BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC CÔNG NGHỆ

NGUYỄN KHÁNH VIỆT

Nghiên cứu vật liệu biến hóa dạng chuỗi một chiều chế tạo từ kim loại đồng trên đế FR-4 hoạt động tại tần số MHz ứng dụng trong truyền năng lượng không dây

LUẬN VĂN THẠC SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT
VẬT LÝ CHẤT RẮN

Hà Nội - 2025

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC CÔNG NGHỆ

NGUYỄN KHÁNH VIỆT

Nghiên cứu vật liệu biến hóa dạng chuỗi một chiều chế tạo từ kim loại đồng trên đế FR-4 hoạt động tại tần số MHz ứng dụng trong truyền năng lượng không dây

Chuyên ngành: Vật lý chất rắn

Mã số: 8 44 0104

LUẬN VĂN THẠC SĨ NGÀNH VẬT LÝ CHẤT RẮN

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

TS. Phạm Thanh Sơn

Hà Nội – 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận văn: "Nghiên cứu vật liệu biến hóa dạng chuỗi một chiều chế tạo từ kim loại đồng trên đế FR-4 hoạt động tại tần số MHz ứng dụng trong truyền năng lượng không dây" là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn khoa học của TS. Phạm Thanh Sơn. Luận văn sử dụng thông tin trích dẫn từ nhiều nguồn tham khảo khác nhau và các thông tin trích dẫn được ghi rõ nguồn gốc. Các kết quả nghiên cứu của tôi được công bố chung với các tác giả khác đã được sự nhất trí của đồng tác giả khi đưa vào luận văn. Các số liệu, kết quả được trình bày trong luận văn là hoàn toàn trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của tác giả. Luận văn được hoàn thành trong thời gian tôi làm thạc sĩ tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Hà Nội, ngày 05 tháng 05 năm 2025

Người cam đoan

Nguyễn Khánh Việt

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên, tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành và sâu sắc đến TS. Phạm Thanh Sơn, thầy đã đưa ra định hướng nghiên cứu, tận tình hướng dẫn, giải đáp những thắc mắc và tạo điều kiện thuận lợi nhất để tôi hoàn thành luận văn này.

Tôi xin cảm ơn Ban Lãnh đạo Học viện Khoa học và Công nghệ, Ban Lãnh đạo Viện Khoa học vật liệu cùng các phòng chức năng của Học viện Khoa học và Công nghệ, Phòng vật liệu biến hóa và cảm biến - Viện Khoa học vật liệu đã tạo điều kiện thuận lợi về cơ sở vật chất, hỗ trợ kinh phí và các thủ tục hành chính tốt nhất cho tôi trong suốt quá trình tôi thực hiện luận văn này.

Tôi xin chân thành cảm ơn GS. TS. Vũ Đình Lãm (Học viện Khoa học và Công nghệ) đã luôn luôn nhắc nhở, đôn đốc và đồng hành sát sao cùng tôi trong suốt quá trình học tập và thực hiện luận văn này. Sự tận tâm và những chỉ dẫn quý báu của thầy đã giúp tôi vượt qua những khó khăn, thử thách và hoàn thành luận văn một cách tốt nhất. Tôi luôn ghi nhớ và trân trọng sự hỗ trợ này.

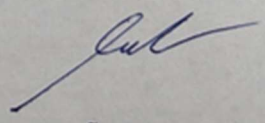
Tôi xin chân thành cảm ơn PGS. TS. Bùi Xuân Khuyến (Viện Khoa học vật liệu), TS. Bùi Sơn Tùng (Học viện Khoa học và Công nghệ), TS. Bùi Hữu Nguyên (Đại học Mỏ - Địa chất), ThS. Lê Thị Hồng Hiệp (Trường Đại học Phòng cháy chữa cháy), ThS. Nguyễn Hải Anh (Viện Khoa học vật liệu), và các anh chị em trong nhóm Meta-group đã tạo điều kiên về cơ sở vật chất, hỗ trợ kinh phí và các thủ tục hành chính tốt nhất cho tôi trong suốt quá trình thực hiện luận văn.

Tôi xin cảm ơn Phòng thí nghiệm số phục vụ đào tạo và nghiên cứu khoa học – Học viện Khoa học và Công nghệ đã hỗ trợ trang thiết bị, phần mềm bản quyền và tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình thực hiện nghiên cứu của tôi.

Cuối cùng, tôi xin cảm ơn gia đình, các cơ quan và cá nhân đã giúp đỡ, tạo điều kiện tốt để tôi hoàn thành luận văn này.

Hà Nội, ngày 05 tháng 05 năm 2025

Tác giả luận văn



Nguyễn Khánh Việt

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU 1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN QUÁ TRÌNH NGHIÊN CỨU 3
1.1. Nguyên lý truyền năng lượng không dây trường gần thông qua từ trường 3
1.1.1. Nguyên lý của truyền năng lượng không dây cảm ứng từ 3
1.1.2 Hệ thống truyền năng lượng không dây cộng hưởng từ 5
1.2. Tổng quan về vật liệu biến hóa 9
1.2.1. Vật liệu biến hóa có từ thẩm âm 10
1.2.2. Đặc tính khuếch đại sóng tắt dần của vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm 13
1.3. Sóng cảm ứng từ (MIW) lan truyền trong cấu trúc vật liệu biến hóa 15
1.3.1. Cơ sở lý thuyết về sóng cảm ứng từ 16
1.3.2. Sóng cảm ứng từ một chiều 17
1.3.3 Sóng cảm ứng từ hai chiều 22
1.4. Kết luận chương 1 22
CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU 24
2.1. Mô hình hóa cấu trúc MM bằng mạch LC 24
2.2. Phương pháp mô phỏng 25
2.3. Phương pháp thực nghiệm 28
2.3.1. Phương pháp thiết kế mạch in (PCB) 28
2.3.2. Phương pháp chế tạo 30
2.4. Kết luận chương 2 33
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG 35
3.1. Kết quả mô phỏng cấu trúc truyền năng lượng sử dụng sóng cảm ứng từ 35
3.1.1. Tần số cộng hưởng 36
3.1.2. Phân bố trường từ 37
3.1.3. Hệ số truyền qua 39
3.1.4. Đường cong tán sắc của sóng cảm ứng từ (MIW) 40
3.1.5. Tổn hao trong truyền dẫn 41
3.2. Kết luận chương 3 42
CHƯƠNG 4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM 44
4.1. Thiết kế vật liệu biến hóa dạng chuỗi một chiều 44

4.1.1. Chế tạo tấm vật liệu biến hóa 44
4.1.2. Quy trình thực nghiệm 44
4.2. Khảo sát kết quả thực nghiệm 47
4.2.1. Tần số cộng hưởng 47
4.2.2. Hệ số truyền qua 49
4.3. Kết luận chương 4 51
KẾT LUẬN 53
DANH MỤC CÔNG TRÌNH LIÊN QUAN 55
TÀI LIỆU THAM KHẢO 56

DANH MỤC HÌNH ẢNH VÀ ĐỒ THỊ

Hình 1.1. WPT cảm ứng từ: (a) hệ thống hai cuộn [3], (b) sơ đồ, (c) mô hình mạch [4], (d) các ứng dụng [5].

Hình 1.2. WPT cộng hưởng từ: (a) WPT qua khoảng cách 2,5 m [8], (b) sơ đồ của hệ thống [9], (c) Mô hình mạch tương đương và (d) Hiệu suất của hệ thống [10].

Hình 1.3. Phân loại vật liệu dựa trên độ điện thẩm (ε) và độ từ thẩm (μ) [16]

Hình 1.4. Sơ đồ cấu trúc 1 unitcell của SRR và SRRs sắp xếp trong dãy tuần hoàn [15].

Hình 1.5. Cơ chế vận hành của SRR trong việc tạo ra độ từ thẩm âm [15].

Hình 1.6. Mô hình SRR biểu diễn dưới dạng tổng quát của độ từ thẩm hiệu dụng với giả thiết vật liệu có tổn hao bằng không [15].

Hình 1.7 . (a) Ô cơ sở của MM, (b) sơ đồ của ô cơ sở, (c) hệ số phản xạ và truyền qua, (d) độ từ thẩm [19].

Hình 1.8. Sóng tắt dần được khuếch đại thông qua MM [20].

Hình 1.9. Cải thiện hiệu suất WPT bằng tấm vật liệu biến hóa: (a) hệ thống WPT khi không có tấm vật liệu MM, (b) hệ thống WPT khi có tấm vật liệu MM [1].

Hình 1.10. (a) Vòng dây gắn tụ điện, (b) Hai phần tử ghép cặp từ tính.

Hình 1.11. Mạch tương đương của một chuỗi các vòng dây gắn tụ điện. [27]

Hình 1.12. Chuỗi các vòng dây (a) có cấu hình dạng trục và (b) có cấu hình dạng phẳng.[27]

Hình 1.13. Đường cong tán sắc đối với chuỗi các vòng dây có $k = \pm 0{,}1$ và khi không có tổn hao.

Hình 1.14. Đường cong tán sắc đối với chuỗi các vòng dây cấu hình dạng trục $k = 0{,}1$ [27].

Hình 1.15. Đường cong tán sắc đối với chuỗi các vòng dây cấu hình dạng phẳng $k = - 0{,}1$. [27]

Hình 1.16. Đường cong tán sắc đối với chuỗi các vòng dây cấu hình dạng trụctrong trường hợp ghép cặp mạnh $k = 1{,}5$.

