

**BỘ GIÁO DỤC  
VÀ ĐÀO TẠO**

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

**HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ**



**Lê Thị Hồng Hiệp**

**NGHIÊN CỨU CHÉ TẠO VẬT LIỆU BIẾN HÓA CÓ  
TỪ TRƯỜNG ĐỊNH XỬ ỨNG DỤNG TRONG  
TRUYỀN DẪN NĂNG LƯỢNG KHÔNG DÂY  
Ở DẢI TẦN SỐ MHz**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT**

Ngành: Vật liệu điện tử

Mã số: 9 44 01 23

*Hà Nội – 2025*

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

Người hướng dẫn khoa học:

1. Người hướng dẫn 1: TS. Phạm Thanh Sơn, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội
2. Người hướng dẫn 2: GS.TS. Vũ Đình Lãm, Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Phản biện 1: GS.TS. Lục Huy Hoàng, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội, Bộ Giáo dục và Đào tạo.

Phản biện 2: PGS.TS. Nguyễn Văn Quy, Trường Vật liệu, Đại học Bách Khoa Hà Nội.

Phản biện 3: PGS.TS. Nguyễn Hoàng Nam, Trường Đại học Khoa học tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội.

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 ..... giờ ....., ngày ..... tháng ..... năm 2025.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

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

## MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết của luận án

Ngày nay, truyền năng lượng không dây (Wireless Power Transfer – WPT) có tiềm năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực từ quân sự tới cuộc sống hàng ngày. Căn cứ vào nguyên lý làm việc và dải tần hoạt động, WPT được chia thành: (i) WPT khoảng cách gần; (ii) WPT khoảng cách trung bình, (iii) WPT khoảng cách xa. Trong hệ thống WPT khoảng cách gần thông qua từ trường, năng lượng truyền trực tiếp từ bộ phát tới bộ thu thông qua hiện tượng cảm ứng điện từ nên gọi là WPT cảm ứng từ (Inductive Coupling - WPT – IC-WPT). Đối với WPT ở khoảng cách trung bình thông qua từ trường, năng lượng được truyền dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ giữa hai bộ cộng hưởng ở tần số cao nên gọi là WPT cộng hưởng từ (Magnetic Resonant - WPT – MR-WPT). Cơ chế vật lý của chúng có thể giải thích bởi tương tác giữa bộ phát và bộ thu thông qua từ trường có cường độ giảm dần theo khoảng cách. Gần đây, các nghiên cứu tập trung vào hệ thống MR-WPT vì lợi thế mở rộng khoảng cách truyền dẫn, tuy nhiên khoảng cách truyền dẫn, hiệu suất của hệ thống vẫn chưa đáp ứng được yêu cầu thực tế. Để thực hiện WPT trường gần, khoảng cách truyền dẫn phải nằm trong vùng trường gần, khoảng cách tới nguồn nhỏ hơn  $\lambda/2\pi$ , khi đó dải tần MHz được xác định là dải tần thích hợp. Đồng thời, các hiệp hội liên minh công nghiệp, tập đoàn, viện nghiên cứu cũng xác định dải tần MHz là dải tần hứa hẹn tiềm năng ứng dụng WPT trong nhiều lĩnh vực.

Vật liệu biến hóa là vật liệu nhân tạo có các đặc tính điện từ độc đáo mà các vật liệu thông thường không có. Vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm (Magnetic Metamaterials – MM) được chứng minh có khả năng khuếch đại từ trường tắt dần giữa hai cuộn cộng hưởng phát/thu, do đó đã được sử dụng để tăng cường hiệu suất MR-WPT. Cùng với xu thế chung của thế giới, từ 2009 hướng nghiên cứu về vật liệu biến hóa đã được GS.TS. Vũ Đình Lâm triển khai tại Viện Khoa học vật liệu. Nhóm đã tập trung giải quyết các vấn

đề: tính chất điện từ và cơ chế hoạt động của các loại vật liệu biến hoá; điều khiển linh hoạt, triển khai ứng dụng vật liệu biến hoá trong một số lĩnh vực.

Tại thời điểm xây dựng đề cương của luận án này, hướng nghiên cứu về vật liệu MM ứng dụng trong MR-WPT ở MHz đang được nhiều nhóm trên thế giới quan tâm. Trong nước, hướng nghiên cứu này cũng bắt đầu thu hút được sự quan tâm của nhóm tại Viện khoa học vật liệu và của nhóm của PGS.TS. Lê Minh Thuỳ, Đại học Bách Khoa Hà Nội. Mặc dù MR-WPT sử dụng MM đã cải thiện hiệu suất, khoảng cách truyền, nhưng vẫn tồn tại một số nhược điểm lớn: i) Hiệu suất, khoảng cách truyền vẫn còn thấp so với yêu cầu thực tế. Trong khi đó, các nghiên cứu về những tham số ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống còn chưa đầy đủ; ii) Hầu hết các cấu trúc MM ứng dụng trong MR-WPT có cấu hình phẳng nên hạn chế trong các ứng dụng yêu cầu bề mặt linh hoạt có thể uốn cong, cuộn hoặc gấp. Đồng thời hầu hết MM có cấu trúc đồng nhất nên hạn chế trong các ứng dụng yêu cầu cần định xứ từ trường; iii) MM cũng đã được nghiên cứu và ứng dụng trong lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu, tuy nhiên MM 1-D hạn chế về khả năng ứng dụng, MM 2-D đồng nhất có khả năng ứng dụng cao hơn nhưng còn hạn chế về hiệu suất do chưa có khả năng định xứ từ trường.

Do đó, luận án sẽ làm rõ bản chất vật lý của vật liệu MM ứng dụng trong WPT; khảo sát các tham số của hệ thống MR-WPT cơ bản và thiết kế chế tạo MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp ứng dụng trong tăng cường hiệu suất của hệ thống; thiết kế chế tạo các cấu trúc MM có từ trường định xứ ứng dụng trong tăng cường hiệu suất, độ linh động của hệ thống MR-WPT cũng như tăng cường lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu MM.

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

Làm rõ được bản chất điện từ của vật liệu MM ứng dụng trong hệ thống WPT ở dải tần số MHz.

Chế tạo được vật liệu biến hoá có từ trường định xứ ứng dụng trong truyền dẫn năng lượng không dây ở dải tần số MHz nhằm tăng cường hiệu

suất của hệ thống MR-WPT và tăng cường lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu.

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

Nghiên cứu tổng quan vật liệu MM, hệ thống WPT và vật liệu MM ứng dụng trong WPT ở dải tần số MHz.

Khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống MR-WPT cơ bản và thiết kế chế tạo được vật liệu MM ứng dụng trong tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT khi không có, khi có sai lệch trục hoặc/và sai lệch góc.

Nghiên cứu thiết kế, chế tạo vật liệu MM linh hoạt có từ trường định xứ và có thể uốn cong ứng dụng trong tăng cường hiệu suất hệ thống MR-WPT.

Nghiên cứu thiết kế, chế tạo vật liệu MM 2-D không đồng nhất có từ trường định xứ ứng dụng trong tăng cường lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu.

