

**BỘ GIÁO DỤC  
VÀ ĐÀO TẠO**

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

**HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ**



**Dương Thị Hà**

**NGHIÊN CỨU ĐẶC TRƯNG HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỬ  
CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CỘNG HƯỞNG BẬC CAO  
CÓ TÍNH NĂNG ĐÀN HỒI Ở VÙNG TẦN SỐ GHz**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LIỆU ĐIỆN TỬ**

**Mã số: 9440123**

***Hà Nội – 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. Người hướng dẫn 1: TS. Bùi Xuân Khuyến
2. Người hướng dẫn 2: GS.TS. Vũ Đình Lâm

Phản biện 1: GS.TS. Lê Anh Tuấn

Phản biện 2: PGS.TS. Nguyễn Văn Quy

Phản biện 3: PGS.TS. Ngô Quang Minh

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 03 tháng 7 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

Vật liệu biến hóa hấp thụ mạnh sóng điện từ (Metamaterial perfect absorber - MPA) được đề xuất lần đầu tiên vào năm 2008. Vật liệu này có ưu điểm là kích thước ô cơ sở nhỏ hơn bước sóng hấp thụ, hiệu suất hấp thụ cao, dải tần hấp thụ có thể điều chỉnh được [1]. Do đó, MPA được quan tâm nghiên cứu cho nhiều ứng dụng liên quan đến hấp thụ sóng điện từ, từ lĩnh vực dân dụng đến quân sự trong các vùng tần số khác nhau [10-12]. Ngày nay, sự phát triển các công nghệ hiện đại của AI (trí tuệ nhân tạo), học máy, 5G/6G và IoT (internet vạn vật) đòi hỏi phát triển MPA phù hợp cho công nghệ nhiều đầu vào và nhiều đầu ra (multiple-input and multiple-output - MIMO) trong truyền thông không dây, hoạt động ở các vùng tần số thấp (30 MHz–10 GHz) [13]. Các MPA này được nghiên cứu nhằm tiến tới các ứng dụng đầy hứa hẹn trong thu năng lượng [14], hệ thống UHF-RFID [15,16], thiết bị Wi-Fi cho liên lạc 4G [17], thiết bị đeo được [18], thông tin vệ tinh, viễn thông vô tuyến đường dài và các kênh không dây tốc độ cao [19] ... Bên cạnh vùng tần số GHz, MPA hoạt động trong các vùng tần số THz cũng được quan tâm nghiên cứu ngày càng mạnh mẽ cho nhiều ứng dụng thực tiễn như cảm biến khí [20,21], nâng cao hiệu suất quang học trong các ứng dụng của bộ phát nhiệt hồng ngoại, hình ảnh, bộ tách sóng, các thiết bị nhiệt điện tử ... [22-24]. Nghiên cứu về vật liệu biến hóa nói chung và vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ nói riêng đã được triển khai tại Viện Khoa học vật liệu từ năm 2009 và đã thu được nhiều kết quả khoa học quan trọng. Trong đó, các hướng nghiên cứu chính được thực hiện bao gồm tối ưu hóa cấu trúc cộng hưởng theo hướng đơn giản, dễ chế tạo; cải tiến/mở rộng vùng tần số hoạt động của vật liệu nhằm thu được MPA đa đỉnh hoặc dải rộng; điều khiển chủ động đặc tính hấp thụ của vật liệu bằng các tác động ngoại vi ...

Với bài toán cải tiến/mở rộng băng tần hoạt động của MPA, các nghiên cứu đã đề xuất các phương pháp để mở rộng băng tần của MPA, bao gồm: thiết kế các MPA có cấu trúc đa lớp (sắp xếp cấu trúc cộng hưởng theo chiều

đọc); sử dụng cấu trúc đơn lớp với siêu ô đơn vị bao gồm các cấu trúc cộng hưởng có kích thước/hình dạng khác nhau (sắp xếp theo chiều ngang) [36,37]; tích hợp các linh kiện như điện trở, di ốt, tụ điện [38,39]... Các MPA được thiết kế theo các phương pháp này có sự tương tác giữa các cấu trúc thường phức tạp, quá trình thực nghiệm gặp nhiều khó khăn. Đồng thời chúng có kích thước ô đơn vị và khối lượng lớn, nên sẽ xuất hiện một số hạn chế ứng dụng trong trường hợp yêu cầu MPA kích thước nhỏ và nhẹ. Để khắc phục hạn chế này, MPA băng tần kép hoặc đa băng tần dựa trên cộng hưởng bậc cao đã được đề xuất và nghiên cứu tích cực về lý thuyết và thực nghiệm. Bên cạnh việc hỗ trợ để có được đặc tính đa băng tần, cộng hưởng bậc cao còn tạo ra MPA hoạt động ở thang tần số cao hơn, điều này có thể cho phép chế tạo MPA hoạt động trong vùng quang học, đây là giải pháp hiệu quả để thay thế cho các kỹ thuật chế tạo phức tạp và đắt tiền hiện nay. Cộng hưởng bậc cao trong MPA đã được quan sát thấy và khảo sát. Tuy nhiên, vấn đề cơ chế của cộng hưởng bậc cao, khả năng hoạt động ổn định/điều khiển chủ động của cộng hưởng bậc cao vẫn cần được nghiên cứu và làm rõ.

Bên cạnh yêu cầu mở rộng băng tần hoạt động, nghiên cứu chế tạo và đặc trưng điện từ của MPA có tính năng đàn hồi đang được quan tâm và nghiên cứu mạnh mẽ trong thời gian gần đây [43-46]. Phần lớn MPA truyền thống được chế tạo từ các vật liệu có dạng phẳng và rắn nên khó thay đổi hình dạng sau khi đã gia công. Điều này làm cho chúng khó có thể bao phủ hoặc tích hợp lên vật thể thực tế (thường có các bề mặt cong phức tạp). Đặc biệt, do không đàn hồi, hầu hết các MPA này cũng hạn chế về các bậc tự do trong việc điều khiển/đảm bảo hiệu suất hấp thụ cao dưới sự phân cực của sóng điện từ. Do đó, việc nghiên cứu trang bị cho MPA có tính năng linh hoạt/đàn hồi nhằm tăng cường khả năng ứng dụng của vật liệu này trong thực tế, đặc biệt là trong lĩnh vực quân sự là một trong những yêu cầu cấp thiết hiện nay. Tuy nhiên, đặc trưng điện từ của các MPA có tính năng đàn hồi vẫn còn nhiều vấn đề cần nghiên cứu làm rõ, đặc biệt là tương tác giữa các ô

cơ sở và cộng hưởng bậc cao ở trạng thái bị bẻ cong. Do đó, luận án sẽ giải quyết bài toán thiết kế các MPA đa đỉnh, có tính năng đàn hồi, với độ hấp thụ cao được duy trì tốt ở cả hai trạng thái phẳng và uốn cong, sử dụng hiệu ứng cộng hưởng bậc cao.

Mặc dù MPA có cộng hưởng bậc cao và MPA có tính năng đàn hồi đã được quan tâm nghiên cứu, nhưng vẫn còn một số vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu và làm rõ, bao gồm:

- i) Cơ chế của cộng hưởng bậc cao.
- ii) Khả năng hoạt động ổn định/điều khiển của cộng hưởng bậc cao.
- iii) Đặc trưng của cộng hưởng bậc cao trong MPA đàn hồi, ở các trạng thái đàn hồi khác nhau.

Với các ưu điểm của cộng hưởng bậc cao được bàn luận ở trên, luận án tập trung làm rõ cơ chế của cộng hưởng bậc cao trong MPA, hướng tới thiết kế, chế tạo MPA có cộng hưởng bậc cao hoạt động ổn định hoặc có khả năng điều khiển chủ động và khảo sát hiệu ứng cộng hưởng bậc cao trong MPA đàn hồi. Đây là một trong những hướng nghiên cứu quan trọng trong quá trình hiện thực hóa các tiềm năng ứng dụng của MPA.

## **2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án**

- Làm rõ cơ chế hoạt động của các MPA có hiệu ứng cộng hưởng bậc cao và có tính năng đàn hồi.

- Thiết kế, chế tạo thành công các MPA đa băng tần sử dụng hiệu ứng cộng hưởng từ bậc cao và MPA đàn hồi hoạt động trong vùng tần số thấp (từ 0,1 đến 12,0 GHz).

- Áp dụng các mô hình tối ưu để thiết kế MPA cộng hưởng bậc cao có tính năng đàn hồi hoạt động ở vùng tần số THz.