Hình 2.1. Cấu trúc ô cơ sở vật liệu MM, mô hình mạch điện LC tương đương.

Hình 2.2. Sơ đồ mục tiêu nghiên cứu.

Hình 2.3. Giao diện chương trình mô phỏng CST Studio Suite

Hình 2.4. (a) Thiết kế mạch in (PCB) cuộn phát, (b) Thiết kế mạch(PCB) in cho vòng cộng hưởng.

Hình 2.5. Hệ quang khắc đặt tại Phòng vật liệu biến hóa và cảm biến – Viện khoa học vật liệu..

Hình 2.6. Máy hàn tụ điện đặt tại Phòng vật liệu biến hóa và cảm biến – Viện khoa học vật liệu.

Hình 2.7. Quy trình chế tạo vật liệu MM.

Hình 3.1. (a) Cấu trúc phẳng (b) Cấu trúc đồng trục.

Hình 3.2. Tần số cộng hưởng 1 ô cơ sở.

Hình 3.3. Tần số cộng hưởng của hai cấu hình.

Hình 3.4. (a) phân bố từ trường cấu hình phẳng, (b) phân bố từ trường cấu hình đồng trục.

Hình 3.5. Hệ số truyền qua của hai cấu hình.

Hình 3.6. Đường cong tán sắc.

Hình 3.7. Đồ thị suy giảm và tán.

Hình 4.1. Tấm vật liệu biến hóa sau khi đã chế tạo và hàn tụ.

Hình 4.2. Máy phân tích mạng vector (Vector Network Analyzer – VNA) đặt tại Phòng vật liệu biến hóa và cảm biến – Viện Khoa học vật liệu.

Hình 4.3. Thiết lập đo cấu hình đồng trục.

Hình 4.4. Thiết lập đo cấu hình phẳng.

Hình 4.5. Tần số cộng hưởng của 1 ô cơ sở so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng.

Hình 4.6. Tần số cộng hưởng cấu hình đồng trục so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng.

Hình 4.7. Tần số cộng hưởng cấu hình phẳng so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng.

Hình 4.8. Hệ số truyền qua cấu hình đồng trục so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm.

Hình 4.9. Hệ số truyền qua cấu hình đồng phẳng so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm.

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT VÀ THUẬT NGỮ

Chữ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
MM	Metamaterials	Vật liệu biến hóa
PCB	Printed Circuit Board	Bảng mạch in
MR-WPT	Magnetic Resonance Wireless Power Transfer	Truyền năng lượng không dây cộng hưởng từ
WPT	Wireless Power Transfer	Truyền năng lượng không dây
MIW	Magneto-Inductive Wave	Sóng cảm ứng từ
CST	Computer Simulation Technology	Phần mềm mô phỏng điện từ CST
T_X	Transmitter	Cuộn cộng hưởng phát
R_X	Receiver	Cuộn cộng hưởng thu
SRR	Split-Ring Resonator	Vòng cộng hưởng có rãnh
FIT	Finite Integration Technique	Kỹ thuật phân tích hữu hạn

MỞ ĐẦU

Truyền năng lượng không dây (Wireless Power Transfer - WPT) đang ngày càng trở thành một giải pháp quan trọng trong các lĩnh vực công nghệ hiện đại. Công nghệ này cho phép truyền tải năng lượng từ nguồn đến các thiết bị tiêu thụ mà không cần sự kết nối vật lý giữa chúng, mang lại nhiều tiện ích và linh hoạt cho người sử dụng. Các ứng dụng của WPT hiện nay rất đa dạng và đang mở rộng nhanh chóng. Chúng bao gồm việc sạc không dây cho các thiết bị di động như điện thoại thông minh, máy tính bảng và các thiết bị điện tử cầm tay khác. Bên cạnh đó, công nghệ WPT còn được ứng dụng trong các hệ thống sạc không dây cho xe điện, cho phép người sử dụng xe điện sạc lại pin mà không cần phải cắm dây vào các trạm sạc. WPT còn có ứng dụng trong các thiết bị y tế [38], chẳng hạn như sạc không dây cho các máy trợ tim, thiết bị cấy ghép [37] và các thiết bị cấy ghép y tế khác [37], mang lại sự tiện lợi và an toàn cho bệnh nhân.

Ngoài ra, công nghệ này còn được áp dụng trong các hệ thống viễn thông, truyền thông không dây, đặc biệt trong các mạng cảm biến không dây (WSN) và Internet of Things (IoT), nơi việc truyền năng lượng mà không cần dây dẫn đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa thiết kế hệ thống và giảm thiểu sự phức tạp của các kết nối vật lý. Công nghệ truyền năng lượng không dây cũng đang được nghiên cứu trong các ứng dụng quân sự và không gian, nơi việc sử dụng nguồn năng lượng mà không cần kết nối vật lý là điều kiện tiên quyết để đảm bảo sự linh hoạt và hiệu quả trong các môi trường khắc nghiệt [40].

Tuy nhiên, mặc dù công nghệ WPT đã có những bước phát triển mạnh mẽ, nhưng vẫn còn tồn tại một số thách thức lớn. Một trong những vấn đề lớn nhất hiện nay là hiệu suất truyền năng lượng còn khá thấp, đặc biệt khi khoảng cách từ cuộn phát (T_X) đến cuộn thu (R_X) tăng lên. Khi khoảng cách giữa các cuộn dây phát và thu lớn, hiệu suất truyền năng lượng sẽ giảm mạnh, điều này hạn chế khả năng ứng dụng của công nghệ WPT trong các hệ thống yêu cầu khoảng cách truyền tải xa. Do đó, để công nghệ WPT có thể ứng dụng rộng rãi và hiệu quả hơn, cần phải giải quyết bài toán về hiệu suất truyền tải ở khoảng cách lớn.

Vật liệu biến hóa (Metamaterials - MM) được nghiên cứu như một giải pháp tiềm năng để giải quyết vấn đề này. Các vật liệu biến hóa là các vật liệu nhân tạo có cấu trúc đặc biệt, cho phép điều khiển và thay đổi các đặc tính điện từ như độ điện thẩm (ε) và độ từ thẩm (μ) của chúng [34]. Điều này giúp tối ưu hóa các đặc tính của sóng điện từ, đặc biệt là trong việc tăng cường và cải thiện hiệu suất truyền năng lượng không dây. Vật liệu biến hóa có thể làm thay đổi cách sóng điện từ truyền qua,

làm cho việc truyền năng lượng không dây trở nên hiệu quả hơn, đặc biệt trong các hệ thống WPT có khoảng cách truyền tải dài.

Trong luận văn này, tôi tập trung nghiên cứu và chế tạo vật liệu biến hóa sử dụng kim loại đồng trên nền chất FR-4, hoạt động tại tần số MHz, ứng dụng trong truyền năng lượng không dây. Mục tiêu nghiên cứu là tối ưu hóa cấu trúc vật liệu biến hóa nhằm nâng cao hiệu suất truyền năng lượng không dây, đặc biệt là khi khoảng cách từ cuộn phát đến cuộn thu đạt đến 50 cm. Để đạt được mục tiêu này, chúng tôi sẽ tiến hành chế tạo các cấu trúc vật liệu biến hóa phù hợp, sau đó thực hiện các thử nghiệm thực tế và so sánh kết quả thực nghiệm với kết quả mô phỏng trước đó. Các thử nghiệm này không chỉ giúp đánh giá tính khả thi của vật liệu biến hóa trong việc cải thiện hiệu suất truyền năng lượng mà còn cung cấp cơ sở để tối ưu hóa thiết kế các hệ thống truyền năng lượng không dây có phạm vi truyền tải xa hơn.

Kết quả nghiên cứu và so sánh này sẽ cung cấp những cái nhìn sâu sắc về tiềm năng ứng dụng của vật liệu biến hóa trong việc nâng cao hiệu suất của hệ thống WPT, từ đó mở rộng khả năng ứng dụng của công nghệ WPT trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt là trong các ứng dụng yêu cầu khoảng cách truyền tải dài và hiệu suất năng lượng cao.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN QUÁ TRÌNH NGHIÊN CỨU