## **CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẬT LIỆU BIẾN HOÁ CÓ ĐỘ TỪ THẨM ÂM HOẠT ĐỘNG Ở DẢI TẦN SỐ MHz ỨNG DỤNG TRONG WPT**

### **1.1. Lịch sử hình thành và phát triển của WPT**

WPT biểu thị cho quá trình truyền năng lượng từ nguồn đến tải mà không cần dây dẫn, được bắt nguồn từ 1899 - khi Nikola Tesla lần đầu tiên trình diễn WPT bằng điện trường ở 150 kHz. Tuy nhiên, cho đến 2007 WPT mới được chú ý nhiều hơn khi nhóm nghiên cứu tại Viện Công nghệ Massachusetts đổi mới hướng nghiên cứu về WPT với hệ thống cộng hưởng từ ghép cặp truyền năng lượng không bức xạ hiệu quả. Sau đó, nhiều tổ chức quan tâm đến WPT được thành lập và đưa ra các tiêu chuẩn riêng. Từ đó đến nay đã có nhiều công trình đi sâu tìm hiểu cơ chế, dải tần số hoạt động, mức công suất WPT nhằm phù hợp với các ứng dụng thực tế, đồng thời giúp tăng cường hiệu suất, khoảng cách truyền và độ linh hoạt của hệ thống.

## **1.2. Phân loại, nguyên lý và một số ứng dụng của WPT**

### **1.2.1. Phân loại WPT**

a) Vùng trường gần và vùng trường xa trong lan truyền sóng điện từ

Căn cứ vào khoảng cách so với nguồn điện từ, chia thành ba vùng: trường gần, chuyển tiếp và trường xa. Khi khoảng cách đến nguồn nhỏ hơn bước sóng  $\lambda$  là vùng trường gần, gồm vùng trường gần phản ứng và vùng trường gần phát xạ. Vùng trường gần phản ứng nằm trong khoảng  $\lambda/2\pi$  so với nguồn, không xảy ra lan truyền sóng điện từ.

b) WPT trường gần

WPT trường gần được chia thành hai loại: WPT trường gần thông qua điện trường và WPT trường gần thông qua từ trường.

c) IC-WPT và MR-WPT

Hệ thống IC-WPT cung cấp nhiều giải pháp cho sạc không dây nhưng hạn chế về khoảng cách truyền dẫn. Hệ thống MR-WPT gồm bốn cuộn dây, sử dụng hai cuộn cộng hưởng ở cùng tần số để tăng cường hiệu suất hệ thống.

### **1.2.2. Nguyên lý của WPT trường gần thông qua từ trường**

Nguyên lý của IC-WPT và MR-WPT đều dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ. Sự khác biệt cơ bản là trong MR-WPT, hai cuộn cộng hưởng từ ở tần số cao không nối với nguồn và tải nên có hệ số phẩm chất cao, do đó năng lượng truyền đi được xa hơn.

### **1.2.3. Một số ứng dụng của WPT ở dải tần số MHz**

Trong những năm gần đây, WPT bắt đầu được sử dụng rộng rãi trong các ngành và các lĩnh vực khác nhau. Trong đó, vùng MHz có các dải: 2,050 – 2,150; 6,765 – 6,795 và 13,553 – 13,567 được quan tâm.

a) WPT ứng dụng trong các thiết bị điện tử dân dụng

Theo báo cáo 2020 của Hiệp hội Tòa nhà Tự động Lục địa cho thấy tiềm năng to lớn của WPT đối với các thiết bị điện tử dân dụng.

b) WPT ứng dụng trong các thiết bị điện tử đeo

Các thiết bị điện tử đeo có khả năng thu thập nhiều thông tin sinh lý khác nhau của cơ thể người, chúng đã và đang được sử dụng trong nhiều lĩnh vực. Một số nghiên cứu sử dụng WPT cho các thiết bị đeo đã được thực hiện như hệ thống WPT phân tán hiệu quả cho nhiều cảm biến đeo, găng tay, ...

c) WPT ứng dụng trong các thiết bị y tế cấy ghép

Các thiết bị y tế cấy ghép ứng dụng WPT đã được đưa vào sử dụng, làm giảm tỷ lệ mắc bệnh và cải thiện mức sống cho bệnh nhân, đồng thời giúp hiệu quả chuẩn đoán và điều trị bệnh tốt hơn.

### **1.3. Vật liệu biến hoá ứng dụng trong MR-WPT ở dải tần số MHz**

#### **1.3.1. Vật liệu biến hoá**

a) Độ điện thẩm và độ từ thẩm

Các thông số điện từ đại diện cho các đặc tính của vật liệu biến hoá (độ điện thẩm, độ từ thẩm) có thể thu được từ lý thuyết môi trường hiệu dụng và có thể thu được bằng phương pháp truy xuất thông số *S*. Năm 2004, X. D. Chen's đã đề xuất một phương pháp chính xác hơn để tính các thông số đó.

b) Vật liệu biến hoá có độ từ thẩm âm

MM thường hoạt động ở dải tần số MHz thấp và chủ yếu với từ trường. Nhờ độ từ thẩm âm, MM có khả năng khuếch đại từ trường tắt dần trong vùng trường gần nên có thể giúp cải thiện hiệu suất của hệ thống MR-WPT.

#### **1.3.2. Vật liệu MM ở dải tần số MHz ứng dụng trong MR-WPT**

a) Lịch sử nghiên cứu ứng dụng vật liệu MM trong hệ thống WPT

Việc sử dụng vật liệu MM để tăng cường hiệu suất, khoảng cách truyền dẫn của hệ thống WPT đã được thể hiện trong nhiều công bố từ năm 2010 trở lại đây.

b) Cơ chế của MR-WPT sử dụng vật liệu MM ở dải tần số MHz

Qua nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng vật liệu MM có khả năng khuếch đại từ trường tắt dần tạo ra từ cuộn cộng hưởng phát hay làm tăng số lượng đường sức từ thông gửi qua cuộn cộng hưởng thu, do đó cải thiện hiệu suất, khoảng cách truyền dẫn của hệ thống MR-WPT.

- c) Vai trò của vật liệu MM đối với hệ thống MR-WPT ở dải tần số MHz
- \* Tăng cường hiệu suất truyền dẫn

Nhiều nghiên cứu sử dụng vật liệu biến hóa để tăng hiệu suất của hệ thống MR-WPT đã được thực hiện. Wang đã tiến hành thí nghiệm đầu tiên sử dụng vật liệu biến hóa trong hệ thống MR-WPT. WPT tầm trung không đối xứng với vật liệu biến hóa đã được phát triển bởi Zeng. Hệ thống WPT không đối xứng với tấm vật liệu biến hóa không đồng nhất được thiết kế bởi Phạm và cộng sự.

- \* Bù đắp sự sai lệch

Vật liệu biến hóa là một ứng cử viên tiềm năng để bù đắp cho sự suy giảm hiệu suất do sai lệch trong hệ thống WPT. Tấm MM có thể bù đắp cho ảnh hưởng của sự sai lệch tới hiệu suất truyền dẫn.

- \* Giảm rò rỉ từ trường – tăng độ an toàn

Hiệu suất WPT phụ thuộc vào cường độ từ trường. Trường điện từ lớn tạo ra bởi các hệ thống có thể ảnh hưởng đến các linh kiện điện tử và gây hại cho con người nên cần che chắn. Che chắn bằng cấu trúc công kênh sẽ làm hệ thống nặng và không thẩm mỹ. Một bề mặt MM xây dựng từ các ô cơ sở có thể điều khiển tần số cộng hưởng đã được thiết kế bởi Ranaweera.

### **1.3.3. Lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu MM**

Vật liệu MM có thể hỗ trợ quá trình lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc của nó, mà sự lan truyền năng lượng từ trường đó được tạo ra do sự ghép cặp giữa các ô cơ sở sắp xếp theo một trật tự nhất định.

## **1.4. Kết luận chương 1**

Chương 1 của luận án đã tổng quan về WPT và việc sử dụng MM trong WPT ở dải tần số MHz và thu được một số kết luận sau:

WPT có lịch sử hơn một thế kỷ, nhưng mới chỉ phát triển trong khoảng 20 năm trở lại đây. Hệ thống MR-WPT được chứng minh có tiềm năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực, tuy nhiên vẫn tồn tại một số hạn chế về khoảng cách, hiệu suất truyền dẫn và khả năng điều chỉnh linh hoạt.