**3. Những đóng góp mới của luận án:** Luận án đã tập trung giải quyết các vấn đề về vật liệu MPA có hiệu ứng cộng hưởng bậc cao và tính năng đàn hồi, bao gồm:

- i) Luận án đã làm rõ cơ chế hoạt động của các MPA có hiệu ứng cộng hưởng bậc cao và MPA có tính năng đàn hồi.

ii) Luận án đã thiết kế, chế tạo thành công một số H-MPA đa băng tần sử dụng hiệu ứng cộng hưởng từ bậc lẻ (bậc ba và bậc năm) hoạt động trong các băng tần khác nhau, từ băng tần VHF (0,03 – 0,30 GHz) đến băng tần S (2,0 – 4,0 GHz) với độ hấp thụ trên 90%. Thiết kế và chế tạo thành công một số cấu trúc H-MPA đàn hồi hoạt động trong băng tần C (4,0 – 8,0 GHz) và X (8,0 – 12,0 GHz) có hiệu ứng cộng hưởng từ bậc hai, khi cấu trúc ở trạng thái uốn cong.

iii) Luận án đã mở rộng nghiên cứu một số cấu trúc H-MPA hoạt động trên vùng tần số cao hơn (THz) để làm rõ sự phụ thuộc phổ hấp thụ vào trạng thái đàn hồi. Khi vật liệu ở trạng thái phẳng, có hai đỉnh hấp thụ: đỉnh cơ bản tại 34,9 THz, độ hấp thụ 96% và đỉnh bậc ba tại 97,2 THz, độ hấp thụ 99,2%. Khi uốn cong với bán kính uốn 5  $\mu\text{m}$ , xuất hiện đỉnh cộng hưởng bậc hai tại 54,5 THz với độ hấp thụ khoảng 80%.

## **Chương 1. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU BIẾN HÓA**

### **HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN CỘNG HƯỞNG BẬC CAO VÀ ĐÀN HỒI**

#### **1.1. Tổng quan về vật liệu biến hóa hấp thụ mạnh sóng điện từ (MPA)**

##### **1.1.1. Lịch sử hình thành và phát triển của MPA**

MPA được đề xuất lần đầu tiên bởi Landy vào năm 2008 [9]. Kể từ đó, nghiên cứu về vật liệu hấp thụ sóng điện từ dựa trên MMs được quan tâm và phát triển mạnh mẽ với nhiều hướng nghiên cứu khác nhau như tối ưu hóa cấu trúc theo hướng đơn giản, dễ chế tạo; mở rộng/cải tiến băng tần hấp thụ ...

##### **1.1.2. Phân loại MPA**

Dựa vào băng tần hoạt động, có thể phân loại MPA thành ba loại: MPA đơn đỉnh, MPA đa đỉnh và MPA băng tần rộng. Tùy theo mục đích ứng dụng mà các MPA này được thiết kế để có thể thu được băng tần hấp thụ thích hợp. Thông thường, MPA thể hiện đặc tính hấp thụ dải hẹp hoặc hấp thụ đơn đỉnh. MPA đa đỉnh có thể đạt được bằng cách sắp xếp các cấu trúc cộng hưởng đồng phẳng hoặc xếp chồng lên nhau tạo thành dạng đa lớp [37,80]. Có bốn phương pháp chính để tạo ra hấp thụ băng tần rộng: sắp xếp các cấu

trúc cộng hưởng đồng phẳng; thiết kế cấu trúc đa lớp; sử dụng các phần tử ngoại vi như điện trở, tụ điện; sử dụng các vật liệu plasmonic [81-88].

### **1.1.3. Cơ chế hấp thụ sóng điện từ của MPA trong vùng tần số GHz**

#### **\* Lý thuyết phối hợp trở kháng**

Khi sóng điện từ lan truyền đến bề mặt của vật liệu, một phần năng lượng của chúng bị phản xạ ngược trở lại môi trường tới, một phần năng lượng bị truyền ra khỏi vật liệu và một phần bị vật liệu hấp thụ. Nếu trở kháng hiệu dụng của vật liệu bằng trở kháng của không gian xung quanh nó, điều kiện phối hợp trở kháng được thỏa mãn. Khi đó, thành phần phản xạ của sóng điện từ tại bề mặt của vật liệu bị triệt tiêu, toàn bộ sóng điện từ đi vào bên trong vật liệu và bị hấp thụ.

#### **\* Lý thuyết giao thoa triệt tiêu**

Khi sóng điện từ truyền tới bề mặt phân cách của vật liệu, một phần sóng điện từ truyền vào bên trong vật liệu và một phần bị phản xạ lại môi trường. Nếu lớp điện môi có độ dày tới hạn, thành phần phản xạ thứ cấp và thành phần phản xạ đầu tiên ngược pha và cùng biên độ, thì hiện tượng giao thoa triệt tiêu xuất hiện, dẫn đến sự hấp thụ hoàn toàn sóng điện từ [92].

## **1.2. Lý thuyết cộng hưởng bậc cao của MPA**

### **1.2.1. Đặc trưng điện từ của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ có cộng hưởng bậc cao (H-MPA)**

Xét trường hợp cấu trúc CWP đơn giản có các cạnh của dây kim loại song song với các véc tơ điện trường và từ trường của sóng tới. Cấu trúc CWP cho thấy các đỉnh hấp thụ tại 3,87 GHz (40,31%), 11,52 GHz (50,81%), 18,54 GHz (48,23%) và 27,15 GHz (47,34%) tương ứng với các cộng hưởng từ cơ bản, bậc 3, bậc 5 và bậc 7 [42].

### **1.2.2. Lý thuyết mạch tương cho cộng hưởng bậc cao**

Cơ chế hấp thụ và các đặc tính của cộng hưởng từ bậc lẻ có thể được làm sáng tỏ thông qua lý thuyết mạch tương đương cho cộng hưởng bậc cao (DEC), trong đó MPA được chia nhỏ thành  $N$  miền. Mỗi miền này được thay thế bằng các mạch LC rất nhỏ [42]. Nghiệm của bài toán mạch điện khi

$N \rightarrow \infty$  (đồng thời  $\phi \rightarrow 0$ ) tương ứng với ba mode cộng hưởng: (1) các cộng hưởng từ bậc lẻ, (2) các cộng hưởng từ bậc chẵn, (3) các cộng hưởng điện. Các cộng hưởng từ có dòng điện bề mặt ở hai mặt kim loại ngược chiều nhau. Cộng hưởng điện có dòng điện bề mặt tại hai lớp kim loại cùng chiều nhau.

### **1.3. Đặc tính điện từ của một số cấu trúc H-MPA**

#### **1.3.1. Cấu trúc đĩa tròn và vòng cộng hưởng hình tròn**

Bằng cách tối ưu hóa các tham số hình học các cấu trúc cộng hưởng dạng đĩa tròn và vòng tròn có thể cho cộng hưởng từ bậc cao bao gồm cộng hưởng từ bậc ba và bậc năm [41,96].

#### **1.3.2. Cấu trúc đĩa tròn bị cắt**

Cấu trúc cộng hưởng dạng đĩa tròn bị cắt cũng có thể cho hiệu ứng cộng hưởng bậc cao và tạo ra hấp thụ đa đỉnh [40]. Số lượng các đỉnh hấp thụ của MPA dạng đĩa tròn bị cắt có thể tăng lên bằng cách chọn các thông số hình học thích hợp của cấu trúc ô cơ sở.

### **1.4. Cải tiến hoạt động của MPA dựa trên tính đàn hồi của vật liệu**

#### **1.4.1. MPA đàn hồi dựa trên lớp điện môi polyimide**

Polyimide là hợp chất polymer có khả năng chịu nhiệt tốt, độ bền cơ học cao, có khả năng uốn dẻo tốt. Vì vậy, polyimide được sử dụng rộng rãi trong việc chế tạo các MPA có tính năng đàn hồi, mở rộng tiềm năng ứng dụng của MPA trong thực tế [46,101].

#### **1.4.2. MPA đàn hồi dựa trên lớp điện môi Polydimethylsiloxane (PDMS)**

Polydimethylsiloxane (PDMS) có năng lượng bề mặt thấp, khả năng tương thích sinh học và tính đàn hồi tốt. PDMS là chất nền thích hợp cho vật liệu MPA đàn hồi, có thể điều khiển được bằng cả tác động uốn cong và kéo giãn [104,105].

#### **1.4.3. MPA đàn hồi có lớp điện môi làm từ giấy**

Giấy có thể dễ dàng được gấp hoặc uốn thành các hình dạng khác nhau, đáp ứng các thiết kế đa dạng cho nhiều ứng dụng, nên nó là một loại điện môi lý tưởng cho việc chế tạo MPA linh hoạt, mỏng và nhẹ, với các đặc tính điện từ có thể điều khiển được [106-109].



## 1.5. Kết luận chương 1

Để đạt được MPA hấp thụ đa dải tần đồng thời giữ được kích thước và khối lượng nhỏ gọn của vật liệu, hiệu ứng cộng hưởng bậc cao trong MPA đã được khai thác. Để mở rộng tiềm năng ứng dụng của H-MPA, cần tích hợp các cấu trúc H-MPA lên các đế điện môi đàn hồi và tối ưu hóa cấu trúc để vật liệu có thể duy trì đặc tính hấp thụ tốt ngay cả khi sóng EM có góc tới lớn. Do đó, luận án tập trung nghiên cứu H-MPA tích hợp lên đế điện môi polyimide đàn hồi. Các cấu trúc cộng hưởng được lựa chọn là cấu trúc hình vuông, vòng cộng hưởng kín để đảm bảo tiêu chí dễ chế tạo. Bên cạnh đó, luận án cải tiến các cấu trúc này thành cấu trúc hình vuông tích hợp tụ điện, hai tấm hình vuông xoay lệch nhau góc  $45^\circ$ , vòng cộng hưởng gấp khúc để thu được H-MPA đa băng tần, hoạt động trong các vùng tần số khác nhau, từ băng tần VHF đến vùng tần số THz. Các tính chất điện từ của các H-MPA được khảo sát cho cả hai cấu hình phẳng và uốn cong.