1.1. Nguyên lý truyền năng lượng không dây trường gần thông qua từ trường

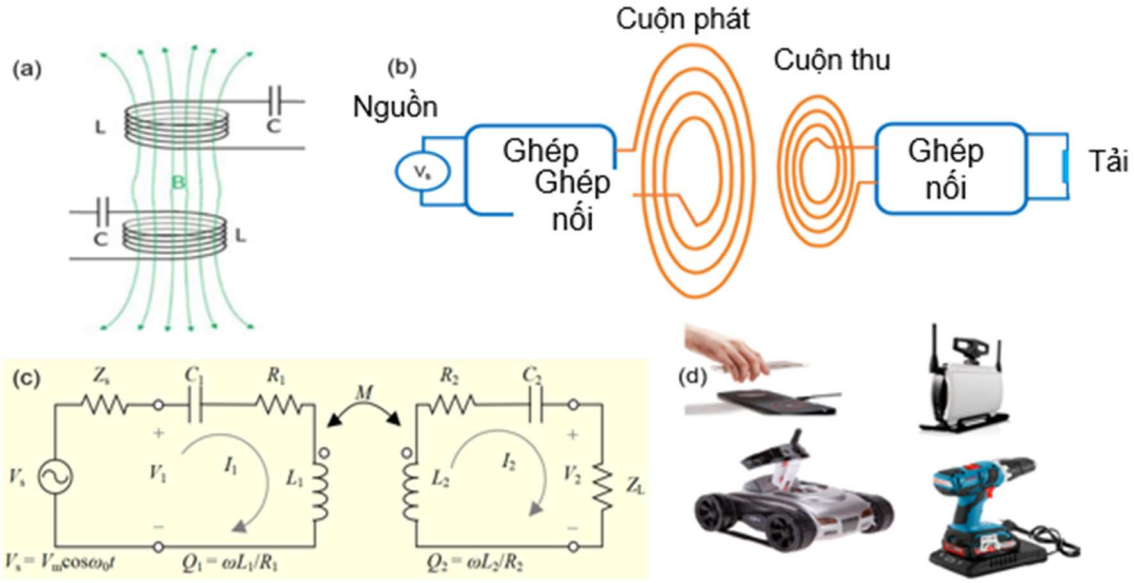
Trong bối cảnh khoa học công nghệ phát triển liên tục, công nghệ truyền tải năng lượng không dây (Wireless Power Transfer - WPT) đang được triển khai một cách rộng rãi trên nhiều loại thiết bị và linh kiện điện tử thông minh, từ điện thoại di động, máy tính xách tay đến các hệ thống sạc không dây cho phương tiện giao thông. Hệ thống WPT được xem là công nghệ ứng dụng các loại sóng để thay thế cho việc sử dụng dây dẫn vật lý trong quá trình chuyển tải năng lượng. Các phương tiện truyền dẫn được sử dụng trong hệ thống WPT gồm có sóng vô tuyến (Radio Waves), sóng vi ba (Microwaves), sóng ánh sáng (Light Waves), sóng âm thanh (Acoustic Waves) và chung nhất là sóng điện từ (Electromagnetic Waves) - loại sóng được áp dụng phổ biến nhất trong hiện tại.

Căn cứ vào cơ chế hoạt động và dải tần số sử dụng, các hệ thống truyền năng lượng không dây thường được phân thành ba nhóm: (i) truyền tầm ngắn (short-range), khi khoảng cách nhỏ hơn kích cỡ của thiết bị thu phát; (ii) truyền tầm trung bình (mid-range), khi khoảng cách lớn hơn kích cỡ thiết bị thu phát; và (iii) truyền tầm xa (long-range), với khoảng cách vượt trội đáng kể so với kích cỡ của bộ phát [1]. Nguyên lý hoạt động của các hệ truyền năng lượng tầm ngắn và tầm trung bình chủ yếu dựa vào sự tương tác trong khu vực trường gần. Đối với truyền tầm ngắn, năng lượng được chuyển đổi từ bộ phát sang bộ thu thông qua cảm ứng điện từ truyền thống, vì vậy khoảng cách truyền thường rất hạn chế so với kích cỡ thiết bị. Trái lại, đối với truyền tầm trung bình, việc chuyển tải năng lượng dựa vào hiện tượng cộng hưởng điện từ giữa hai bộ cộng hưởng hoạt động ở tần số cao, tạo điều kiện cho năng lượng được truyền đi xa hơn đáng kể. Hai cơ chế này có thể được hiểu rõ thông qua hiện tượng sóng suy giảm (evanescent wave), trong đó cường độ của sóng giảm mạnh theo sự gia tăng của khoảng cách. Trong khu vực trường gần, sự suy giảm này diễn ra rất nhanh chóng, gây ra việc giảm đáng kể hiệu quả truyền năng lượng khi khoảng cách giữa bộ phát và bộ thu được mở rộng.

1.1.1. Nguyên lý của truyền năng lượng không dây cảm ứng từ

Hệ thống WPT trong phạm vi gần và khoảng cách ngắn dựa trên nguyên lý cảm ứng điện từ. Cơ chế của WPT cảm ứng từ được minh họa trong Hình 1.1(a). Trong hệ thống này, năng lượng được truyền từ cuộn phát đến cuộn thu. Khi dòng điện xoay chiều tần số cao được đưa vào cuộn phát, từ trường dao động sẽ được tạo

ra theo định luật Ampere. Từ trường này sau đó được truyền đến cuộn thu, làm xuất hiện dòng điện xoay chiều thông qua hiện tượng cảm ứng điện từ.



Hình 1.1. WPT cảm ứng từ: (a) hệ thống hai cuộn [3], (b) sơ đồ, (c) mô hình mạch [4], (d) các ứng dụng [5].

Hệ thống WPT cảm ứng từ được minh họa chi tiết trong Hình 1(b). Để tối ưu hóa hiệu suất truyền năng lượng, hai mạch phối hợp trở kháng (matching networks) được tích hợp: một mạch nằm giữa nguồn và cuộn phát, mạch còn lại nằm giữa cuộn thu và tải. Mô hình mạch tương đương của hệ thống WPT hai cuộn được trình bày trong Hình 1.1(c), trong đó V_S là điện thế đặt vào nguồn, R_S và R_L lần lượt là điện trở nguồn và điện trở tải. Các thông số L_T, L_R và C_T, C_R lần lượt là độ tự cảm và điện dung của các cuộn dây. Do hệ thống WPT hai cuộn hoạt động ở dải tần số thấp (kHz), tổn hao do bức xạ của mỗi cuộn có thể được bỏ qua. Vì vậy, tổn hao nội tại trên các cuộn dây chủ yếu do tổn hao Ohmic, được biểu diễn trên hai giá trị R_T và R_R.

Trong việc đánh giá mức độ hiệu suất của quá trình truyền tải năng lượng, việc áp dụng mô hình mạch điện tương đương cho hệ thống WPT được thực hiện để phân tích. Bước đầu tiên cần thực hiện là việc tìm hiểu cơ chế vận hành của một đơn vị cộng hưởng đơn lẻ. Đơn vị cộng hưởng này được mô tả thông qua hai thông số cốt lõi: tần số cộng hưởng đặc trưng (ω_0) và hệ số tổn hao bên trong (Γ). Sự tương quan giữa cặp thông số này sẽ xác định ra thông số chất lượng (Q-factor) của đơn vị cộng hưởng, được biểu thị theo công thức sau:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Gamma} = \omega_0 \frac{L}{R} \tag{1.1}$$

Công thức tính hệ số phẩm chất Q trong phương trình (1.1) chỉ ra rằng việc giảm thiểu tổn thất trong mạch (R) sẽ làm gia tăng hệ số phẩm chất. Hệ số phẩm chất đóng vai trò là thông số đánh giá năng lực tích trữ năng lượng của bộ cộng hưởng

cũng như toàn bộ hệ thống WPT, do đó các bộ phận của hệ thống cần có hệ số chất lượng (Q-factor) cao để tối ưu hóa hiệu suất truyền tải năng lượng.

Dựa vào phân tích mạch điện trong Hình 1.1(c), có thể tính toán được tỉ số giữa năng lượng chuyển đến tải điện trở và năng lượng đầu vào từ nguồn cung cấp ở tần số cộng hưởng. Quan hệ này được thể hiện bằng biểu thức [4]:

$$\frac{P_L}{P_S} = \frac{4 \cdot k^2 Q_T Q_R \frac{R_S}{R_T}\frac{R_L}{R_R}}{\left[\left(1+\frac{R_S}{R_T}\right)\left(1+\frac{R_L}{R_R}\right)+k^2 Q_T Q_R\right]^2} \tag{1.2}$$

Từ phương trình (1.2), hiệu suất trên hệ thống tối ưu có thể thu được khi thỏa mãn điều kiện:

$$\frac{R_S}{R_T} = \frac{R_L}{R_R} = \sqrt{1+k^2 Q_T Q_R} \tag{1.3}$$

Tiếp theo, có thể tối ưu được hiệu suất của hệ thống WPT:

$$\eta_{opt} = \frac{k^2 Q_T Q_R}{\left(1+\sqrt{1+k^2 Q_T Q_R}\right)^2} \tag{1.4}$$

Với cấu trúc đối xứng trong hệ thống, cuộn phát và cuộn thu được thiết kế tương tự nhau, dẫn đến hệ số chất lượng Q của cả hai cuộn đều bằng nhau $Q = Q_T = Q_R$. Nhờ vậy, ta có thể đơn giản hóa phương trình (1.4) như sau:

$$\eta_{opt} = \frac{k^2 Q^2}{\left(1+\sqrt{1+k^2 Q^2}\right)^2} \tag{1.5}$$

Dựa vào phương trình (1.5) cho thấy rằng tích số kQ đóng vai trò như một thông số thiết yếu trong hệ thống truyền tải năng lượng không dây dạng cảm ứng từ. Trong đó, Q được quyết định bởi thiết kế hình học và vật liệu chế tạo cuộn dây, còn k thể hiện độ liên kết giữa cuộn truyền và cuộn nhận, thường được xem như khoảng cách truyền tải hiệu quả.