Hệ thống MR-WPT hoạt động dựa trên nguyên lý cơ bản là sự ghép cặp từ trường giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu. Vật liệu MM được chứng minh có khả năng ứng dụng trong hệ thống MR-WPT do đặc tính khuếch đại từ trường tắt dần phát ra từ cuộn cộng hưởng phát. Trên cơ sở đó, vật liệu MM sử dụng trong MR-WPT có thể giúp khắc phục các vấn đề còn tồn tại của hệ thống. Tuy nhiên, vật liệu MM đã và đang được nghiên cứu ứng dụng trong hệ thống hầu hết có cấu hình phẳng, làm từ chất nền cứng và có tính chất đồng nhất nên hạn chế trong các ứng dụng đòi hỏi khả năng điều chỉnh linh hoạt như cuộn, gấp, uốn cong hay dẫn hướng năng lượng.

## **CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU**

Trong luận án này, để nghiên cứu vật liệu MM ứng dụng trong WPT ở dải tần số MHz, chúng tôi sử dụng các phương pháp: tính toán lý thuyết và mô hình hoá, mô phỏng kết hợp với thực nghiệm.

### **2.1. Phương pháp tính toán lý thuyết và mô hình hoá**

#### **2.1.1. Mô hình hóa các thành phần trong hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM**

Hệ thống MR-WPT sử dụng MM gồm các thành phần có cấu trúc dạng cấu trúc ô cơ sở của MM hoạt động ở dải MHz thấp. Các thành phần này được mô hình hóa bằng mạch LC tương đương với tần số cộng hưởng:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 + C_{\text{ext}})}} \quad (2.1)$$

#### **2.1.2. Tính toán hiệu suất của hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM, các đặc trưng điện từ của vật liệu MM**

a) Hiệu suất của hệ thống MR-WPT: Hiệu suất của hệ thống MR-WPT được xác định và tính theo công thức (1.9) ở chương 1.

b) Độ từ thẩm của vật liệu MM: Độ từ thẩm hiệu dụng của vật liệu MM được tính theo kiểu cộng hưởng kiểu Lorentzian, được thể hiện ở công thức (1.23) trong chương 1.

## **2.2. Phương pháp mô phỏng**

Các đặc trưng điện từ của MM, của hệ thống MR-WPT được mô phỏng bằng phần mềm mô phỏng vật lý 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 MM. Trong đó, phân bố trường điện từ, mật độ dòng điện, ... được trích xuất. Từ đó, tính chất điện từ của vật liệu MM cũng như các đặc trưng của hệ thống MR-WPT được phân tích.

## **2.3. Phương pháp thực nghiệm**

### **2.3.1. Chế tạo vật liệu MM và hệ thống MR-WPT ở dải tần số MHz**

Với các vật liệu MM có cấu trúc gồm điện môi - kim loại hoạt động trong vùng MHz, phương pháp chế tạo phù hợp là phương pháp quang khắc kết hợp với phương pháp hàn, gồm 7 bước chính: tạo mặt nạ cho cấu trúc, phủ lớp cảm quang lên đế vật liệu, chiếu sáng, tẩy rửa chất cảm quang, ăn mòn lớp kim loại, loại bỏ hoàn toàn chất cảm quang và hàn (tụ điện).

### **2.3.2. Đo đạc đặc trưng của hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM ở dải tần số MHz**

Các kết quả thực nghiệm của luận án được đo bằng hệ thiết bị phân tích mạng véctor Rohde & Schwarz ZNB20 được trang bị tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Kết quả đo thể hiện dưới dạng hệ số truyền qua  $S_{21}$ .

## **2.4. Kết luận chương 2**

Chương 2 trình bày các phương pháp nghiên cứu được sử dụng trong luận án, gồm: tính toán lý thuyết và mô hình hóa, mô phỏng và thực nghiệm. Đây là các phương pháp hiệu quả trong nghiên cứu vật liệu biến hoá nói chung, vật liệu MM nói riêng và các phương pháp này đã được các nhà khoa học trong nước và quốc tế sử dụng rộng rãi, cho độ tin cậy cao.

## CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU KHẢO SÁT CÁC THAM SỐ CỦA HỆ THỐNG MR-WPT CƠ BẢN VÀ THIẾT KẾ CHẾ TẠO VẬT LIỆU MM NHẪM TĂNG CƯỜNG HIỆU SUẤT CỦA HỆ THỐNG

Chương 3 của luận án trình bày kết quả khảo sát các tham số của hệ thống MR-WPT cơ bản và kết quả thiết kế chế tạo vật liệu MM nhằm tăng cường hiệu suất của hệ thống.

### 3.1. Nghiên cứu khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống MR-WPT cơ bản

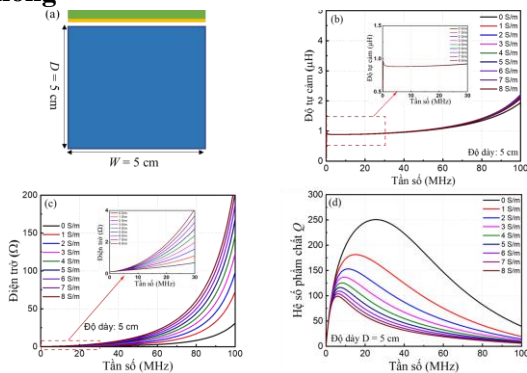
#### 3.1.1. Thiết kế hệ thống MR-WPT

Trong nghiên cứu này, chúng tôi thiết kế một hệ thống MR-WPT đối xứng, trong đó độ dẫn điện, kích thước của môi trường dẫn điện và tần số hoạt động của hệ thống có thể thay đổi được.

#### 3.1.2. Khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống MR-WPT

##### 3.1.2.1. Phân tích lý thuyết

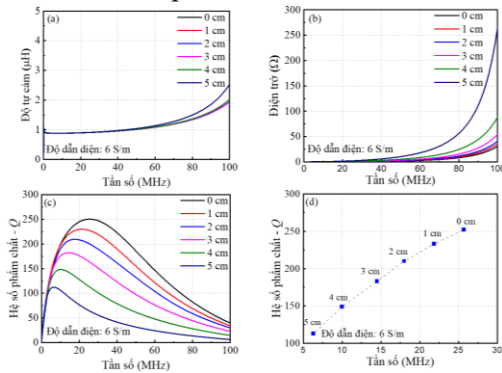
##### 3.1.2.2. Mô phỏng



Hình 3.4. (a) Sơ đồ thiết lập mô phỏng cuộn cộng hưởng đặt gần khối dẫn điện; sự phụ thuộc của các tham số của cuộn cộng hưởng theo tần số ở các độ dẫn điện khác nhau; (b) độ tự cảm  $L$ , (c) điện trở  $R$ , (d) hệ số phẩm chất  $Q$ .

Khi độ dẫn điện của môi trường tăng, điện trở của các cuộn cộng hưởng tăng, trong khi độ tự cảm chỉ thay đổi nhẹ, dẫn đến làm giảm  $Q$  hay giảm

hiệu suất của hệ thống. Tốc độ giảm của  $Q$  ở các tần số khác nhau có sự khác biệt lớn, khi độ dẫn điện của môi trường tăng, tần số để thu được  $Q$  tối đa chuyển sang một dải tần số thấp hơn.



Hình 3.5. Sự phụ thuộc của các tham số của cuộn cộng hưởng theo tần số ở các độ dày khác nhau của khối dẫn điện: (a) độ tự cảm, (b) điện trở, (c) hệ số phẩm chất và (d) hệ số phẩm chất tối đa.