## Chương 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Trong luận án này, H-MPA được nghiên cứu sử dụng kết hợp các phương pháp: mô phỏng, tính toán lý thuyết, và thực nghiệm. Đây là những phương pháp có độ tin cậy cao, đã được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực nghiên cứu về MMs.

### 2.1. Phương pháp mô phỏng tính chất điện từ của H-MPA đàn hồi

Các đặc trưng điện từ của H-MPA được mô phỏng sử dụng phần mềm mô phỏng vật lý CST (Computer Simulation Technology). Dựa trên cơ sở ứng dụng kỹ thuật tích phân hữu hạn, các tham số tán xạ  $S_{11}$  và  $S_{21}$  được xác định. Ngoài ra, phân bố mật độ dòng điện, phân bố điện trường, từ trường, ... được trích xuất. Từ đó, tính chất điện từ của H-MPA được phân tích.

### 2.2. Mô hình tính toán các tham số hiệu dụng của H-MPA

#### 2.2.1. Mô hình mạch điện LC

Dưới tác dụng của sóng điện từ, H-MPA hoạt động như một mạch dao động LC. Trong đó, các thành phần dẫn điện được mô hình hóa như các cuộn cảm và tương tác giữa các thành phần kim loại, dẫn điện được mô hình hóa

như tụ điện. Tần số cộng hưởng cơ bản và bậc cao của H-MPA được xác định bằng tần số dao động riêng của mạch LC [95].

### **2.2.2. Tính toán trở kháng hiệu dụng**

Để kiểm tra điều kiện phối hợp trở kháng, trở kháng hiệu dụng của vật liệu được tính toán từ các tham số tán xạ theo phương pháp của Chen và cộng sự [114]. Điều kiện phối hợp trở kháng được thỏa mãn khi trở kháng hiệu dụng có phần thực bằng 1 và phần ảo bằng 0.

### **2.3. Phương pháp chế tạo H-MPA hoạt động trong vùng tần số GHz**

Với các H-MPA có cấu trúc ba lớp, kim loại - điện môi - kim loại, hoạt động trong vùng tần số GHz, phương pháp chế tạo phù hợp là phương pháp quang khắc. Phương pháp này gồm 4 bước chính: chiếu sáng, tẩy rửa chất cản quang, ăn mòn cấu trúc và hiện hình cấu trúc. Các H-MPA có cấu trúc cộng hưởng làm từ mực in dẫn điện được chế tạo theo phương pháp in lưới.

### **2.4. Phương pháp thực nghiệm đánh giá đặc trưng điện từ của H-MPA**

Các kết quả thực nghiệm của luận án được đo đạc tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, sử dụng hệ thiết bị phân tích mạng vectơ Rohde & Schwarz ZNB20. Kết quả đo thể hiện dưới dạng độ phản xạ  $R$ . Độ hấp thụ của vật liệu được xác định bởi  $A = 1 - R$ .

### **2.5. Kết luận chương 2**

Luận án sử dụng kết hợp các phương pháp nghiên cứu mô phỏng vật lý, mô hình hóa sử dụng mạch điện LC, tính toán bán lý thuyết và thực nghiệm. Đây là các phương pháp hiệu quả để nghiên cứu đặc trưng điện từ của MPA nói chung và H-MPA nói riêng. Trong quá trình thực hiện luận án, các phương pháp nghiên cứu kể trên được thực hiện độc lập, và được so sánh với nhau để kiểm chứng lại và đảm bảo độ chính xác các kết quả nghiên cứu.

## **Chương 3. ĐẶC TRƯNG HẤP THỤ**

### **CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CỘNG HƯỞNG TỪ BẬC LẺ**

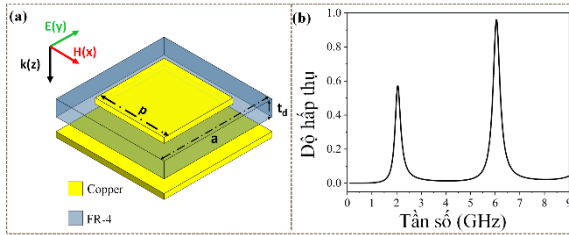
Chương này trình bày một số H-MPA có cấu trúc bề mặt được cải tiến bao gồm cấu trúc tích hợp tụ điện, vòng cộng hưởng gấp khúc và hình ngôi sao (hai hình vuông xoay lệch nhau  $45^\circ$ ) nhằm thu được hấp thụ đa đỉnh dựa

trên cộng hưởng từ bậc lẻ hoạt động trong các băng tần từ VHF đến băng tần S (30 MHz - 4 GHz) và băng tần THz. Ngoài ra, vật liệu này được tích hợp lên đế điện môi làm từ polymer đàn hồi để mở rộng khả năng ứng dụng của vật liệu đề xuất.

### 3.1. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA tích hợp tụ điện hoạt động trong cả hai băng tần VHF (30 - 300 MHz) và S (2,0 - 4,0 GHz)

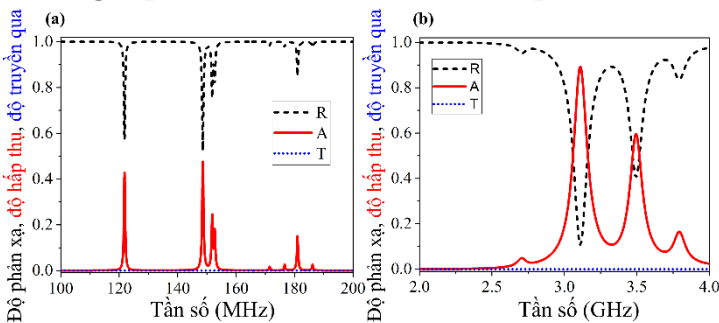
#### 3.1.1. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA có cấu trúc cộng hưởng hình vuông, chưa được tích hợp tụ điện

Đầu tiên, đặc trưng điện từ của H-MPA có cấu trúc cộng hưởng hình vuông trên lớp điện môi FR-4 được khảo sát. Kết quả mô phỏng cho thấy có hai đỉnh hấp thụ tại 2,05 và 6,06 GHz (Hình 3.1). Phân bố dòng điện bề mặt chỉ ra rằng đỉnh hấp thụ tại 2,05 GHz có nguồn gốc từ cộng hưởng từ cơ bản, đỉnh hấp thụ tại 6,06 GHz có nguồn gốc từ cộng hưởng từ bậc ba.



**Hình 3.1.** (a) Cấu trúc ô cơ sở của H-MPA, (b) phổ hấp thụ mô phỏng của vật liệu khi lớp điện môi có độ dày là  $t_d = 3$  mm.

#### 3.1.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA được tích hợp tụ điện



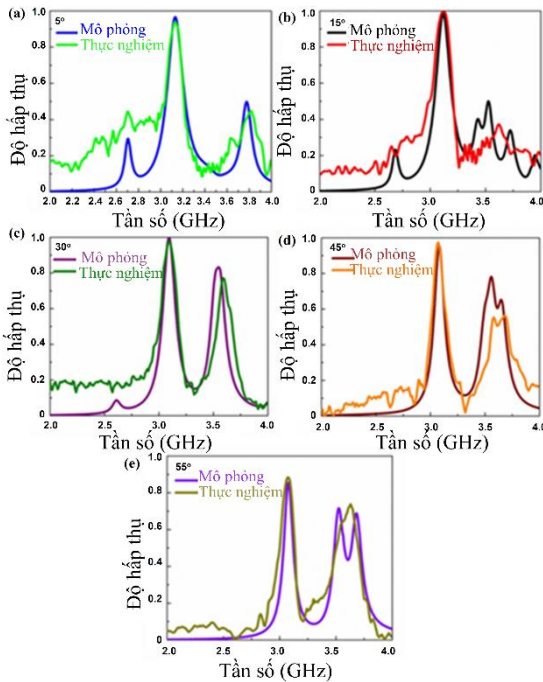
**Hình 3.9.** Phổ phản xạ (R), hấp thụ (A) và truyền qua (T) của H-MPA tích hợp tụ điện trong (a) băng tần VHF và (b) băng tần S.

Khi được tích hợp các tụ điện  $C_1$  (điện dung 180 pF) và  $C_2$  (điện dung 360 pF) vào khe hở giữa các tấm hình vuông, vật liệu có hai đỉnh hấp thụ cơ bản tại vùng tần số VHF. Đồng thời vật liệu còn thể hiện hai đỉnh hấp thụ bậc cao trong băng tần S.

### 3.1.3. Khảo sát ảnh hưởng của tụ điện đến tính chất hấp thụ của vật liệu

Khi tụ điện  $C_1$  và  $C_2$  có điện dung tăng lên, các đỉnh hấp thụ trong băng tần VHF dịch chuyển về phía tần số thấp hơn. Đặc biệt, các đỉnh hấp thụ bậc cao trong băng tần S không phụ thuộc vào giá trị điện dung của  $C_1$  và  $C_2$ .