1.1.2 Hệ thống truyền năng lượng không dây cộng hưởng từ

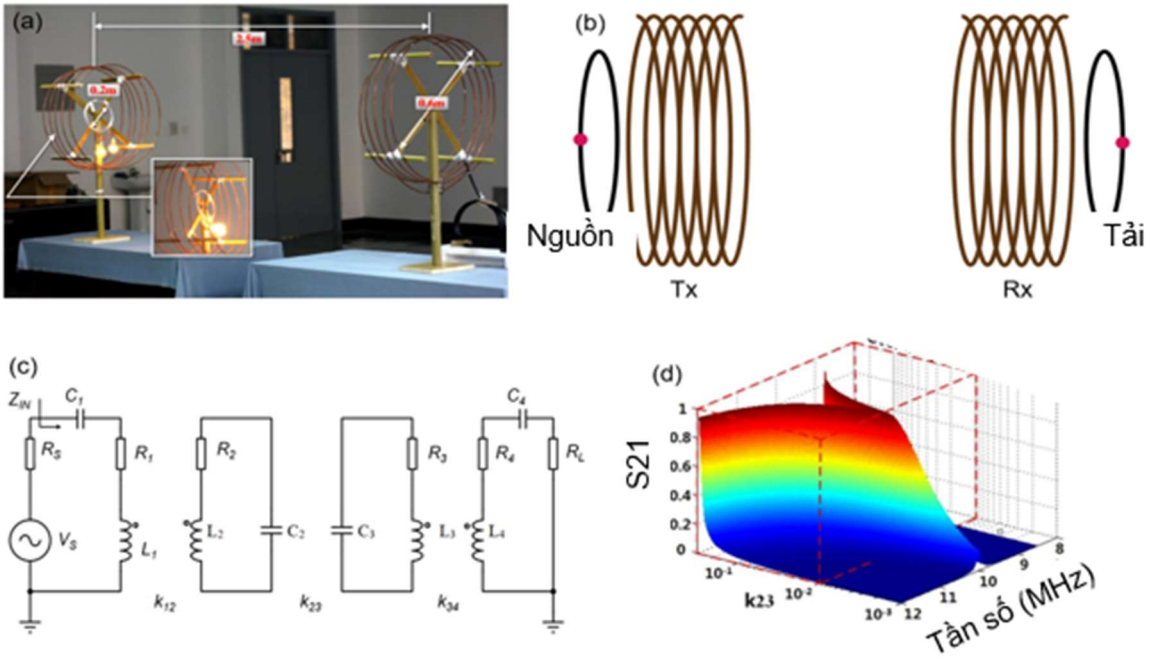
Hệ thống WPT cảm ứng từ mang lại các giải pháp hữu hiệu cho công nghệ sạc không dây. Tuy vậy, việc hạn chế về phạm vi truyền tải đã làm thu hẹp khả năng ứng dụng của hệ thống này trong điều kiện thực tế. Để giải quyết vấn đề này, nhiều công trình nghiên cứu đã được triển khai với mục tiêu nâng cao khoảng cách truyền tải của hệ thống WPT trường gần [6].

Một tiến bộ quan trọng trong lĩnh vực này được thực hiện bởi nhóm nghiên cứu của Kurs cùng đồng nghiệp tại Học viện Công nghệ Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology - MIT). Nhóm nghiên cứu này đã giới thiệu một phương pháp tiếp cận mới cho hệ thống WPT áp dụng bốn cuộn dây, trong đó hai bộ cộng hưởng được thiết kế vận hành ở cùng một tần số để tối ưu hóa hiệu quả truyền năng lượng [7]. Mô hình cải tiến này được gọi là hệ thống truyền năng lượng không dây cộng hưởng từ (Magnetic Resonance Wireless Power Transfer - MR-WPT), hay còn được biết đến như hệ thống WPT bốn cuộn (Four-coil WPT system).

Hình 1.2(a) thể hiện cách bố trí thí nghiệm truyền năng lượng không dây qua không khí với khoảng cách có thể đạt tới 2,5 m, đủ để cung cấp điện cho một bóng đèn công suất 60 W. Đồng thời, Hình 1.2(b) minh họa sơ đồ nguyên lý của hệ thống truyền năng lượng cộng hưởng từ WPT, ứng dụng hai bộ cộng hưởng liên kết. Hệ thống được cấu tạo từ bốn cuộn chính: cuộn nguồn, cuộn cộng hưởng phát (T_X), cuộn cộng hưởng thu (R_X), và cuộn tải. Cấu trúc bốn cuộn cộng hưởng này tạo điều kiện cho hệ thống duy trì hiệu suất truyền năng lượng cao ngay cả với khoảng cách lớn hơn đáng kể so với các hệ thống cảm ứng từ truyền thống, mở ra những khả năng ứng dụng mới trong lĩnh vực truyền năng lượng không dây. Trong thiết kế này, khoảng cách giữa cuộn nguồn và T_X, cũng như giữa cuộn tải và R_X, được định kích thước đủ nhỏ để tạo ra điều kiện tương tác mạnh mẽ thông qua liên kết cảm ứng từ. Khoảng cách giữa T_X và R_X xác định phạm vi truyền tải hiệu quả của hệ thống WPT cộng hưởng từ. T_X và R_X được chế tạo với cấu trúc cuộn xoắn ốc đa vòng, áp dụng vật liệu đồng chất lượng cao để thu được hệ số phẩm chất cao, từ đó tăng cường hiệu quả truyền năng lượng. Hiệu suất truyền năng lượng trong hệ thống WPT có sự phụ thuộc đáng kể vào tích số kQ. Trong hệ thống cộng hưởng từ, các bộ cộng hưởng được chế tạo với hệ số chất lượng Q rất cao. Do đó, ngay cả khi hệ số liên kết giữa các cuộn k không cao, hệ thống vẫn có khả năng đạt được hiệu quả truyền tải tối ưu. Đặc tính này góp phần cải thiện một cách đáng kể khoảng cách truyền năng lượng của hệ thống.

Hình 1.2(c) minh họa sơ đồ mạch tương đương mô tả nguyên lý vận hành của hệ thống MR-WPT. Tại phía truyền, cuộn dây nguồn được cấp nguồn bởi điện áp Vs và mắc nối tiếp với điện trở trong Rs, thể hiện tổn thất của nguồn cung cấp. Cuộn dây này được mô phỏng thông qua mạch tương đương gồm ba yếu tố cơ bản: cuộn cảm (L_1), tụ điện (C_1) và điện trở (R_1), biểu diễn tính chất cộng hưởng và suy hao của mạch truyền. Theo cách tương tự, cuộn dây cộng hưởng phía truyền T_X được thể hiện bằng mạch tương đương chứa cuộn cảm lõi không khí (L_2), tụ điện (C_2) và điện trở (R_2), mô tả tính chất cộng hưởng của thành phần truyền tải năng lượng. Hai cuộn dây L_1

và L_2 được kết nối với nhau thông qua cơ chế cảm ứng từ, được đặc tả bằng hệ số ghép cặp k_{12}, thể hiện mức độ kết nối giữa hai mạch cộng hưởng. Cấu trúc này đóng vai trò thiết yếu trong việc tạo nên hệ thống truyền năng lượng cộng hưởng từ, hỗ trợ việc truyền tải năng lượng giữa nguồn truyền và bộ phận truyền tải, đồng thời tạo ra cơ sở cho việc duy trì hiệu quả truyền cao trong khoảng cách truyền lớn hơn so với các hệ thống cảm ứng thông thường. Phần thu được cấu tạo như phần phát và kết nối với phần phát thông qua hệ số ghép cặp k_{23}, tạo thành một hệ thống truyền năng lượng đồng bộ và hiệu quả.



Hình 1.2. Hệ thống MR-WPT: (a) Hệ thống MR-WPT với khoảng cách 2,5 m từ nguồn tới cuộn phát [8], (b) sơ đồ của hệ thống [9], (c) Mô hình mạch tương đương và (d) Hiệu suất của hệ thống [10].

Để phân tích mạch trong Hình 1.2(c), dòng điện trong mỗi mạch cộng hưởng được xác bởi định luật điện áp của Kirchhoff:

$$\begin{cases} V_S = \left(R_S + R_1 + j\omega L_1 + \dfrac{1}{j\omega C_1} \right) I_1 + j\omega M_{12} I_2 \\ 0 = \left(R_2 + j\omega L_2 + \dfrac{1}{j\omega C_2} \right) I_2 + j\omega M_{12} I_1 + j\omega M_{23} I_3 \\ 0 = \left(R_3 + j\omega L_3 + \dfrac{1}{j\omega C_3} \right) I_3 + j\omega M_{23} I_2 + j\omega M_{34} I_4 \\ 0 = \left(R_L + R_4 + j\omega L_4 + \dfrac{1}{j\omega C_4} \right) I_4 + j\omega M_{34} I_3 \end{cases} \quad (1.6)$$

Trong đó: I_1, I_2, I_3, I_4 là các dòng điện tại các cuộn dây, $M_{ij} = k_{ij}\sqrt{L_i L_j}$ biểu thị việc ghép cặp lẫn nhau tại các cuộn dây, ω biểu thị cho tần số hoạt động của hệ thống MR-WPT.