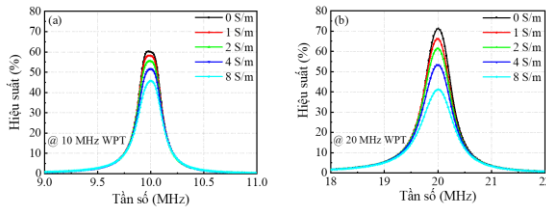
Khi chiều dày khối dẫn điện tăng, điện trở của cuộn cộng hưởng tăng, trong khi độ tự cảm thay đổi nhẹ, kết quả làm giảm  $Q$  hay làm giảm hiệu suất của hệ thống. Đồng thời, tần số để đạt được  $Q$  tối đa cũng giảm từ 25,6 xuống 6,5 MHz hay với độ dày khối dẫn điện lớn hơn đòi hỏi tần số tối ưu nhỏ hơn.

### 3.1.3. Chế tạo và thực nghiệm đo đặc hệ thống MR-WPT tại hai dải tần số khác nhau

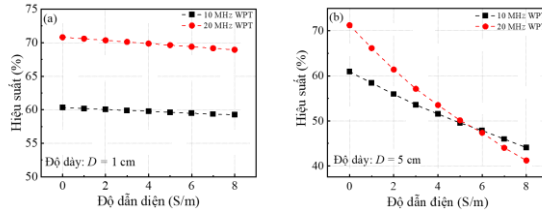
Hệ thống MR-WPT trong môi trường có độ dẫn điện thay đổi và hoạt động tại hai dải 10 MHz và 20 MHz được chế tạo và xác định hiệu suất để xác nhận các phân tích ở các phần trước.

Kết quả đo đạc cho thấy hiệu suất của các hệ thống ở dải 10 MHz giảm khi độ dẫn điện tăng từ 0, 1, 2, 4 và 8 S/m và lần lượt là 60%, 58%, 55%, 51% và 45%. Như vậy độ dẫn điện tăng dẫn đến giảm hiệu suất của hệ thống do các dòng điện xoáy trong khối dẫn điện. So sánh kết quả khảo sát của hai hệ thống có thể thấy: trong nước tinh khiết,  $Q$  của cuộn cộng hưởng ở 20 MHz lớn hơn 10 MHz, do đó, hệ thống 20 MHz thu được hiệu suất là 70%

(lớn hơn hiệu suất 60% đối với hệ thống 10 MHz). Điều này có nghĩa trong môi trường không dẫn điện, sử dụng hệ thống 20 MHz tốt hơn hệ thống 10 MHz và xu hướng ngược lại xảy ra trong môi trường dẫn điện.



Hình 3.7. Sự phụ thuộc hiệu suất đo được theo tần số hoạt động của các hệ thống MR-WPT với các độ dẫn khác nhau: (a) MR-WPT hoạt động ở dải 10 MHz, (b) MR-WPT hoạt động ở dải 20 MHz.



Hình 3.8. Sự phụ thuộc hiệu suất truyền dẫn đo được của các hệ thống MR-WPT theo độ dẫn điện trong các trường hợp: (a) độ dày khối dẫn điện là 1 cm, (b) độ dày khối dẫn điện là 5 cm.

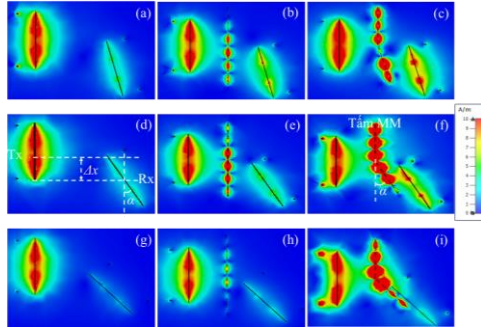
Hình 3.8(a) cho thấy hiệu suất đo được của hệ thống khi có mặt khối dẫn điện với  $D = 1$  cm và độ dẫn điện từ 0 đến 8 S/m. Kết quả cho thấy, ở cùng độ dẫn điện, hệ thống 20 MHz đạt hiệu suất cao hơn hệ thống 10 MHz. Hiệu suất hệ thống 20 MHz giảm nhanh hơn khi tăng độ dẫn điện nhưng không có sự khác biệt đáng kể. Khi chiều dày khối dẫn điện tăng, năng lượng tiêu tán trong môi trường nhiều hơn, hiệu suất của các hệ thống đều giảm đáng kể, hệ thống 20 MHz có hiệu suất giảm nhanh hơn nhiều. Ở độ dẫn điện nhỏ, hiệu suất của hệ thống 20 MHz cao hơn nhưng khi độ dẫn điện lớn hơn 6 S/m, hiệu suất của hệ thống 10 MHz cao hơn.

### 3.2. Hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp

### 3.2.1. Thiết kế hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp

Trong nghiên cứu này, một hệ thống MR-WPT đối xứng tích hợp tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp được chúng tôi đề xuất.

### 3.2.2. Mô phỏng và phân tích hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp



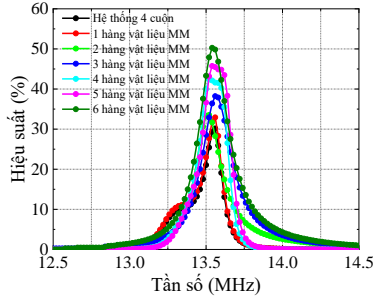
Hình 3.15. Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT khi Rx sai lệch trục  $\Delta x = 100$  mm và sai lệch góc lần lượt là  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  trong các trường hợp: (a), (d), (g) khi hệ thống không có tấm vật liệu MM; (b), (e), (h) khi hệ thống có tấm vật liệu MM thẳng; (c), (f), (i) khi hệ thống có tấm MM được gấp lệch một góc tương ứng với góc sai lệch của Rx.

Bảng 3.3. Hệ số truyền qua và hiệu suất của hệ thống MR-WPT có cuộn cộng hưởng thu Rx sai lệch trục  $\Delta x = 100$  mm, sai lệch góc  $\alpha = 15^\circ$ ,  $30^\circ$  và  $45^\circ$  sử dụng tấm vật liệu MM có thể gấp theo góc sai lệch của Rx

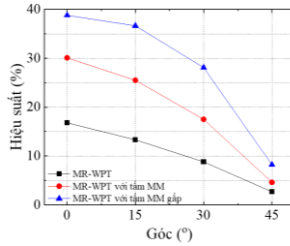
Góc lệch trục		Hệ thống MR-WPT sai lệch	Hệ thống MR-WPT sai lệch với tấm MM thẳng	Hệ thống MR-WPT sai lệch với tấm MM gấp
$15^\circ$	$S_{21}$	0,36	0,51	0,61
	$\eta$ (%)	12,96	26,01	37,21
$30^\circ$	$S_{21}$	0,29	0,42	0,54
	$\eta$ (%)	8,41	17,64	29,16
$45^\circ$	$S_{21}$	0,16	0,21	0,28
	$\eta$ (%)	2,56	4,41	7,84

Các kết quả khảo sát phân bố từ trường của các hệ thống MR-WPT có Rx sai lệch trục  $\Delta x = 100$  mm và ở các góc sai lệch khác nhau ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$  và  $45^\circ$ ) và các kết quả trích xuất hệ số truyền qua, từ đó tính toán hiệu suất của các hệ thống trong các cấu hình đó đều cho thấy sự phù hợp.

### 3.2.3. Chế tạo và thực nghiệm đo đặc hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp



Hình 3.17. Hiệu suất đo đặc của hệ thống MR-WPT ban đầu và khi sử dụng tấm vật liệu MM có thể cuộn được thả dần từng hàng ô cơ sở vật liệu MM như minh họa trong Hình 3.13 ở khoảng cách truyền dẫn  $d_{Tx-Rx} = 250$  mm.