### 3.1.4 Ảnh hưởng của góc tới sóng điện từ lên đặc trưng hấp thụ của H-MPA



**Hình 3.17.** Kết quả mô phỏng và đo đạc phổ hấp thụ của H-MPA trong băng tần S với góc tới khác nhau: (a)  $5^\circ$ , (b)  $15^\circ$ , (c)  $30^\circ$ , (d)  $45^\circ$  và (e)  $55^\circ$ .

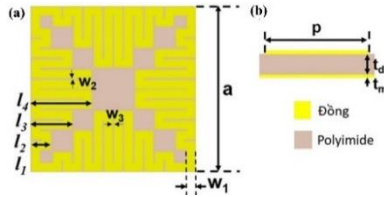
Kết quả thực nghiệm cho thấy vật liệu có hai đỉnh hấp thụ bậc cao tại 3,13 (93,9%) và 3,82 GHz (44,7%). Khi góc tới của sóng điện từ thay đổi từ 0 đến  $30^\circ$ , cường độ hấp thụ của các đỉnh này tăng lên. Nếu tiếp tục tăng góc

tới lên đến  $45^\circ$ , có một đỉnh hấp thụ mới xuất hiện tại 3,67 GHz có cường độ 56,5%. Khi góc tới tăng lên  $55^\circ$ , có ba đỉnh hấp thụ tại 3,07 GHz (88,3%), 3,54 GHz (63,9%) và 3,63 GHz (73,8%). Bản chất của các đỉnh hấp thụ mới này là do cộng hưởng từ bậc năm.

### 3.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA đàn hồi hoạt động trong băng tần UHF (300 MHz – 1000 MHz) và băng tần L (1,0 – 2,0 GHz)

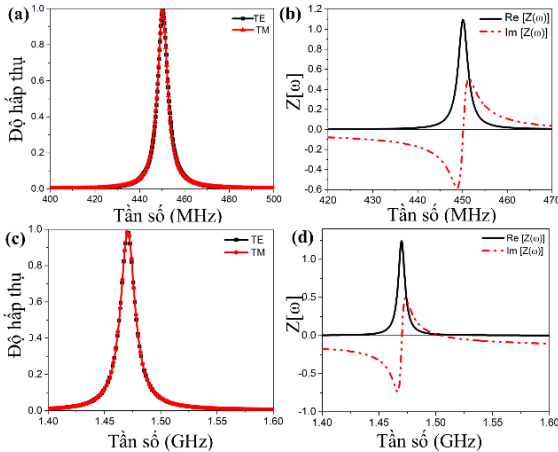
#### 3.2.1. Thiết kế mô phỏng H-MPA đàn hồi

H-MPA có cấu trúc ô cơ sở được thiết kế như trên Hình 3.19. Các tham số cấu trúc bao gồm:  $a = 55,0$ ;  $p = 54,5$ ;  $t_d = 4,0$ ;  $w_1 = 2,8$ ;  $w_2 = 0,6$ ;  $w_3 = 0,5$ ;  $l_1 = 7,2$ ;  $l_2 = 6,5$ ;  $l_3 = 13,5$ ;  $l_4 = 20$  mm.



*Hình 3.19. Minh họa ô cơ sở của H-MPA (a) mặt trên và (b) mặt bên.*

#### 3.2.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc ba ở trạng thái phẳng

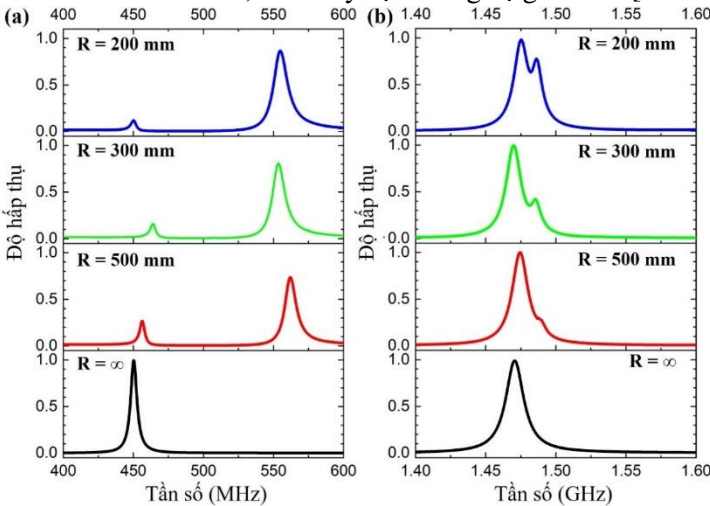


*Hình 3.20. (a) Phổ hấp thụ và (b) trở kháng hiệu dụng của H-MPA trong băng tần UHF, (c) phổ hấp thụ và (d) trở kháng hiệu dụng của H-MPA trong băng tần L.*

Khi sóng điện từ tới vuông góc với bề mặt cấu trúc ở trạng thái phẳng, vật liệu có hai đỉnh hấp thụ tại 450 MHz và 1,47 GHz có cường độ lần lượt là 99,4% và 99,8%. Đỉnh thứ nhất có nguồn gốc từ cộng hưởng từ cơ bản, đỉnh thứ hai có nguồn gốc từ cộng hưởng từ bậc ba. Từ kết quả tính toán trở kháng hiệu dụng minh họa trên Hình 3.20(b) và 3.20(d), ta thấy điều kiện phối hợp trở kháng đã được thỏa mãn. Do đó, ở 450 MHz và 1,47 GHz, thành phần phản xạ của sóng điện từ gần bằng không, gần như toàn bộ sóng tới được truyền vào bên trong H-MPA và được hấp thụ.

### 3.2.3. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA bậc ba ở các trạng thái biến dạng khác nhau

Với đỉnh hấp thụ cơ bản tại 450 MHz, khi uốn cong, độ hấp thụ giảm mạnh từ khoảng 99,4% xuống còn 10% khi  $R = 200$  mm. Tuy nhiên, có thêm một đỉnh hấp thụ cơ bản mới xuất hiện ở 556 MHz với cường độ tăng dần khi  $R$  giảm. Khi  $R = 200$  mm, đỉnh này đạt cường độ gần 90% [Hình 3.24(a)].



**Hình 3.24.** Sự phụ thuộc của phổ hấp thụ mô phỏng vào bán kính uốn đối với các đỉnh hấp thụ (a) cơ bản và (b) bậc cao.

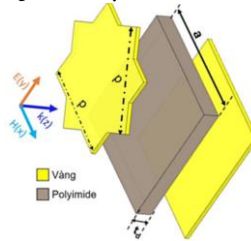
Khi bị uốn cong, đỉnh hấp thụ bậc cao tại 1,47 GHz bị tách thành hai đỉnh hấp thụ tại 1,47 và 1,48 GHz. Hai đỉnh này đều có nguồn gốc từ cộng hưởng từ bậc ba. Khi  $R$  giảm đến 200 mm, đỉnh hấp thụ ở 1,48 GHz tăng lên

gần 79%, trong khi độ hấp thụ của đỉnh ban đầu gần như không thay đổi [Hình 3.24(b)]. Sự hình thành các đỉnh hấp thụ mới được giải thích là do cấu trúc trở nên bất đối xứng khi bị uốn cong [118].

### 3.3. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA đàn hồi trong vùng tần số THz

#### 3.3.1. Thiết kế cấu trúc H-MPA đàn hồi hoạt động trong vùng THz

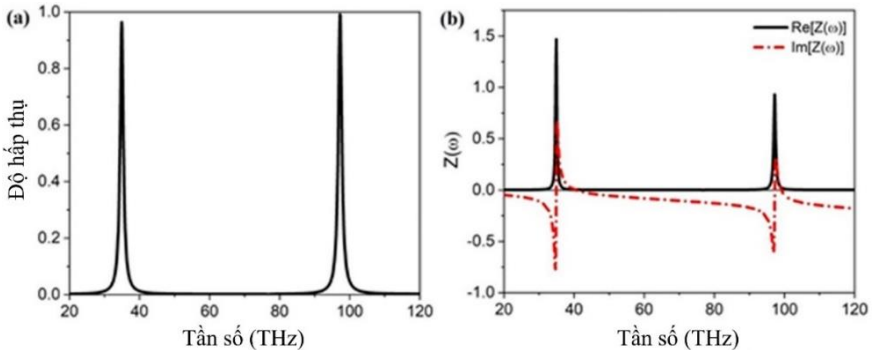
Vật liệu đề xuất được thiết kế và minh họa trên Hình 3.26. Các tham số cấu trúc bao gồm:  $a = 2,0 \mu\text{m}$ ;  $p = 1,1 \mu\text{m}$ ;  $t_m = 0,07 \mu\text{m}$  và  $t_d = 0,02 \mu\text{m}$ .