Trong trường hợp hệ thống MR-WPT có tính đối xứng, cuộn nguồn và cuộn tải có cấu trúc tương đồng hoàn toàn, cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu cũng có cấu trúc tương đồng hoàn toàn. Trong trường hợp này, hệ thống sẽ có $Q_1 = Q_4$; $Q_2 = Q_3$ và $k_{12} = k_{34}$. Mối quan hệ điện áp giữa cuộn tải và cuộn nguồn đóng vai trò quan trọng trong việc xác định hiệu quả hoạt động của hệ thống:

$$\left|\frac{V_L}{V_S}\right| = \left|\frac{I_4 R_L}{I_1 R_S}\right| = \frac{k_{23} k_{12}^2 Q_1 Q_2^2}{\left(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2\right)^2 + k_{23}^2 Q_2^2} \sqrt{\frac{R_L}{R_S}} \quad (1.7)$$

Hiệu suất truyền dẫn η được định nghĩa như sau:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_L^2 / R_L}{V_S^2 / 4R_S} = \left|S_{21}\right|^2 \quad (1.8)$$

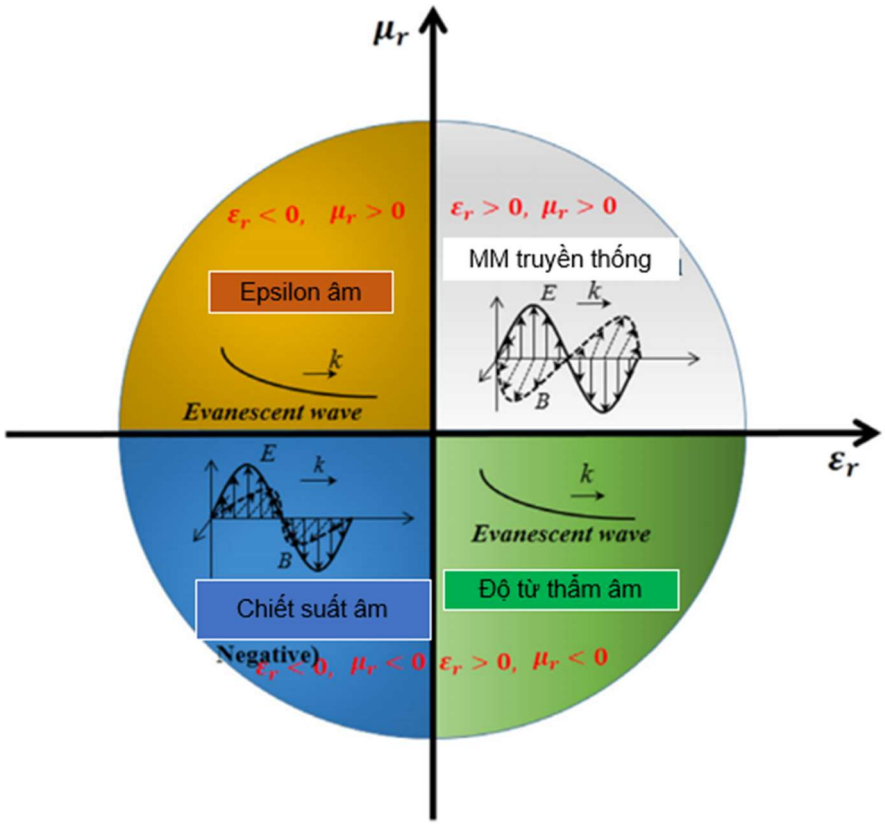
Trong đó, P_{out},, P_{in} lần lượt là công suất ra và công suất vào, S_{21} biểu thị cho hệ số truyền qua trong hệ thống WPT cộng hưởng từ.

Khi giá trị tới hạn của sự ghép cặp giữa T_X và R_X bị vượt quá, hệ thống WPT cộng hưởng từ chuyển sang chế độ quá ghép cặp. Ngược lại, nếu mức độ ghép cặp thấp hơn giá trị tới hạn, hệ thống sẽ hoạt động ở chế độ dưới ghép cặp. Ở chế độ quá ghép cặp, có thể quan sát được hiện tượng đặc trưng là sự phân tách của tần số. Hiện tượng này biểu hiện rõ ràng khi khoảng cách giữa T_X và R_X ngắn hơn điểm tới hạn. Khi khoảng cách giữa cuộn phát và cuộn thu tăng dần, mức độ phân tách của tần số hạ dần cho đến khi hai đỉnh tần số hội tụ tại một điểm - chính là điểm tới hạn. Đặc tính phân tách tần số này có ý nghĩa quan trọng trong việc thiết kế và tối ưu hóa hệ

thống MR-WPT, đặc biệt là trong việc xác định phạm vi hoạt động tối ưu và điều chỉnh tần số hoạt động để đạt được hiệu suất truyền năng lượng cao nhất.

1.2. Tổng quan về vật liệu biến hóa

Vật liệu biến hóa (Metamaterial - MM) là loại vật liệu nhân tạo có khả năng tạo ra những đặc tính điện từ độc đáo, vượt trội hơn hẳn so với các vật liệu tự nhiên, bao gồm khả năng phản xạ, khúc xạ và hấp thụ sóng điện từ theo những cách không thể đạt được bằng vật liệu thông thường [11], [12]. Khái niệm về vật liệu biến hóa lần đầu tiên được đưa ra bởi nhà khoa học Victor Veselago vào năm 1968, ông đã đề xuất một lý thuyết về vật liệu có tính chất điện thẩm (ε) và độ từ thẩm (μ) cùng âm [13]. Sau gần 30 năm, vào cuối thập niên 1990, một bước tiến quan trọng được thực hiện khi John Pendry vào năm 1996 và 1999 lần lượt chứng minh rằng vật liệu biến hóa có thể được thiết kế để tạo ra các cấu trúc với khả năng điều chỉnh độ thẩm điện và từ trong các dải tần số rộng, mở ra khả năng ứng dụng trong các lĩnh vực khác nhau. Vật liệu này đã cho thấy tiềm năng ứng dụng mạnh mẽ trong các lĩnh vực như sóng điện từ, truyền thông và điều khiển năng lượng....

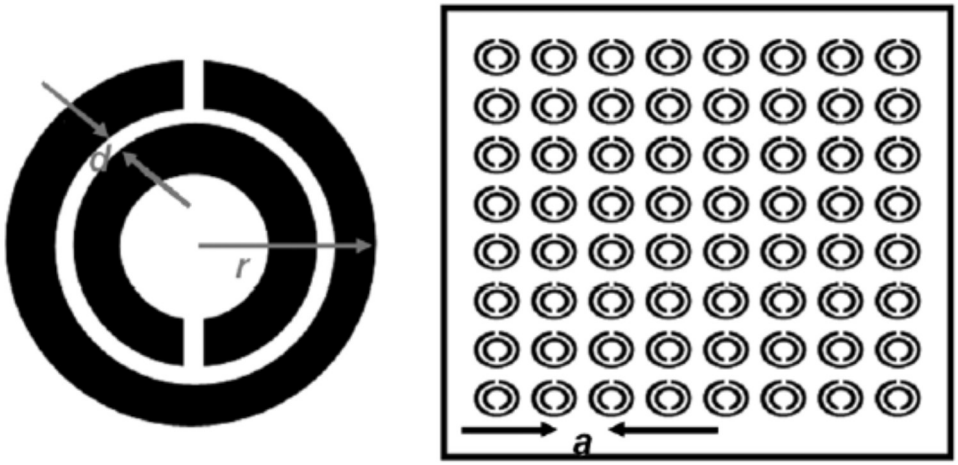


Hình 1.3. Phân loại vật liệu dựa trên độ điện thẩm (ε) và độ từ thẩm (μ) [16].

1.2.1. Vật liệu biến hóa có từ thẩm âm

Vật liệu biến hóa đã mở ra một hướng nghiên cứu mới, đầy triển vọng trong các lĩnh vực vật liệu và điện từ học. Việc có thể điều khiển các tham số cơ bản của vật liệu như độ điện thẩm (ε) và độ từ thẩm (μ) không chỉ đem lại những hiểu biết mới về mặt lý thuyết mà còn mở ra những khả năng ứng dụng trong tương lai. Đặc biệt, khả năng điều chỉnh các tính chất điện từ của vật liệu biến hóa đã thu hút sự chú ý của các nhà khoa học, khi họ phân tích chi tiết các cấu trúc và cơ chế hoạt động của các loại vật liệu biến hóa khác nhau. Một trong những thành phần quan trọng trong các nghiên cứu này là vật liệu có độ từ thẩm âm [11], đặc biệt là trong các ứng dụng liên quan đến truyền năng lượng không dây.