Hình 3.20. Các đỉnh hiệu suất truyền dẫn đo được của hệ thống MR-WPT khi sai lệch trục  $\Delta x = 100$  mm và sai lệch góc  $\alpha$  lần lượt là  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  và  $45^\circ$  như minh họa ở Hình 3.15(a-i).

Kết quả đo đặc hiệu suất hệ thống MR-WPT ở khoảng cách truyền 250 mm đối với các cấu hình khác nhau cho thấy sự phù hợp với các kết quả mô phỏng về phân bố từ trường, trích xuất hệ số truyền qua, tính toán hiệu suất. Hiệu suất của hệ thống MR-WPT có Rx lệch trục  $\Delta x = 100$  mm và sai lệch ở các góc khác nhau từ  $0^\circ$  đến  $45^\circ$  được thể hiện trong Hình 3.20 có sai lệch

nhỏ so với kết quả mô phỏng ở Bảng 3.3. Các kết quả này đều chứng minh tấm MM có thể gấp linh hoạt theo hướng sai lệch của Rx có hiệu quả cao trong các ứng dụng thực tế mà ở đó Rx chịu cả sai lệch trục và sai lệch góc.

### 3.3. Kết luận chương 3

Trong chương này, chúng tôi đã khảo sát được các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống MR-WPT cơ bản trong môi trường dẫn điện; đã nghiên cứu thiết kế, chế tạo được tấm vật liệu MM nhằm tăng cường hiệu suất của hệ thống và thu được một số kết luận như sau:

i) Hiệu suất của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số MHz phụ thuộc vào hệ số phẩm chất  $Q$  của các cuộn cộng hưởng, xác định thông qua độ tự cảm  $L$  và điện trở  $R$ . Các tham số này phụ thuộc vào độ dẫn điện, kích thước của khối dẫn điện và tần số hoạt động của hệ thống. Hệ thống MR-WPT đặt trong môi trường dẫn điện, khi độ dẫn điện tăng sẽ làm tăng điện trở bức xạ của các cuộn gây ra bởi dòng điện xoáy xuất hiện trong môi trường dẫn điện ở tần số cao, làm giảm hệ số phẩm chất hay làm giảm hiệu suất của hệ thống. Với độ dày khối dẫn điện nhỏ hơn khoảng cách truyền dẫn, hệ thống hoạt động ở dải tần số cao hơn (20 MHz) thu được hiệu suất cao hơn và hiệu suất này giảm chậm khi độ dẫn điện tăng. Còn ở độ dày khối dẫn điện bằng khoảng cách truyền dẫn, tồn tại một giá trị của độ dẫn điện mà dưới giá trị đó, hệ thống hoạt động ở dải tần số cao hơn (20 MHz) đạt được hiệu suất cao hơn; trên giá trị độ dẫn điện đó, hệ thống hoạt động ở dải tần số thấp hơn (10 MHz) lại hiệu quả hơn và hiệu suất của hệ thống bị suy giảm chậm hơn khi độ dẫn điện của khối tăng.

ii) Tấm MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp đã giúp cải thiện đáng kể hiệu suất của hệ thống MR-WPT đối xứng trong cả hai trường hợp: không chịu sai lệch hoặc chịu cả sai lệch trục và sai lệch góc. Trong trường hợp sử dụng tấm dưới dạng có thể cuộn cho hệ thống không chịu sai lệch, hiệu suất của hệ thống đã được cải thiện đáng kể từ 30% khi không sử dụng tấm vật liệu MM lên 50,5% khi sử dụng toàn bộ tấm vật liệu MM ở khoảng cách

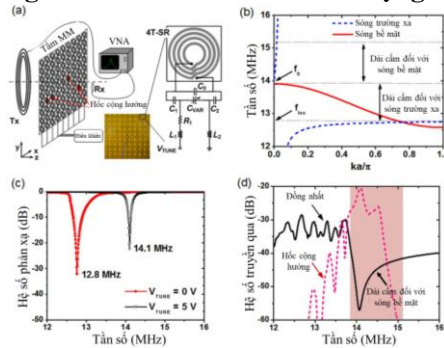


truyền dẫn 250 mm và cũng có thể cuộn một phần tấm MM để kiểm soát hiệu suất hệ thống. Trong trường hợp sử dụng tấm MM dưới dạng gấp song song với cuộn cộng hưởng thu cho hệ thống có cuộn cộng hưởng thu đồng thời chịu sai lệch trục (so với trục của cuộn cộng hưởng phát/thu ban đầu) và sai lệch góc (so với cuộn cộng hưởng phát) đã giúp cải thiện đáng kể hiệu suất hệ thống. Cụ thể, với độ lệch trục 100 mm và độ lệch góc  $30^\circ$ , tấm MM này đã giúp hiệu suất của hệ thống MR-WPT tăng từ 8,8% lên 28,1%.

## CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VẬT LIỆU MM LINH HOẠT CÓ TỪ TRƯỜNG ĐỊNH XỬ ỨNG DỤNG TRONG TĂNG CƯỜNG HIỆU SUẤT HỆ THỐNG MR-WPT

Trong chương này, luận án trình bày kết quả thiết kế, chế tạo cấu trúc vật liệu MM linh hoạt có từ trường định xứ do thiết kế hốc cộng hưởng giúp tăng cường hiệu suất, khoảng cách, khả năng ứng dụng của hệ thống.

### 4.1. Hốc cộng hưởng và cơ chế hình thành hốc cộng hưởng



Hình 4.1. (a) Sơ đồ và ảnh chụp của tấm MM chủ động với các ô cơ sở có tần số có thể điều chỉnh được. Khoảng cách giữa cuộn cộng hưởng phát Tx và tấm vật liệu MM là 20 cm (5 cm), (b) Đặc điểm tán sắc của sự lan truyền năng lượng từ trường và lan truyền sóng điện từ, (c) Hệ số phản xạ đo được của một ô cơ sở MM khi điều chỉnh điện thế  $V_{TUNE}$ , (d) Hệ số truyền qua đo được đối với tấm MM đồng nhất và tấm MM với hốc cộng hưởng (khi sử dụng cuộn cộng hưởng phát Tx và cuộn cộng hưởng thu Rx).

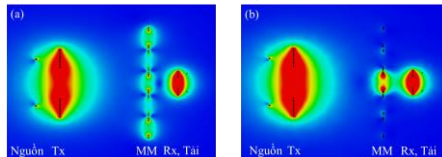
Hốc cộng hưởng hay vùng tập trung năng lượng từ trường được đề xuất nhằm kiểm soát cường độ, hình dạng của vùng định xứ từ trường. Cơ chế hoạt động như minh họa trong **Hình 4.1**. Cơ chế vật lý cho việc hình thành hốc có thể giải thích bằng hiệu ứng giao thoa Fano giữa các ô cơ sở. Giao thoa cấu trúc xảy ra khi tần số cộng hưởng của hốc cao hơn tần số của các ô cơ sở khác để từ trường định xứ trong đó. Ngược lại thì hiện tượng giao thoa triệt tiêu xảy ra, dẫn đến suy giảm từ trường. Khi tấm MM đồng nhất, các phân tử trên tấm đều cộng hưởng ở  $f_{loc}$ . Giá trị của tần số  $f_{loc}$  được lựa chọn thích hợp nhằm cho phép định xứ từ trường mạnh tại tần số  $f_0$  bằng cách cấm lan truyền năng lượng từ trường xung quanh tần số đó khi tấm MM là đồng nhất. Khi tấm MM với hốc cộng hưởng, tất cả các ô cơ sở cộng hưởng tại  $f_{loc}$  ngoại trừ ô trung tâm được điều chỉnh để cộng hưởng tại  $f_0$ . Kết quả cho một đỉnh truyền qua với cường độ cao xung quanh  $f_0$ . Như vậy, ở vị trí của các ô cơ sở khác hốc cộng hưởng, sự lan truyền sóng bề mặt bị ngăn chặn bởi dải cấm; điều này dẫn đến từ trường bị giới hạn trong hốc cộng hưởng.