**Hình 3.26.** Cấu trúc ô cơ sở của H-MPA hoạt động trong vùng tần số THz.

#### 3.3.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA đàn hồi hoạt động trong vùng THz

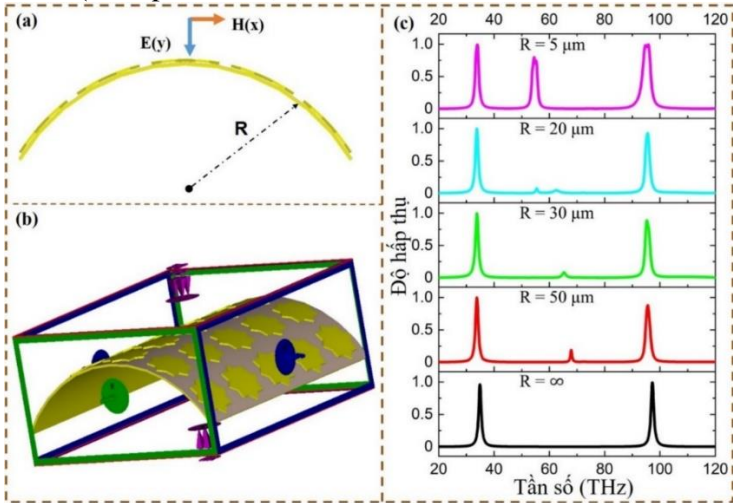
Vật liệu cho đỉnh hấp thụ cơ bản tại 34,9 THz và bậc ba tại 97,2 THz với cường độ lần lượt là 96,4% và 99,2% [Hình 3.27(a)]. Tại hai tần số này, điều kiện phối hợp trở kháng được thỏa mãn [Hình 3.27(b)], dẫn đến gần 100% sóng điện từ truyền vào bên trong vật liệu và bị hấp thụ.



**Hình 3.27.** (a) Phổ hấp thụ mô phỏng và (b) trở kháng hiệu dụng của vật liệu.

Khi được uốn cong, vị trí và cường độ của đỉnh hấp thụ cơ bản không thay đổi. Ở trạng thái đàn hồi khác nhau (bán kính uốn cong thay đổi từ 50  $\mu\text{m}$  đến 5  $\mu\text{m}$ ), H-MPA này duy trì tốt đỉnh hấp thụ cơ bản với độ hấp thụ

trên 90%. Khi  $R = 5 \mu\text{m}$ , có một đỉnh hấp thụ cộng hưởng bậc hai xuất hiện tại 54,5 THz (độ hấp thụ 80%) (Hình 3.31).



**Hình 3.31.** (a) Định nghĩa bán kính uốn cong  $R$ , (b) mẫu uốn cong trong mô phỏng và (c) phổ hấp thụ của vật liệu ở trạng thái uốn cong với bán kính uốn khác nhau.

### 3.4. Kết luận chương 3

Chương này của luận án đã đạt được mục tiêu thiết kế thiết kế và khảo sát tính chất hấp thụ của H-MPA, hoạt động trong băng tần khác nhau. Cụ thể như sau:

i) Đã thiết kế và chế tạo thành công H-MPA tích hợp tụ điện, hấp thụ đa đỉnh: hai đỉnh hấp thụ cơ bản trong băng tần VHF và hai đỉnh hấp thụ bậc năm trong băng tần S. Đỉnh hấp thụ bậc cao khá nhạy với góc tới.

ii) Đã tối ưu H-MPA có cấu trúc cộng hưởng dạng vòng gấp khúc, hấp thụ đa đỉnh: đỉnh hấp thụ cơ bản tại 450 MHz (99,4%) và đỉnh hấp thụ bậc ba tại 1,47 GHz (99,8%). Khi bị uốn cong đỉnh cơ bản có độ hấp thụ giảm đáng kể, đồng thời có xuất hiện một đỉnh hấp thụ mới tại 556 MHz có cường độ tăng lên khi bán kính uốn cong giảm. Đỉnh hấp thụ bậc ba được duy trì tốt khi thay đổi bán kính uốn, tuy nhiên cũng có sự xuất hiện thêm đỉnh hấp thụ mới tại 1,48 GHz.



iii) Đã thiết kế và tối ưu hóa tính chất hấp thụ của H-MPA trong vùng THz. Bằng cách sử dụng cấu trúc gồm hai hình vuông xoay lệch nhau một góc  $45^\circ$ , độ hấp thụ đạt trên 96% tại 34,9 THz (cộng hưởng từ cơ bản) và 97,2 THz (cộng hưởng từ bậc ba). Ở trạng thái đàn hồi khác nhau (bán kính uốn cong thay đổi từ 50  $\mu\text{m}$  đến 5  $\mu\text{m}$ ), H-MPA này duy trì tốt đỉnh hấp thụ cơ bản với độ hấp thụ trên 90%.

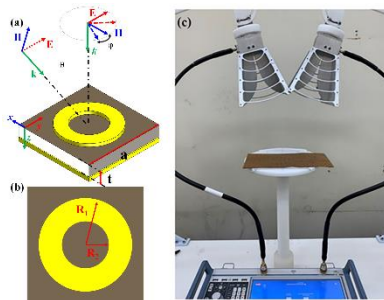
#### Chương 4. ĐẶC TRƯNG HẤP THỤ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CỘNG HƯỞNG TỪ BẬC CHẴN CÓ TÍNH NĂNG ĐÀN HỒI

Trong chương này của luận án, các kết quả quan trọng về đặc tính hấp thụ của H - MPA có tính năng đàn hồi được trình bày. Đặc biệt là các đặc trưng hấp thụ của các đỉnh cộng hưởng từ bậc chẵn phụ thuộc vào trạng thái uốn cong của vật liệu cũng được khảo sát.

##### 4.1. Đặc trưng hấp thụ của H - MPA có tính năng đàn hồi dựa trên cộng hưởng từ bậc hai

###### 4.1.1. Thiết kế cấu trúc H - MPA cộng hưởng từ bậc hai

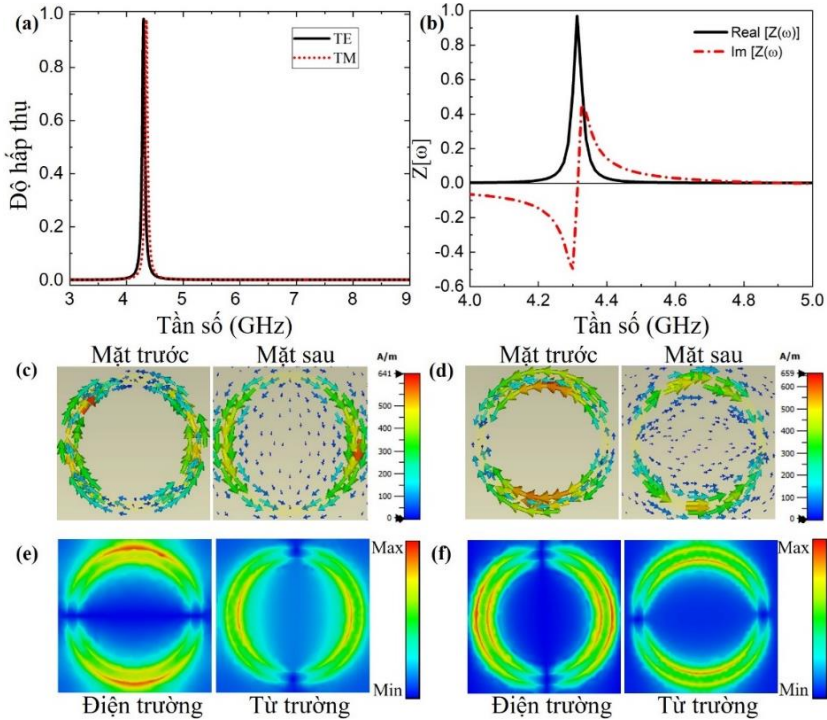
Cấu trúc vật liệu đề xuất có dạng như minh họa trên Hình 4.1, với các tham số hình học được tối ưu:  $a = 16,0$ ;  $R_1 = 7,0$ ;  $R_2 = 6,0$ ;  $t = 0,4$  mm.



**Hình 4.1.** (a) Ô cơ sở của mẫu H-MPA được đề xuất, (b) ảnh cấu trúc mặt trên của ô cơ sở, (c) thiết lập phép đo hệ số phản xạ của H-MPA chế tạo được.

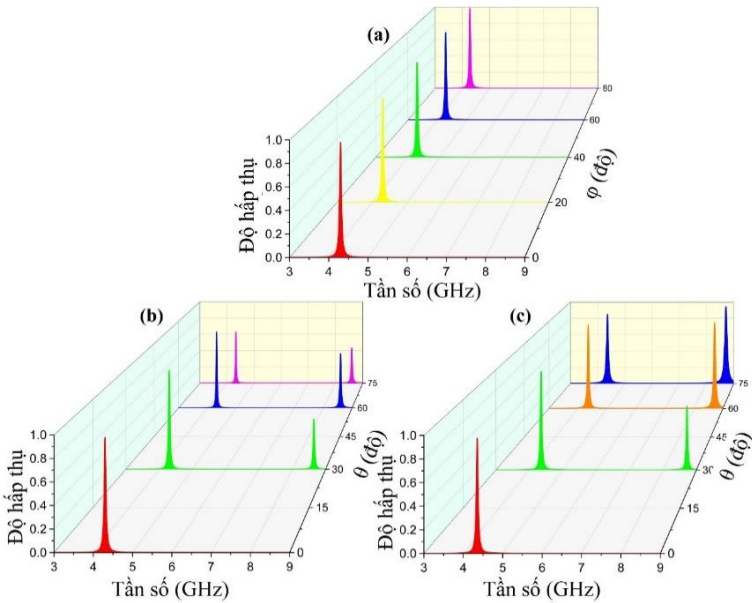
###### 4.1.2. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng bậc hai ở trạng thái phẳng

Trong cả hai trường hợp sóng điện từ phân cực TE và TM, phổ hấp thụ có một đỉnh duy nhất với độ hấp thụ 98% ở tần số 4,3 GHz. Đỉnh hấp thụ này có nguồn gốc từ cộng hưởng từ cơ bản (Hình 4.4).

