minh T. N., Quang H. N., Nghia C. T., Tuyen D. L., Khuyen X. B., Tung. S. B, Lam C. T., Lam V. D., Hoa N. T. Q, 2021, Simple design of efficient broadband multifunctional polarization converter for X-band application, *Sci. Rep*, 11, 2032.

**2. Thu N. T. K**, Nghia C. T, Hieu N. N., Tuyen D. L., Khuyen X. B., Lam C. T., Hoa N. T. Q., 2021, Simple Design of a Wideband and Wide-Angle Insensitive Metamaterial Absorber Using Lumped Resistors for X- and Ku-Bands, *IEEE Photon. J.*, 13 (3), 1-10.

**3. Tung. P. D., Thu N. T. K.**, Hieu N. N., Tuyen D. L., Khuyen X. B., Lam V. D., Lam C. T Hoa N. T. Q., 2021, Lightweight, Ultra-Wideband, and polarization-Insensitive Metamaterial Absorber Using a Multilayer Dielectric Structure for C- and X-Band Applications, *Phys Status Solidi B Basic Res*, 258, 2100175.

**4. Thu N. T. K**, Minh T. N., Quang H. N., Tam N. T. M., Thuong H. T. H., My P. T., Lam V. D., 2023, A simple design of water-based broadband metamaterial absorber for THz, *Comm. Phys*, 33 (1), 93-102.