## 4.2. Tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong ứng dụng trong tăng cường hiệu suất hệ thống MR-WPT

### 4.2.1. Thiết kế tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong ứng dụng trong hệ thống MR-WPT

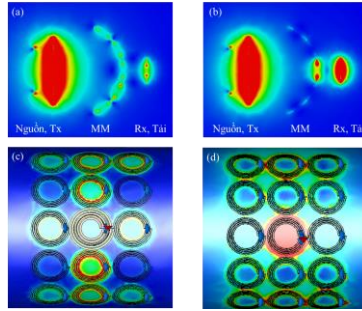
Trong nghiên cứu này, một hệ thống MR-WPT không đối xứng tích hợp tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong hoạt động ở dải tần số 13,56 MHz được chúng tôi đề xuất.

### 4.2.2. Mô phỏng hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong



Hình 4.5. Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT: (a) với tấm MM đồng nhất, (b) với tấm MM không đồng nhất.

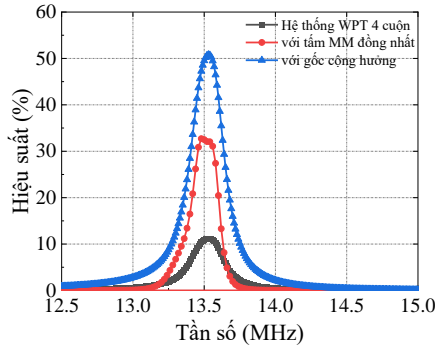
Kết quả cho thấy tấm MM không đồng nhất (có hốc cộng hưởng ở tâm tấm) giúp tăng cường cường độ từ trường gần cuộn thu, từ đó giúp tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT.



Hình 4.6. Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT sử dụng tấm MM linh hoạt: (a) tấm MM đồng nhất và (b) tấm MM không đồng nhất. Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trên tấm MM với: (c) tấm MM đồng nhất và (d) tấm MM không đồng nhất.

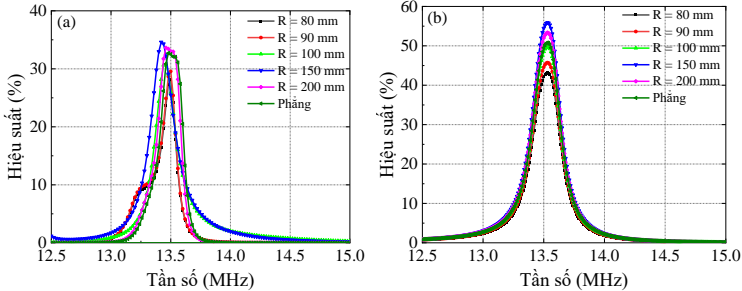
Kết quả cũng chỉ ra rằng tấm vật liệu MM đồng nhất và không đồng nhất đều có thể cải thiện hiệu suất của hệ thống khi uốn cong.

#### 4.2.3. Chế tạo và thực nghiệm đo đặc hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong



Hình 4.8. Hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT trong các trường hợp: khi không có tấm vật liệu MM (hệ thống MR-WPT 4 cuộn), khi có tấm vật liệu MM đồng nhất và khi có tấm MM với hốc cộng hưởng.

Hiệu suất đo được của các hệ thống MR-WPT ở ba cấu hình khác nhau ( $d_{\text{Tx-Meta}}$  là 150 mm và  $d_{\text{Meta-Rx}}$  là 50 mm): hệ thống ban đầu, hệ thống với tấm MM đồng nhất và hệ thống với tấm MM không đồng nhất lần lượt là 11,5%, 32,3% và 52%. Vậy với thiết kế hốc cộng hưởng tại tâm tấm MM đã giúp tăng cường đáng kể hiệu suất của hệ thống.



Hình 4.9. Hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT là hàm của tần số với các bán kính cong khác nhau khi sử dụng: (a) tấm MM vật liệu đồng nhất và (b) tấm vật liệu MM không đồng nhất.

Khi thay đổi độ cong của tấm MM, trong cả hệ thống sử dụng tấm MM đồng nhất và không đồng nhất, hiệu suất hệ thống tăng ở bán kính uốn cong lớn và giảm ở bán kính uốn cong nhỏ và đạt tối đa ở bán kính uốn cong 150 mm, lần lượt là 34,8% và 55,1%.

### 4.3. Kết luận chương 4

Trong chương này, bằng phương pháp mô phỏng và thực nghiệm, chúng tôi đã đề xuất, thiết kế, chế tạo được một cấu trúc vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong giúp tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT không đối xứng hoạt động ở tần số 13,56 MHz. Khi sử dụng tấm MM này ở cấu hình phẳng đã cải thiện đáng kể hiệu suất tối đa của hệ thống, từ 11,5% đối với hệ thống ban đầu lên 32,3% đối với hệ thống sử dụng tấm MM đồng nhất và lên 52% khi sử dụng tấm với hốc cộng hưởng. Khi sử dụng tấm MM uốn cong, tồn tại bán kính cong 150 mm mà hiệu suất cực đại của hệ thống đã tăng từ 32,3% lên 34,8% khi sử dụng tấm MM đồng nhất và đã tăng từ 52% lên 55,1% khi sử dụng tấm MM với hốc cộng hưởng tại tâm tấm.

## CHƯƠNG 5. NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VẬT LIỆU MM 2-D KHÔNG ĐỒNG NHẤT CÓ TỪ TRƯỜNG ĐỊNH XỬ ỨNG DỤNG TRONG TĂNG CƯỜNG HIỆU SUẤT LAN TRUYỀN NĂNG LƯỢNG TỪ TRƯỜNG TRONG CẤU TRÚC VẬT LIỆU

Chương 5 của luận án trình bày kết quả về thiết kế, chế tạo tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất có từ trường định xứ bằng cách sử dụng chuỗi ốc cộng hưởng nhằm tăng cường lan truyền năng lượng từ trường trong tấm.

### 5.1. Lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu MM 1-D

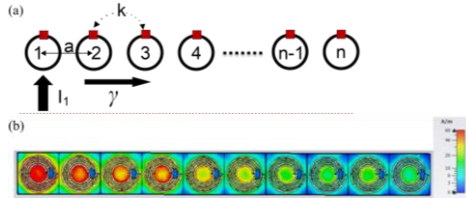
#### 5.1.1. Thiết kế ô cơ sở vật liệu MM

Tương tự như các chương trước, trong chương này vật liệu MM được đề xuất có cấu trúc ô cơ sở gồm một xoắn ốc tròn gắn thêm tụ điện ngoài.

#### 5.1.2. Đặc tính của ô cơ sở vật liệu MM

Ô cơ sở vật liệu MM được thiết kế có tần số cộng hưởng 20 MHz.

#### 5.1.3. Lan truyền năng lượng từ trường trong chuỗi ô cơ sở MM 1-D

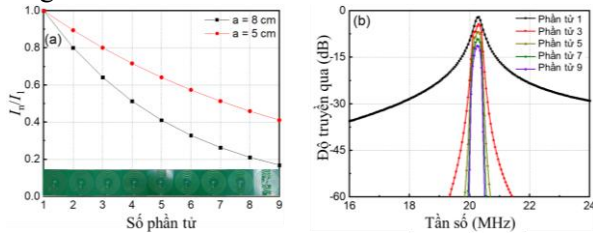


Hình 5.3. (a) Sơ đồ của chuỗi ô cơ sở vật liệu MM 1-D, (b) kết quả mô phỏng phân bố từ trường trong chuỗi 9 ô cơ sở vật liệu MM 1-D.