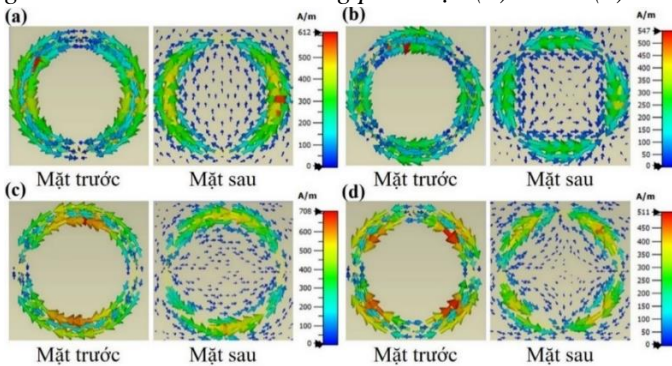


**Hình 4.4.** (a) Phổ hấp thụ mô phỏng của H-MPA, (b) trở kháng hiệu dụng cho trường hợp sóng tới phân cực TE, (c) phân bố dòng điện bề mặt và (e) phân bố điện trường và từ trường tại 4,3 GHz với sóng tới phân cực TE, (d) phân bố dòng điện bề mặt và (f) phân bố điện trường và từ trường tại 4,3 GHz với sóng tới phân cực TM.

Với cả sóng phân cực TE và TM, khi góc tới tăng từ  $0^\circ$  đến  $60^\circ$ , đỉnh hấp thụ tại 4,3 GHz vẫn được duy trì tốt với cường độ trên 90%. Bên cạnh đó, có một đỉnh hấp thụ mới xuất hiện tại 8,6 GHz với độ hấp thụ đạt 63% (TE) và tại 8,7 GHz với độ hấp thụ đạt đến 98% (TM) (Hình 4.6). Sự xuất hiện của các đỉnh hấp thụ mới này được giải thích do hiện tượng lệch pha trên bề mặt cấu trúc vòng cộng hưởng, gây ra bởi sóng tới theo phương xiên góc [43,115]. Kết quả là mode cộng hưởng bậc cao được kích thích. Từ phân bố dòng điện bề mặt trên Hình 4.7, đỉnh hấp thụ mới xuất hiện có nguồn gốc từ cộng hưởng từ bậc hai [118].



**Hình 4.6.** Phổ hấp thụ khi góc phân cực tăng từ  $0^\circ$  đến  $80^\circ$  (a), khi thay đổi góc tới từ  $0^\circ$  đến  $75^\circ$  với sóng phân cực (b) TE và (c) TM.

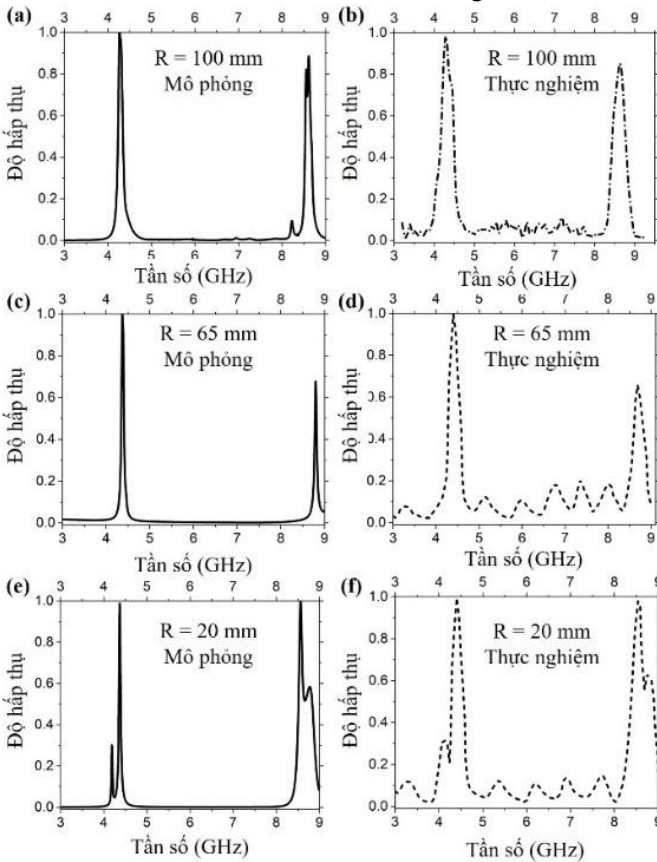


**Hình 4.7.** Phân bố dòng điện tại (a) 4,3 GHz và (b) 8,6 GHz với sóng phân cực TE, (c) 4,3 GHz và (d) 8,7 GHz ở phân cực TM.

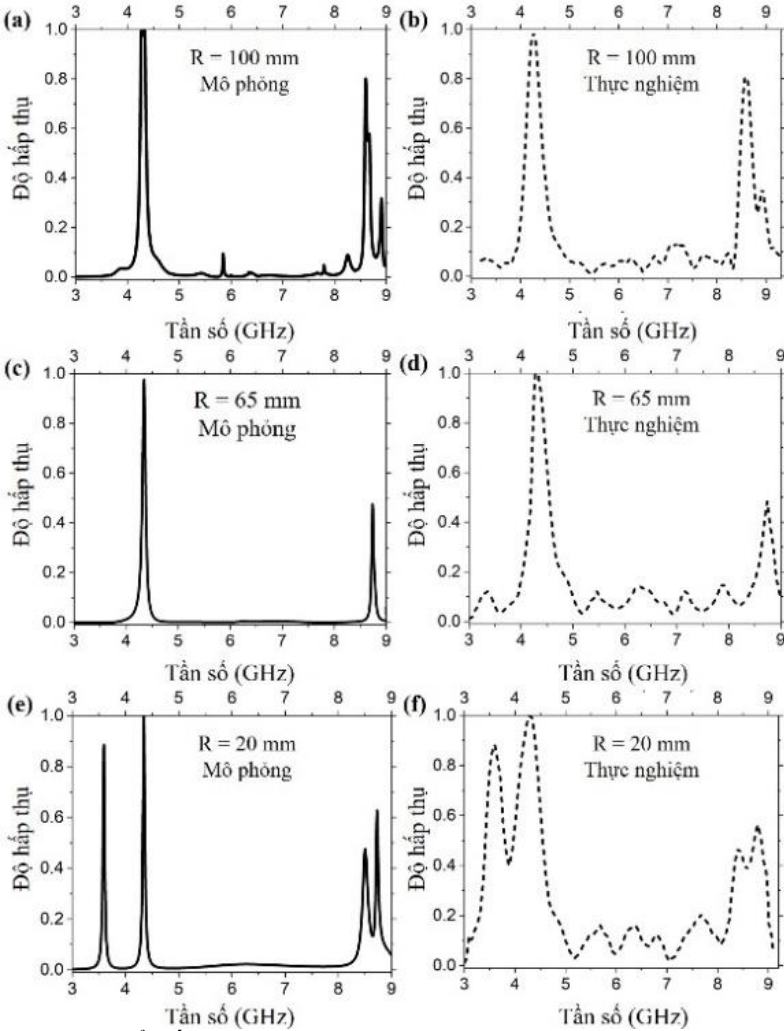
#### 4.1.3. Đặc trưng hấp thụ của H-MPA cộng hưởng từ bậc hai ở trạng thái uốn cong

Đặc trưng hấp thụ của H-MPA ở trạng thái uốn cong đã được mô phỏng và đo đạc với bán kính uốn cong  $R$  thay đổi từ 100 mm đến 20 mm. Đối với trường hợp sóng tới phân cực TE, khi uốn cong, đỉnh hấp thụ cơ bản tại

khoảng 4,3 GHz duy trì tốt với cường độ trên 99%. Khi  $R = 100$  mm, có 2 đỉnh hấp thụ mới xuất hiện tại 8,56 GHz (82,1%) và 8,62 GHz (87,3%) (mô phỏng), phổ thực nghiệm quan sát thấy một đỉnh hấp thụ mới tại 8,64 GHz (81,6%). Khi  $R = 65$  mm, có một đỉnh hấp thụ mới xuất hiện tại khoảng 8,8 GHz (67,5%) (mô phỏng), và tại 8,7 GHz (66,7%) (thực nghiệm). Khi  $R = 20$  mm, có ba đỉnh hấp thụ mới ở 4,2 GHz, 8,6 GHz và 8,8 GHz, với độ hấp thụ lần lượt là 30%, 99% và 58% (mô phỏng), và tại các vị trí 4,1 GHz (31,5%), 8,5 GHz (97,8%) và 8,7 GHz (62,8%) (thực nghiệm).



**Hình 4.10.** Phổ hấp thụ mô phỏng (a), (c), (e) và thực nghiệm (b), (d), (f) của H-MPA với bán kính uốn cong thay đổi từ  $R = 100$  mm đến  $R = 20$  mm đối với phân cực TE.