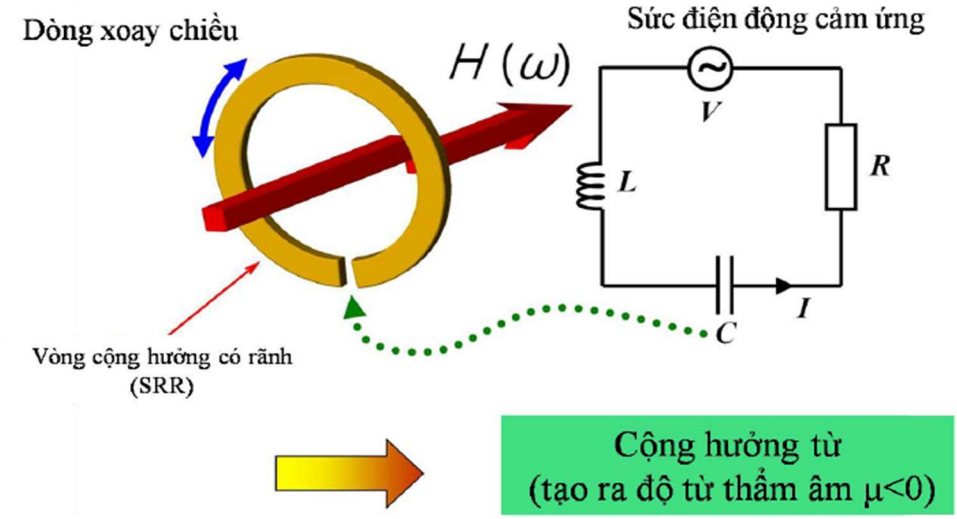
Vào năm 1999, Pendry đã đề xuất mô hình đầu tiên để tạo ra vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm [15], hoạt động trong dải tần số GHz. Mô hình này dựa trên cơ chế kích thích dòng điện trong các vòng dây cắt, từ đó tạo ra các momen lưỡng cực từ, như được minh họa trong Hình 1.4. Về cấu trúc, mô hình Pendry bao gồm một mạng lưới tuần hoàn của các vòng cộng hưởng có rãnh (Split-Ring Resonator – SRR), được sắp xếp đồng tâm. Mỗi vòng SRR này có khả năng tạo ra cộng hưởng ở bước sóng lớn hơn nhiều so với kích thước vật lý của vòng dây, mở ra các ứng dụng tiềm năng trong việc điều chỉnh các tính chất điện từ của vật liệu.



Hình 1.4. Sơ đồ cấu trúc của SRR và các SRR sắp xếp trong dãy tuần hoàn [15].

Hình 1.5 minh họa cách thức hoạt động của SRR trong việc hình thành độ từ thẩm âm. Khi một từ trường biến thiên theo phương trục của SRR được áp dụng, nó gây ra dòng điện cảm ứng trong vòng cộng hưởng. Dòng điện này đồng thời sinh ra một lưỡng cực từ. Ở tần số thấp hơn tần số cộng hưởng ω_0, lưỡng cực từ biến thiên theo tần số và dao động cùng pha với trường ngoài, biểu hiện tính thuận từ. Khi tần số tiến gần ω_0, dòng điện không còn theo kịp trường và bắt đầu lệch pha. Vượt qua

tần số cộng hưởng, lưỡng cực từ trở nên ngược pha hoàn toàn với trường kích thích, khiến SRR thể hiện tính nghịch từ. Gần ω_0, đặc tính nghịch từ được tăng cường đáng kể, làm cho từ thẩm có thể đạt giá trị âm ($\mu < 0$).



Hình 1.5. Cơ chế vận hành của SRR trong việc tạo ra độ từ thẩm âm [15].

Độ từ thẩm hiệu dụng của mô hình SRR được tính như sau:

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega\mu_0} - \frac{3}{\pi^2\mu_0\omega^2 C r^3}} \tag{1.9}$$

trong đó:

$$F = \frac{\pi r^2}{a^2} \tag{1.10}$$

$$C = \frac{\varepsilon_0}{d} = \frac{1}{dc_0^2\mu_0} \tag{1.11}$$

Ở đây, F là thể tích của một ô mạng, r là bán kính vòng ngoài, a là hằng số mạng, d là khoảng cách giữa hai vòng đơn, c_0 là vận tốc ánh sáng trong chân không.

Ta có thể viết lại độ từ thẩm hiệu dụng như sau:

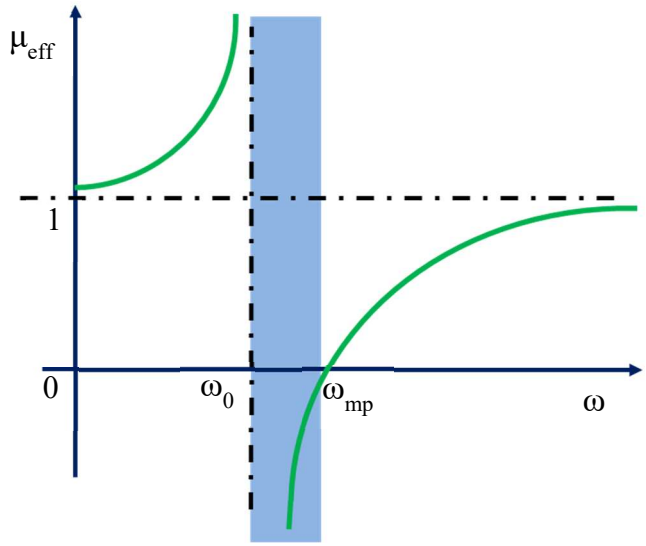
$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a^2}}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega r\mu_0} - \frac{3dc_0^2}{\pi^2\omega^2 r^3}} \tag{1.12}$$

Thiết kế vòng cộng hưởng có khe hở SRR (Hình 1.5) sinh ra dung kháng trong hệ thống, gây nên hiện tượng cộng hưởng từ và độ từ thẩm hiệu dụng mang giá trị âm ($\mu < 0$). Biểu hiện chung của độ từ thẩm hiệu dụng cho mô hình SRR trong điều kiện lý tưởng khi vật liệu không có tổn hao được minh họa trong Hình 1.6 [15]. Dải tần số có độ từ thẩm âm ($\mu < 0$) ở khu vực giữa tần số cộng hưởng ω_0 (tại đó độ từ thẩm hiệu dụng có giá trị phân kỳ, tương đương với tần số cộng hưởng mạch LC) và tần số plasma từ ω_{mp} được thể hiện trong Hình 1.6. Tại đó:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3}{\pi^2 \mu_0 C r^3}} = \sqrt{\frac{3dc_0^2}{\pi^2 r^3}} \tag{1.13}$$

Khi tần số có giá trị vượt quá ω_0, cảm ứng từ tại thời điểm này sẽ bắt đầu có pha ngược lại so với trường kích thích. Cùng lúc đó, độ từ thẩm hiệu dụng sẽ có giá trị âm từ tần số cộng hưởng đến tần số "plasma từ". Tần số plasma từ được biểu diễn:

$$\omega_{mp} = \sqrt{\frac{3}{\pi^2 \mu_0 C r^3 (1-F)}} = \sqrt{\frac{3dc_0^2}{\pi^2 r^3 (1-\frac{\pi r^2}{a^2})}} \tag{1.14}$$



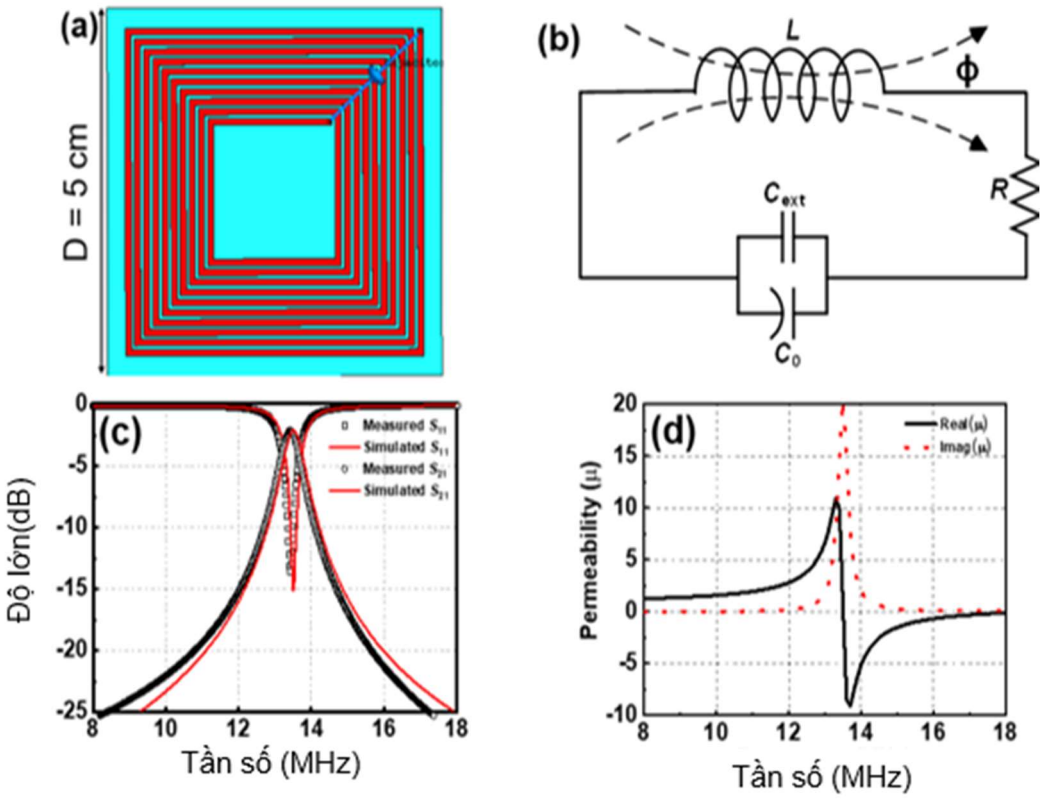
Hình 1.6. Mô hình SRR biểu diễn dưới dạng tổng quát của độ từ thẩm hiệu dụng với giả thiết vật liệu có tổn hao bằng không [15].

Các biểu thức ω_0 và ω_{mp} chứng minh rằng đặc tính từ thẩm âm có sự phụ thuộc đáng kể vào các thông số cấu trúc SRR. Điều này cho phép điều chỉnh các thông số này để đạt được tần số cộng hưởng và tần số plasma từ theo yêu cầu cụ thể. Chính sự linh hoạt này khiến vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm trở nên đặc biệt thích hợp cho nhiều ứng dụng và dải tần hoạt động.