Phân bố từ trường trên mỗi phần tử của chuỗi MM 1-D gồm 9 cuộn cộng hưởng được khảo sát. Kết quả cho thấy từ trường tập trung trong chuỗi MM 1-D và tập trung cường độ cao ở tâm các xoắn ốc. Cường độ từ trường bị suy giảm khi ô cơ sở ở xa nguồn do sự suy giảm trên mỗi ô cơ sở MM. Vậy chuỗi MM 1-D cho thấy khả năng lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc.

Hình 5.4(b) thể hiện sự lan truyền năng lượng từ trường đo được trong chuỗi vật liệu MM. Kết quả thu được các đỉnh của độ truyền qua lần lượt là  $-1,6$ ;  $-4,03$ ;  $-6,86$ ;  $-8,98$  và  $-11,23$  dB ở 20,3 MHz khi số lượng cuộn cộng hưởng lần lượt là 1; 3; 5; 7 và 9. Do sự lan truyền năng lượng từ trường

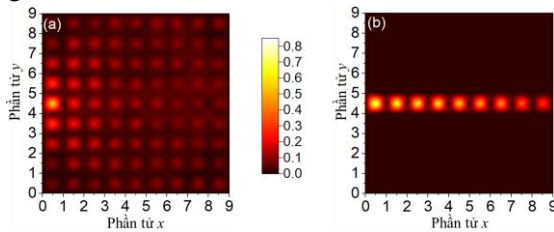
chỉ xảy ra trên bề mặt chuỗi MM ở dải MHz thấp, nên tổn hao do bức xạ có thể bỏ qua. Do đó, sự giảm năng lượng từ trường trên chuỗi MM là do tổn hao Ohmic trong các ô cơ sở MM.



Hình 5.4. (a) Kết quả tính toán tỉ lệ dòng điện của phần tử thứ  $n$  và phần tử đầu tiên, (b) hệ số truyền qua đo được ở một số phần tử trong chuỗi vật liệu MM 1-D.

## 5.2. Lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu MM 2-D không đồng nhất

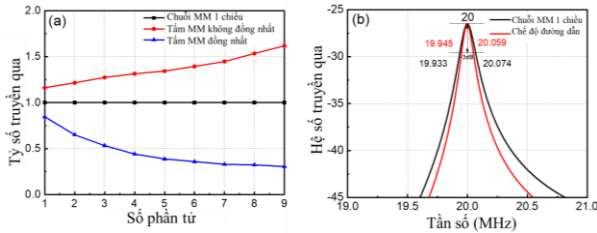
Từ chuỗi MM 1-D, tấm MM 2-D được đề xuất, gồm  $9 \times 9$  ô cơ sở. Kích thước của tấm MM 2-D là  $45 \times 45$  cm<sup>2</sup>. Cấu hình đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường được thiết kế.



Hình 5.6. Cường độ từ trường đo được ở 20,3 MHz trong: (a) tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất và (b) tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất.

Kết quả phân bố từ trường trên tấm: MM 2-D đồng nhất và MM 2-D không đồng nhất ở 20,3 MHz cho thấy từ trường mạnh được định xứ dọc theo đường dẫn thay vì phân bố trên tất cả các ô cơ sở trong tấm MM 2-D đồng nhất với cường độ yếu. Cấu hình đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường cũng có thể dễ dàng sửa đổi trong tấm MM 2-D. Cường độ truyền dẫn được thể hiện bởi tỷ số truyền qua của ba cấu hình được so sánh, trong đó, hệ số truyền qua của chuỗi MM 1-D được chọn làm giá trị chuẩn hóa.

Kết quả cho thấy, tại ô cơ sở thứ 9 trong đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường của tấm MM 2-D đồng nhất, tỷ số truyền qua là 0,31 - có nghĩa năng lượng bị rò rỉ sang các phần khác của tấm khi số phần tử ô cơ sở và gây ra sự suy giảm lớn trong quá trình lan truyền; tại ô cơ sở thứ 9 trong đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường của tấm MM 2-D không đồng nhất, tỷ số truyền qua lại đạt tới 1,62, cao hơn 5,2 lần so với trường hợp tấm MM 2-D đồng nhất.



Hình 5.7. (a) So sánh lan truyền năng lượng từ trường đo được cho ba cấu hình: chuỗi vật liệu MM 1-D (màu đen), tấm vật liệu MM đồng nhất (màu xanh), tấm vật liệu MM không đồng nhất (màu đỏ) (b) hệ số truyền qua đo được trong chế độ ghép cặp yếu để trích xuất hệ số phẩm chất của ô cơ sở vật liệu MM trong chuỗi MM 1-D và của tấm MM không đồng nhất.

### 5.3. Kết luận chương 5

Trong chương này, chúng tôi đã thiết kế, chế tạo một cấu trúc MM hoạt động ở dải MHz giúp tăng cường hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc. Cấu trúc tấm MM được đề xuất là tấm 2-D không đồng nhất gồm  $9 \times 9$  ô cơ sở MM, với đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường được tạo ra bởi chuỗi các hốc cộng hưởng được sắp xếp theo một trật tự nhất định để tăng cường lan truyền năng lượng từ trường trong đường dẫn đó. Với khả năng định xứ từ trường mạnh trong đường dẫn, hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong tấm MM 2-D không đồng nhất đã tăng 5,2 lần so với hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong tấm MM 2-D đồng nhất.

## KẾT LUẬN

Luận án “*Nghiên cứu chế tạo vật liệu biến hoá có từ trường định xứ ứng dụng trong truyền dẫn năng lượng không dây ở dải tần số MHz*” đã được thực hiện tại Học viện Khoa học và Công nghệ và Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Luận án đã tập trung nghiên cứu thiết kế, chế tạo vật liệu MM có từ trường định xứ ứng dụng trong WPT ở dải tần số MHz nhằm tăng cường hiệu suất, khoảng cách truyền dẫn và tăng khả năng ứng dụng của hệ thống trong các trường hợp thực tế như yêu cầu truyền dẫn trong môi trường dẫn điện, yêu cầu hệ thống cần linh hoạt có thể uốn cong, cuộn hoặc gấp. Những kết quả của luận án đã được công bố trên các tạp chí uy tín bao gồm: 04 bài trên tạp chí thuộc danh mục SCIE, 02 bài trên tạp chí Quốc gia, 01 bài báo đăng 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 đóng góp cho nghiên cứu về Khoa học vật liệu nói chung và lĩnh vực nghiên cứu vật liệu biến hoá nói riêng, cụ thể như sau:

1. Đã làm rõ được bản chất điện từ của vật liệu MM ứng dụng trong hệ thống MR-WPT ở dải tần số MHz. Vật liệu MM có vai trò khuếch đại từ trường tắt dần phát ra từ cuộn cộng hưởng phát, do đó tăng cường từ trường gửi qua cuộn cộng hưởng thu nên có khả năng tăng cường hiệu suất, khoảng cách truyền dẫn của hệ thống.