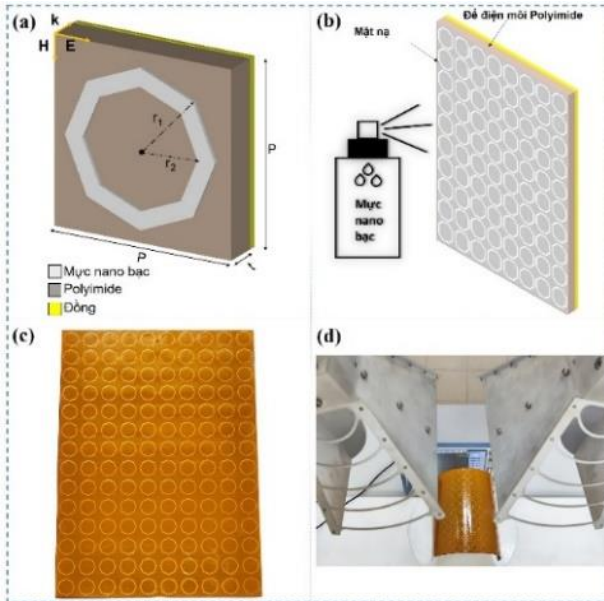
**Hình 4.11.** Phổ hấp thụ mô phỏng (a), (c), (e) và thực nghiệm (b), (d), (f) của H-MPA với bán kính uốn cong thay đổi từ  $R = 100$  mm đến  $R = 20$  mm đối với phân cực TM.

Đối với sóng phân cực TM, khi  $R = 100$  mm, có hai đỉnh hấp thụ mới tại 8,6 (80,08%) và 8,9 GHz (32%) (trong mô phỏng) và 8,6 GHz (80,1%) và 8,9 (33,7%) (thực nghiệm). Khi  $R = 65$  mm, đỉnh hấp thụ mới xuất hiện tại 8,73 GHz (46,67%) (mô phỏng) và tại 8,7 GHz (45,4%) (thực nghiệm). Khi  $R = 20$  mm, có ba đỉnh hấp thụ mới xuất hiện ở xung quanh tần số 3,6

GHz (88%), 8,5 GHz (47%) và 8,7 GHz, (62%) (mô phỏng) và tại 3,6 GHz (87%), 8,4 GHz (46%) và 8,8 GHz (55,9%) (thực nghiệm). Các đỉnh hấp thụ mới này có nguồn gốc từ cộng hưởng từ bậc hai, được kích thích do khi uốn cong, cấu trúc H-MPA trở nên bất đối xứng [118,125]. Đỉnh hấp thụ cơ bản vẫn duy trì tốt với cường độ đạt tới 99% khi bị uốn cong trong cả mô phỏng và thực nghiệm. Có thể thấy rằng kết quả mô phỏng và thực nghiệm có sự phù hợp khá tốt với nhau, cụ thể thực nghiệm đã đạt được thông số về số lượng đỉnh hấp thụ, vị trí đỉnh hấp thụ có sự sai lệch nhỏ. Tuy nhiên, độ hấp thụ thực nghiệm nhỏ hơn so với kết quả mô phỏng. Nguyên nhân gây ra sự sai khác này là do các thông số về hằng số điện môi và tổn hao điện môi của nhà sản xuất sai khác với thông số mô phỏng. Ngoài ra, quá trình chế tạo có thể gặp phải một số sai hỏng

## 4.2. Cộng hưởng từ bậc hai trong cấu trúc cộng hưởng dạng gấp khúc

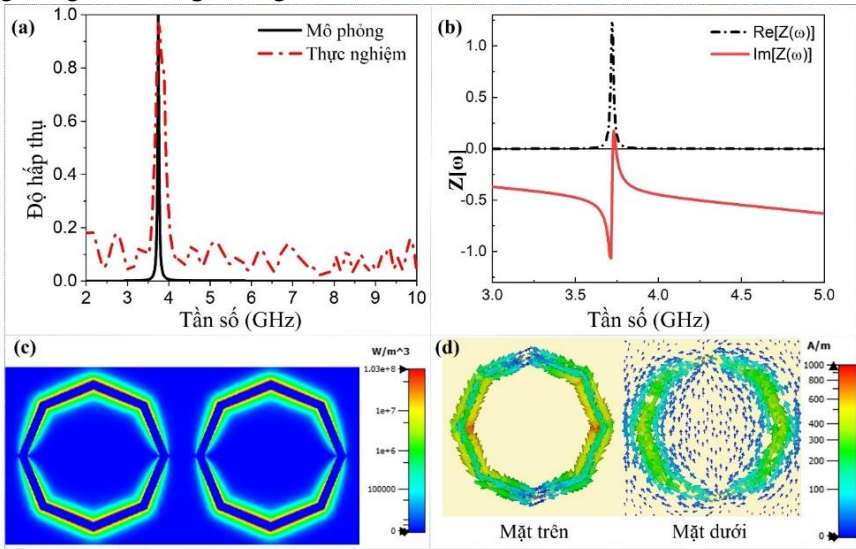
### 4.2.1. Thiết kế và chế tạo vật liệu



**Hình 4.14.** (a) Sơ đồ cấu trúc ô cơ sở của vật liệu được đề xuất, (b) quy trình chế tạo vật liệu, (c) mẫu H-MPA được chế tạo và (d) thiết lập phép đo phản xạ của mẫu vật liệu khi ở trạng thái uốn cong.

Cấu trúc cộng hưởng của vật liệu có dạng gấp khúc thành bát giác đều, làm từ mực nano bạc có độ dẫn điện  $10^7$  S/m và có độ dày 0,035 mm. Lớp giữa là điện môi polyimide và dưới cùng là lớp kim loại liên tục. Các tham số hình học bao gồm:  $r_1 = 8,5$  mm;  $r_2 = 7,5$  mm;  $t = 0,5$  mm (Hình 4.14).

Vật liệu có một đỉnh hấp thụ 3,7 GHz với độ hấp thụ đạt 99,9% theo kết quả mô phỏng và đạt 98% theo thực nghiệm. Tại tần số này, cả hệ số phản xạ và hệ số truyền qua đều đồng thời bằng 0, dẫn đến độ hấp thụ xấp xỉ 1. Tại đây, điều kiện phối hợp trở kháng được thỏa mãn. Đỉnh hấp thụ này có nguồn gốc từ cộng hưởng từ cơ bản (Hình 4.15).



**Hình 4.15.** (a) Phổ hấp thụ, phản xạ và truyền qua mô phỏng, (b) trở kháng hiệu dụng của H-MPA đề xuất, (c) mật độ tổn thất năng lượng và (d) dòng điện bề mặt ở tần số 3,7 GHz

#### 4.2.2. Ảnh hưởng của các tham số cấu trúc và sự phân cực sóng điện từ lên đặc trưng hấp thụ của vật liệu ở trạng thái phẳng

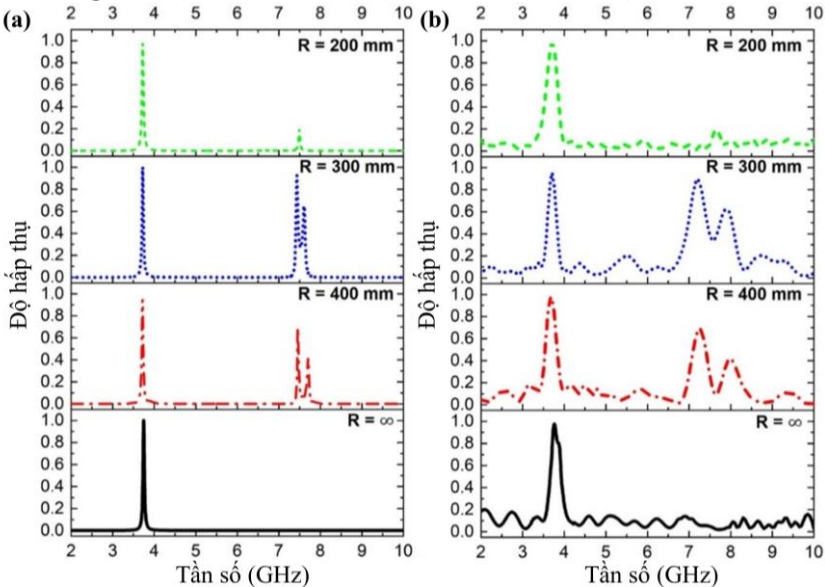
Ảnh hưởng của các tham số cấu trúc lên đặc trưng hấp thụ của vật liệu được khảo sát bằng mô phỏng. Khi độ dày lớp điện môi  $t_d$  tăng từ 0,3 đến 0,7 mm, vị trí của đỉnh hấp thụ có sự dịch chuyển nhẹ về phía tần số cao hơn. Tuy nhiên, độ hấp thụ thay đổi rõ rệt và đạt cực đại khi  $t_d = 0,5$  mm (độ hấp

thụ khoảng 99,5%). Khi độ rộng vòng cộng hưởng ( $w = R_1 - R_2$ ,  $R_1 = 8,5$  mm) tăng từ 1,0 mm đến 4,0 mm, độ hấp thụ giảm dần, đồng thời đỉnh hấp thụ bị dịch chuyển về phía tần số cao hơn.