Hình 1.7 thể hiện chi tiết về một vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm. Trong Hình 1.7(a), thiết kế cấu trúc của một ô cơ sở vật liệu biến hóa được biểu diễn gồm có một đơn vị cộng hưởng kiểu xoắn ốc, được tích hợp với tụ điện phụ trợ bên ngoài. Sơ đồ mạch điện tương đương của ô cơ sở này được thể hiện trong Hình 1.7(b), kèm theo các thông số bao gồm: độ tự cảm L = 0,95 µH, điện dung bên trong của cấu trúc xoắn ốc C_0 = 5,05 pF, điện dung của tụ điện bổ sung bên ngoài C_{ext} = 15 pF, và thông số R thể hiện tổn thất Ohmic xuất hiện trong cuộn xoắn ốc.

Tần số cộng hưởng của ô cơ sở của MM có thể tính toán theo công thức:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(C_0 + C_{ext}\right)}} . \tag{1.18}$$

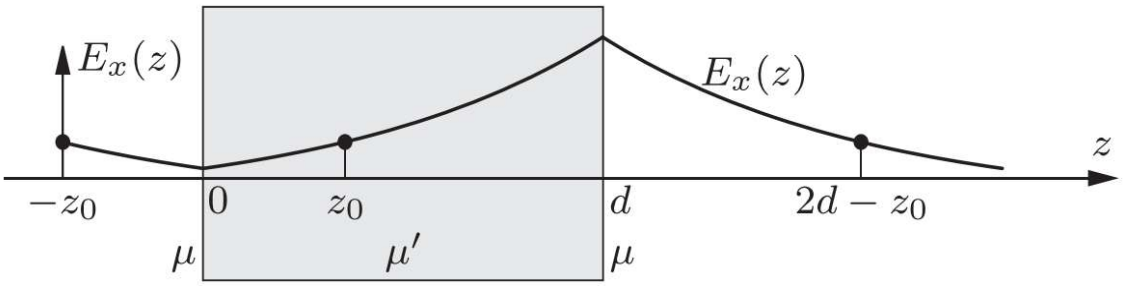


Hình 1.7 . (a) Ô cơ sở của MM, (b) sơ đồ của ô cơ sở, (c) hệ số phản xạ và truyền qua, (d) độ từ thẩm [19].

1.2.2. Đặc tính khuếch đại sóng tắt dần của vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm

Đặc tính khuếch đại sóng tắt dần này của vật liệu biến hóa mở ra tiềm năng ứng dụng để nâng cao hiệu suất trong các hệ thống truyền năng lượng không dây. Hình 1.8 minh họa hiện tượng khuếch đại sóng tắt dần trong vật liệu MM. Khi xem

xét trên trục *Oz* đặt vuông góc với bề mặt của tấm MM, từ điểm $z = 0$ đến điểm $z = d$, ta quan sát thấy độ từ thẩm âm giảm dần.



Hình 1.8. Sóng tắt dần được khuếch đại thông qua MM [20].

Các hệ số truyền qua và hệ số phản xạ tại các điều kiện biên tương ứng với $z = 0$ và $z = d$ có thể được xác định thông qua tính toán [21]:

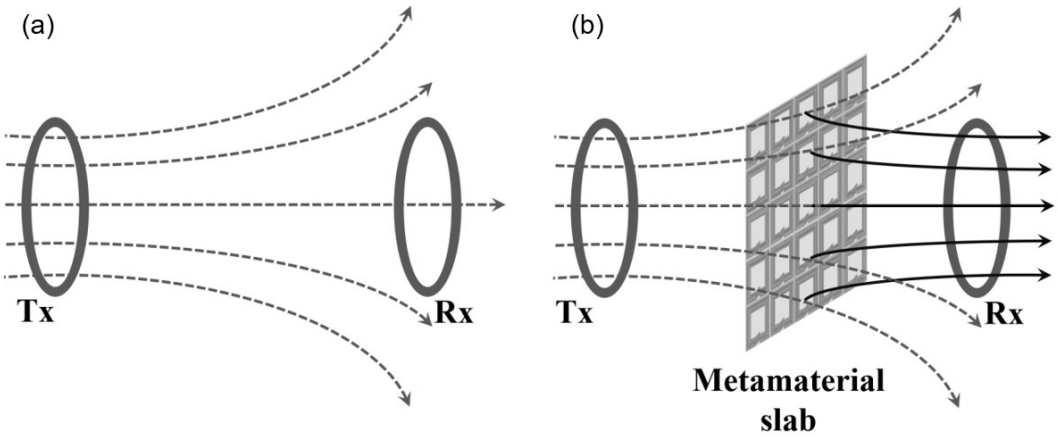
$$T = \frac{\left(1 - r^2\right) e^{-2jk_z' d}}{1 - r^2 e^{-2jk_z' d}}; \tag{1.19}$$

$$r = \frac{\Psi - 1}{\Psi + 1}; \tag{1.20}$$

$$\Psi_{TM} = \frac{k_z \mu'}{k_z' \mu}; \tag{1.21}$$

$$\Psi_{TE} = \frac{k_z' \varepsilon}{k_z \varepsilon}; \tag{1.22}$$

Trong đó, *kx* biểu diễn thành phần *x* của số sóng tới trong chân không, và hệ số μ đại diện cho độ từ thẩm của môi trường vật liệu biến hóa. Khi μ đạt giá trị âm, ta có thể thu được hệ số truyền qua lớn hơn 1. Thông thường, trong điều kiện chân không, biên độ của sóng tắt dần sẽ suy giảm khi khoảng cách truyền dẫn tăng lên. Tuy nhiên, hiện tượng ngược lại xảy ra khi sóng tới tiếp xúc với môi trường vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm - lúc này sóng dập tắt được khuếch đại thay vì suy giảm.



Hình 1.9. Cải thiện hiệu suất WPT bằng tấm vật liệu biến hóa: (a) hệ thống WPT không sử dụng tấm vật liệu MM, (b) hệ thống WPT có sử dụng tấm vật liệu MM [1].

Hình 1.9 trình bày sơ đồ minh họa cơ chế cải thiện hiệu suất hệ thống WPT thông qua việc ứng dụng vật liệu MM. Tại Hình 1.9(a) mô tả cấu trúc cơ bản của một hệ thống WPT, bao gồm cuộn phát T_X và cuộn thu R_X. Từ trường được tạo ra bởi cuộn T_X thể hiện qua các đường sức từ phân bố đối xứng quanh trục của cuộn dây. Hạn chế chính là cuộn R_X không có khả năng thu nhận toàn bộ các đường sức từ được T_X sinh ra, khi đó dẫn đến hiệu suất hệ thống WPT này suy giảm nhanh chóng khi khoảng cách giữa R_X và T_X tăng lên. Trong khi đó, Hình 1.9(b) cho thấy khi bổ sung một tấm vật liệu MM, các đường sức từ được tập trung hiệu quả hướng về phía R_X, từ đó nâng cao đáng kể hiệu suất hệ thống WPT. Dựa trên nguyên lý này, nhiều nhóm nghiên cứu đã phát triển và sử dụng vật liệu MM vào hệ thống WPT với đa dạng thiết kế về cấu trúc và kích thước vật liệu.

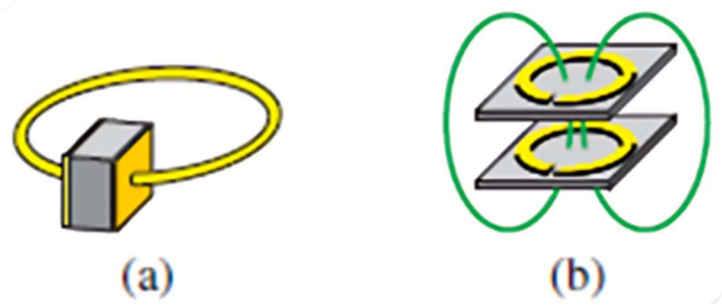
1.3. Sóng cảm ứng từ (MIW) lan truyền trong cấu trúc vật liệu biến hóa

Sóng cảm ứng từ (Magneto-Inductive Wave - MIW) là một loại sóng đặc biệt có khả năng lan truyền trong các cấu trúc từ tính. Đặc trưng của sóng MI nằm ở khả năng tương tác mạnh mẽ giữa các phần tử từ tính trong một môi trường vật liệu nhất định. Điều này cho phép sóng MI có thể duy trì và lan truyền trong các điều kiện mà các loại sóng thông thường không thể tồn tại [32]. Khái niệm sóng cảm ứng từ lần đầu tiên được đưa ra trong bối cảnh nghiên cứu các vật liệu biến hóa, nhằm giải thích các hiện tượng điện từ phức tạp trong các cấu trúc từ tính được chế tạo nhân tạo. Sóng MI thể hiện tính chất độc đáo ở chỗ nó có thể tương tác với môi trường xung quanh thông qua các hiện tượng cộng hưởng từ, giúp tối ưu hóa và điều chỉnh các đặc tính điện từ của vật liệu. Đặc biệt, sóng MI được sử dụng để điều khiển sóng điện từ ở các tần số cụ thể, tạo nên các ứng dụng tiên tiến trong công nghệ truyền thông, xử lý tín hiệu và hình ảnh.