2. Đã khảo sát được các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số MHz trong môi trường dẫn điện. Hiệu suất của hệ thống phụ thuộc vào các tham số: hệ số phẩm chất, độ tự cảm và điện trở của các cuộn cộng hưởng. Các tham số này phụ thuộc vào độ dẫn điện, kích thước của khối dẫn điện và tần số hoạt động của hệ thống. Trong môi trường dẫn điện, khi độ dẫn điện của môi trường tăng sẽ làm tăng điện trở bức xạ của các cuộn cộng hưởng gây ra bởi dòng điện xoáy ở tần số cao, từ đó dẫn đến làm giảm hệ số phẩm chất của các cuộn hay làm giảm



hiệu suất của hệ thống. Với độ dày khối dẫn điện nhỏ hơn khoảng cách truyền dẫn, hệ thống hoạt động ở dải tần số cao hơn (20 MHz) đạt được hiệu suất cao hơn và hiệu suất này giảm chậm khi tăng độ dẫn điện. Còn ở độ dày khối dẫn điện bằng khoảng cách truyền dẫn, tồn tại một giá trị của độ dẫn điện mà dưới giá trị đó, hệ thống hoạt động ở dải tần số cao hơn (20 MHz) thu được hiệu suất cao; trên giá trị độ dẫn điện đó, hệ thống hoạt động ở dải tần số thấp hơn (10 MHz) lại hiệu quả hơn và hiệu suất của hệ thống suy giảm chậm hơn khi độ dẫn điện của khối tăng.

3. Đã thiết kế, chế tạo thành công cấu trúc vật liệu MM dạng tấm linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp, hoạt động ở dải tần số MHz ứng dụng trong hệ thống MR-WPT giúp tăng cường đáng kể hiệu suất và độ linh hoạt của hệ thống đối xứng. Sử dụng tấm MM có thể cuộn, hiệu suất của hệ thống đã tăng từ 30% khi không sử dụng tấm MM lên 50,5% khi sử dụng toàn bộ tấm MM. Sử dụng tấm MM dưới dạng gấp (gấp song song với cuộn cộng hưởng thu) đã cải thiện hiệu suất của hệ thống MR-WPT có cuộn cộng hưởng thu đồng thời chịu sai lệch trục so với trục của cuộn cộng hưởng phát/thu ban đầu và sai lệch góc so với cuộn cộng hưởng phát, với độ lệch trục là 100 mm và độ lệch góc  $30^\circ$ , hiệu suất của hệ thống đã tăng từ 8,8% lên 28,1%.

4. Đã thiết kế, chế tạo thành công cấu trúc vật liệu MM linh hoạt có từ trường định xứ với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong hoạt động ở dải tần số MHz ứng dụng trong hệ thống MR-WPT nhằm tăng cường hiệu suất và tăng độ linh hoạt của hệ thống. Cấu trúc vật liệu MM này đã cải thiện đáng kể hiệu suất cực đại của hệ thống MR-WPT: hiệu suất cực đại của hệ thống ban đầu khi chưa sử dụng tấm MM chỉ là 11,5% đã tăng lên 32,3% khi sử dụng tấm MM đồng nhất và tăng lên 52% khi sử dụng tấm MM với hốc cộng hưởng ở tâm tấm. Khi uốn cong tấm vật liệu MM, ở bán kính uốn cong tối ưu (150 mm), hiệu suất cực đại của hệ thống tăng từ 32,3% lên 34,8% khi sử dụng tấm MM đồng nhất và tăng từ 52% lên 55,1% khi sử dụng tấm MM với hốc cộng hưởng tại tâm tấm.

5. Đã thiết kế, chế tạo thành công cấu trúc vật liệu MM 2-D không đồng nhất có từ trường định xứ với chuỗi hốc cộng hưởng có thể tùy chỉnh, hoạt động ở dải tần số MHz có khả năng tăng cường sự lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu. Tấm MM này gồm  $9 \times 9$  ô cơ sở, khi có chuỗi hốc cộng hưởng đặt tại tâm tấm đã làm hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong tấm tăng 5,2 lần so với hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất.

Các kết quả nghiên cứu của luận án có thể đóng góp quan trọng cho sự phát triển trong nghiên cứu vật liệu biến hoá nói chung và trong nghiên cứu vật liệu MM nói riêng, đặc biệt trong nghiên cứu ứng dụng vật liệu MM trong các hệ thống truyền dẫn năng lượng không dây hoạt động ở dải tần số MHz.

### NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

Luận án đã tập trung giải quyết và hoàn thành các vấn đề mới về tính chất điện từ của vật liệu MM hoạt động ở dải tần số MHz ứng dụng trong truyền dẫn năng lượng không dây, cụ thể là:

i) Đã làm rõ bản chất điện từ của vật liệu MM ứng dụng trong hệ thống WPT hoạt động ở dải tần số MHz nhằm tăng hiệu suất của hệ thống.

ii) Đã khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số MHz trong môi trường dẫn điện.

iii) Đã thiết kế, chế tạo được tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp giúp tăng cường hiệu suất truyền dẫn và tăng độ linh động của hệ thống.

iv) Đã thiết kế, chế tạo được tấm vật liệu MM có từ trường định xứ và có thể uốn cong giúp tăng cường hiệu suất và tăng độ linh động của hệ thống.

v) Đã thiết kế, chế tạo được tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất có từ trường định xứ hoạt động ở dải tần số MHz với chuỗi hốc cộng hưởng giúp tăng cường hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong tấm lên 5,2 lần so với khi sử dụng tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất.

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Thanh Son Pham, Thao Duy Nguyen, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Thu Trang Hoang, Quang Minh Ngo, **Le Thi Hong Hiep** & Vu Dinh Lam, “*Optimal frequency for magnetic resonant wireless power transfer in conducting medium*”, Scientific Reports **11**, 18690 (2021).
2. **Le Thi Hong Hiep**, Thanh Son Pham, Bui Xuan Khuyen, Bui Son Tung, Quang Minh Ngo, Nguyen Thi Hien, Nguyen Thai Minh and Vu Dinh Lam, “*Enhanced transmission efficiency of magneto-inductive wave propagating in non-homogeneous 2-D magnetic metamaterial array*”, Physica Scripta **97**, 025504 (2022).
3. **Le Thi Hong Hiep**, Bui Xuan Khuyen, Bui Son Tung, Quang Minh Ngo, Vu Dinh Lam and Thanh Son Pham, “*Flexible Magnetic Metasurface with Defect Cavity for Wireless Power Transfer System*”, Materials **15**, 6583 (2022).
4. **Le Thi Hong Hiep**, Huu Nguyen Bui, Bui Son Tung, Vu Dinh Lam, Bui Xuan Khuyen, Thanh Son Pham, “*Enhanced efficiency of magnetic resonant wireless power transfer system using rollable and foldable metasurface based on polyimide substrate*”, Applied Physics A **130**, 521 (2024).
5. Thanh Son Pham, Bui Xuan Khuyen, Bui Son Tung, **Le Thi Hong Hiep**, Vu Dinh Lam, “*A critical review on wireless power transfer systems using Metamaterials*”, Vietnam Journal of Science and Technology **60** (4), 587-613 (2022).
6. **Lê Thị Hồng Hiệp**, Phạm Thanh Sơn, Bùi Xuân Khuyến, Bùi Sơn Tùng, Trần Văn Huỳnh, Vũ Đình Lãm, “*Tối ưu hiệu suất của hệ thống truyền năng lượng không dây cộng hưởng từ sử dụng hệ số phẩm chất của bộ cộng hưởng phát/thụ*”, TNU Journal of Science and Technology **228** (14), 222-229 (2023).
7. **Lê Thị Hồng Hiệp**, Phạm Thanh Sơn, Bùi Xuân Khuyến, Bùi Sơn Tùng, Trần Văn Huỳnh, Vũ Đình Lãm, “*Nghiên cứu khảo sát vị trí đặt tấm vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm nhằm tối ưu hiệu suất của hệ thống truyền năng lượng không dây cộng hưởng từ*”, Hội nghị Vật lý chất rắn và Khoa học vật liệu toàn quốc lần thứ 13 (SPMS 2023), 702-705 (2023).