#### 4.2.3. Cộng hưởng từ bậc hai khi sóng điện từ tới bề mặt cấu trúc theo hướng xiên góc

Với cả hai trường hợp sóng phân cực TE và TM, khi góc tới tăng tới  $60^\circ$ , đỉnh hấp thụ cơ bản ở 3,7 GHz vẫn duy trì cường độ trên 80%. Đặc biệt, có một đỉnh hấp thụ mới được tạo ra ở tần số cao hơn. Nguồn gốc của đỉnh hấp thụ mới này được làm rõ dựa trên phân bố dòng điện bề mặt cho thấy nó có nguồn gốc từ cộng hưởng từ bậc hai [118,125], tương tự như trường hợp vòng cộng hưởng hình tròn.

#### 4.2.4. Cộng hưởng từ bậc hai khi cấu trúc bị uốn cong



**Hình 4.24.** Phổ hấp thụ (a) mô phỏng và (b) thực nghiệm của H-MPA với bán kính uốn giảm dần từ  $R = \infty$  (trạng thái phẳng) đến  $R = 200$  mm.

Khi H-MPA thay đổi trạng thái biến dạng (thay đổi bán kính uốn), đỉnh cơ bản gần như không thay đổi (độ hấp thụ là 99% tại 3,7 GHz). Tuy nhiên, có hai đỉnh hấp thụ mới xuất hiện ở tần số cao hơn. Cụ thể, khi  $R = 400$  mm,



có hai đỉnh hấp thụ xuất hiện trong cả phổ mô phỏng (độ hấp thụ 69% và 41% ở tần số 7,43 GHz và 7,6 GHz) và thực nghiệm (độ hấp thụ 69% ở tần số 7,26 GHz và 40,8% ở tần số 8,0 GHz). Khi  $R = 300$  mm, độ hấp thụ cao nhất đạt được ở 7,43 GHz (92,6%) và 7,6 GHz (65%) (mô phỏng) và ở 7,2 GHz (91%) và 7,9 GHz (64,1%) (thực nghiệm). Nếu  $R = 200$  mm, hai đỉnh hấp thụ mới này bị hợp nhất thành một đỉnh duy nhất có vị trí 7,5 GHz (mô phỏng) và ở 7,6 GHz (thực nghiệm), dẫn đến độ hấp thụ bị giảm xuống chỉ còn khoảng 20%.

Từ phân bố dòng điện bề mặt tại các tần số 7,43 và 7,6 GHz trong trường hợp  $R = 300$  mm cho thấy các đỉnh hấp thụ mới ở tần số cao hơn bắt nguồn từ cộng hưởng từ bậc hai, gây ra bởi trạng thái uốn cong của cấu trúc H-MPA làm cho điện từ trường phân bố không đồng nhất trên bề mặt H-MPA [118]

### 4.3. Kết luận chương

Trong chương này, chúng tôi đã thiết kế và khảo sát đặc trưng điện từ của vật liệu H-MPA đàn hồi hấp thụ trong vùng tần số GHz với các cấu trúc cộng hưởng có dạng hình tròn và dạng gấp khúc thành hình bát giác đều. Bằng cách tối ưu hóa tham số hình học, có thể nhận được hiệu ứng cộng hưởng từ bậc hai dưới tác dụng của sóng điện từ theo phương xiên góc hoặc khi vật liệu được uốn cong.

## KẾT LUẬN

Luận án “*Nghiên cứu đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa cộng hưởng bậc cao có tính năng đàn hồi ở vùng tần số GHz*” 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 của luận án đã được công bố trên các tạp chí bao gồm: 02 bài trên tạp chí ISI, 02 bài trên tạp chí trong nước, 01 bài trong kỷ yếu hội thảo quốc gia chuyên ngành. Luận án đã hoàn thành các mục tiêu đặt ra và thu được một số kết quả chính như sau:

1. Đã làm rõ cơ chế hoạt động của các H-MPA hấp thụ đa đỉnh dựa trên cộng hưởng từ bậc cao và H-MPA đa đỉnh, có tính năng đàn hồi.

2. Đã thiết kế và chế tạo thành công một số mẫu vật liệu H-MPA đa đỉnh sử dụng hiệu ứng cộng hưởng từ bậc cao:

+ Vật liệu H-MPA có cấu trúc tích hợp tụ điện lên trên bề mặt mẫu: có hai đỉnh hấp thụ cơ bản trong băng tần VHF (0,03 – 0,3 GHz) và hai đỉnh hấp thụ bậc năm trong băng tần S (2,0 - 4,0 GHz) với độ hấp thụ trên 90%.

+ Vật liệu H-MPA có cấu trúc cộng hưởng dạng gấp khúc, hấp thụ đa đỉnh có tính năng đàn hồi: đỉnh cộng hưởng từ cơ bản trong băng tần UHF (0,3 – 1,0 GHz) và đỉnh cộng hưởng từ bậc ba trong băng tần L (1,0 - 2,0 GHz), với độ hấp thụ đạt tới 99%. Tính chất hấp thụ của đỉnh hấp thụ bậc cao được duy trì tốt trong cả hai trường hợp: vật liệu ở cấu hình phẳng và uốn cong.

+ Vật liệu H-MPA đàn hồi hoạt động trong băng tần C (4,0 – 8,0 GHz) và X (8,0 – 12,0 GHz) có hiệu ứng cộng hưởng từ bậc chẵn: bậc hai khi cấu trúc ở trạng thái uốn cong.

3. Đã mở rộng nghiên cứu cấu trúc H-MPA hoạt động trên vùng tần số THz để làm rõ sự phụ thuộc phổ hấp thụ vào trạng thái đàn hồi. Ở trạng thái phẳng, độ hấp thụ đạt trên 96% ở 34,9 THz (cộng hưởng từ cơ bản) và 97,2 THz (cộng hưởng từ bậc ba). Ở trạng thái đàn hồi khác nhau (bán kính uốn cong thay đổi từ 50  $\mu\text{m}$  đến 5  $\mu\text{m}$ ), H-MPA này duy trì tốt đỉnh hấp thụ cơ bản với độ hấp thụ trên 90%. Đặc biệt có đỉnh cộng hưởng bậc hai mới ở tần số 54,5 THz với độ hấp thụ khoảng 80% khi bán kính uốn giảm xuống 5  $\mu\text{m}$ .

### **KIẾN NGHỊ**

1. Tiếp tục cải tiến các cấu trúc cộng hưởng nhằm thu được vật liệu H-MPA đa đỉnh/dải rộng sử dụng đồng thời cộng hưởng bậc chẵn và lẻ, ổn định dưới tác động uốn cong.

2. Nghiên cứu tích hợp các vật liệu điện môi tiên tiến khác có tính đàn hồi cao vào trong cấu trúc H-MPA.

3. Nghiên cứu các định hướng ứng dụng của H-MPA trong thực tiễn như: Bộ lọc tần số và cảm biến

## DANH MỤC CÁC BÀI BÁO ĐÃ XUẤT BẢN LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Duong Thi Ha**, Vu Thi Hong Hanh, Bui Son Tung, Nguyen Thi Hien, Dinh Ngoc Dung, Bui Xuan Khuyen, LiangYao Chen, YoungPak Lee and Vu Dinh Lam, “*Ultrathin hybrid absorber based on high-order metamaterial*”, Journal of Optics **23**, 095101 (2021).
2. **Duong Thi Ha**, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Thanh Son Pham, Nguyen Thanh Tung, Nguyen Hoang Tung, Nguyen Thi Hoa, Vu Dinh Lam, Haiyu Zheng, Liangyao Chen and YoungPak Lee, “*Dual-Band, Polarization-Insensitive, Ultrathin and Flexible Metamaterial Absorber Based on High-Order Magnetic Resonance*”, Photonics **8**, 574 (2021).
3. **Duong Thi Ha**, Vankham Boudthaly, Soulima Khamsadeth, Vu Thi Hong Hanh, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Vu Dinh Lam, “*Mechanically tunable dual-band metamaterial absorber at ultra-high frequency*”, Tạp chí nghiên cứu KH&CN quân sự **84**, 93-100 (2022)
4. **Duong Thi Ha**, Bui Xuan Khuyen, Bui Son Tung, Pham Thanh Son, Vu Thi Hong Hanh, Trinh Thi Giang, Nguyen Thanh Tung and Vu Dinh Lam, “*Mechanically-tunable metamaterial for multi-band absorption*”, TNU Journal of Science and Technology **228**(14): 142 – 151 (2023).
5. **Dương Thị Hà**, Soulima KHAMSADETH, Vũ Thị Hồng Hạnh, Nguyễn Vân Ngọc, Bùi Sơn Tùng, Bùi Xuân Khuyến, Vũ Đình Lãm, “*Tối ưu hóa sự phát xạ nhiệt dải hẹp dựa trên vật liệu biến hóa có tính năng đàn hồi*”, Hội nghị Vật lý chất rắn và Khoa học vật liệu toàn quốc lần thứ 13 (SPMS 2023), 5-7/11, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam, Quyển 2, 690-697 (2023). ISBN 978-604-471-703-6.