1.3.1. Cơ sở lý thuyết về sóng cảm ứng từ

Sóng cảm ứng từ được phát hiện từ quá trình nghiên cứu về vật liệu biến hóa. Các thành phần từ tính được sử dụng đầu tiên trong việc tạo ra hiện tượng chiết suất âm bởi Shelby và cộng sự vào năm 2001 [22], là các bộ cộng hưởng vòng có rãnh. Sau đó, vào năm 2002, Marques và cộng sự đã đề xuất việc mô hình hóa các bộ cộng hưởng này dưới dạng mạch LC tương đương [23] với điều kiện kích thước của chúng phải rất nhỏ so với bước sóng trong chân không và khoảng cách giữa các bộ cộng hưởng này cũng phải bé hơn nhiều lần so với bước sóng điện từ tác dụng. Trong phạm vi trường gần, nơi mà điện trường và từ trường được xem xét một cách tách biệt, và các phần tử từ tính hoạt động như ở trạng thái tĩnh.

Thiết kế đơn giản nhất của một mạch LC để làm phần tử của vật liệu biến hóa là một vòng dây được gắn với tụ điện, như minh họa trong Hình 1.10(a). Khi hai vòng dây như vậy đặt gần nhau, chúng sẽ ghép cặp với nhau do từ trường của một vòng dây xuyên qua vòng dây kia, tạo ra dòng điện trong vòng dây đó (Hình 1.10(b)). Sự ghép cặp giữa các vòng dây này dẫn đến sự xuất hiện của sóng cảm ứng từ [24], được Shamonina và cộng sự đề xuất gọi tên là sóng MI [25].



Hình 1.10. (a) Vòng dây gắn tụ điện, (b) hai phần tử ghép cặp từ tính [27].

Sóng cảm ứng từ đã được nghiên cứu và chứng minh là có tiềm năng lớn trong các ứng dụng thực tế, đặc biệt là trong việc phát triển các hệ thống dẫn sóng, các thiết bị truyền dẫn tín hiệu và các công nghệ liên quan đến vật liệu biến hóa. Bằng cách áp dụng định luật điện áp của Kirchhoff cho các vòng dây cộng hưởng ghép cặp từ tính với giả thiết rằng chỉ xét sự ghép cặp giữa các vòng dây lân cận gần nhất thu được phương trình tán sắc đối với sóng cảm ứng từ có dạng [26]:

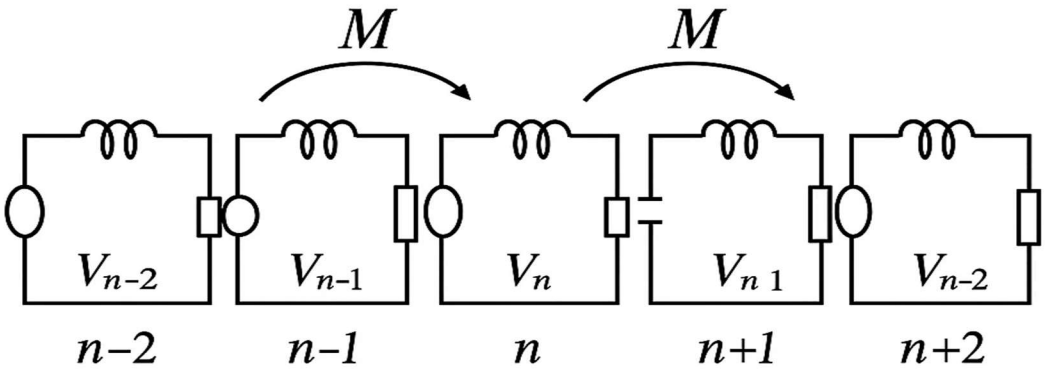
$$\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{1+\frac{2M}{L}\cos(\gamma a)}} \tag{1.23}$$

ở đây: ω_0 đại diện cho tần số cộng hưởng, γ biểu thị vectơ sóng, M là hệ số hỗ cảm, L biểu thị độ tự cảm.

Có thể thiết lập được mối quan hệ giữa các dòng điện trong các vòng dây trên đường truyền sóng cảm ứng từ được biểu diễn dưới dạng:

$$Z_0 I_n + j\omega M\left(I_{n-1} + I_{n+1}\right) = 0 \tag{1.24}$$

trong đó Z_0 đại diện cho trở kháng đặc trưng của từng vòng dây và dòng điện trong vòng dây thứ n được thể hiện như được minh họa trong Hình 1.11.



Hình 1.11. Mạch tương đương của một chuỗi các vòng dây gắn tụ điện. [27]

1.3.2. Sóng cảm ứng từ một chiều

Xét một chuỗi một chiều gồm các vòng dây gắn tụ điện, giả sử chỉ tính đến sự ghép cặp giữa các vòng dây lân cận gần nhất [33]. Giả sử phần tử đầu tiên (phần tử số 1) của chuỗi được kích thích bởi một ăng-ten vòng nhỏ, tạo ra dòng điện I_1 trong phần tử này. Dòng điện I_1 gây ra dòng điện cảm ứng trong các phần tử khác của chuỗi. Nhờ đó, sóng cảm ứng từ có thể lan truyền trong chuỗi vật liệu biến hóa một chiều hay có thể coi là sóng cảm ứng từ một chiều.

A. Mối quan hệ tán sắc

Trong trường hợp tổng quát [26], với các vòng dây có tổn thất Ohmic (được thể hiện qua điện trở R), trở kháng đặc trưng của mạch LC tương đương được biểu diễn:

$$Z_0 = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + R \tag{1.25}$$

Giá trị dòng điện I_n tại phần tử thứ n trong chuỗi được tính toán bằng công thức:

$$I_n = I_1 e^{-j\gamma na} \tag{1.26}$$

γ được xác định bởi:

$$\gamma = \beta - j\alpha \tag{1.27}$$

với β là hằng số lan truyền và α là hệ số suy hao trên từng đơn vị chiều dài. Khi đó, phương trình tán sắc (1.23) có thể được phân tách thành thành phần thực và thành phần ảo như sau:

$$1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} + k\cos(\beta a)\cosh(\alpha a) = 0 \tag{1.28}$$

$$\frac{1}{Q} - k\sin(\beta a)\sinh(\alpha a) = 0 \tag{1.29}$$

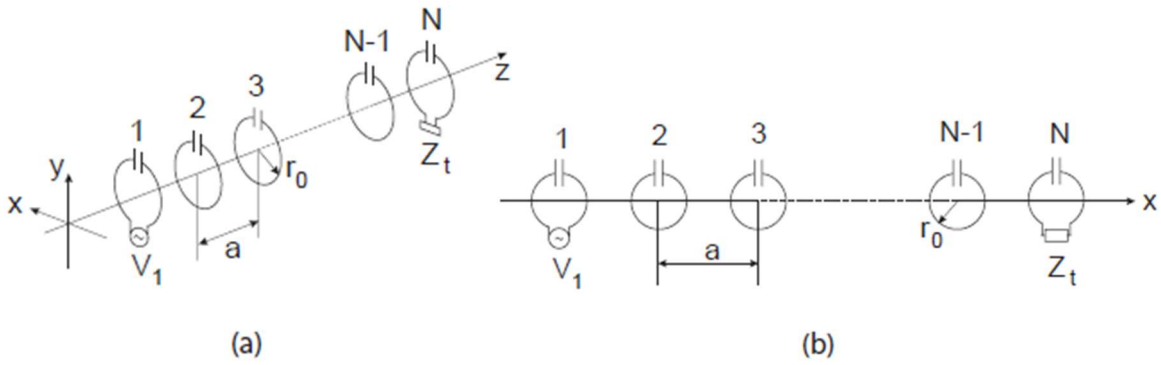
với k biểu thị hệ số liên kết giữa hai phần tử kề nhau trong chuỗi và có giá trị $2M/L$; Q thể hiện hệ số chất lượng của các phần tử trong chuỗi và có giá trị $\omega L/R$. M dương khi chuỗi các vòng dây có cấu hình dạng trục như Hình 1.12(a) hoặc M âm khi chuỗi các vòng dây có cấu hình dạng phẳng như Hình 1.12(b).

Trong trường hợp hệ số tắt dần α có giá trị đủ nhỏ hoặc hệ số phẩm chất Q có giá trị đủ lớn thì:

$$\cosh(\alpha a) = 1,\ \sinh(\alpha a) = \alpha a \tag{1.30}$$

Giá trị hằng số lan truyền β được tính toán dựa trên tần số góc ω theo công thức:

$$\beta = \frac{1}{a}\arccos\frac{\left(\omega_0^2/\omega^2 - 1\right)}{k} \tag{1.31}$$

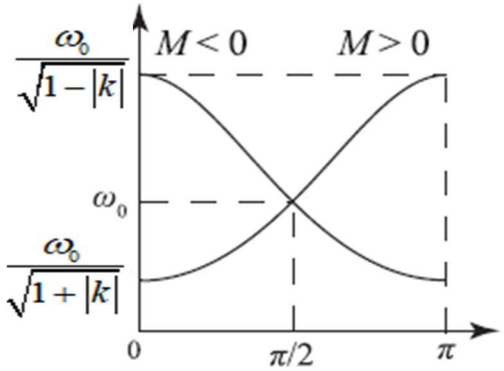


Hình 1.12. Chuỗi các vòng dây (a) có cấu hình dạng trục và (b) có cấu hình dạng phẳng [27].

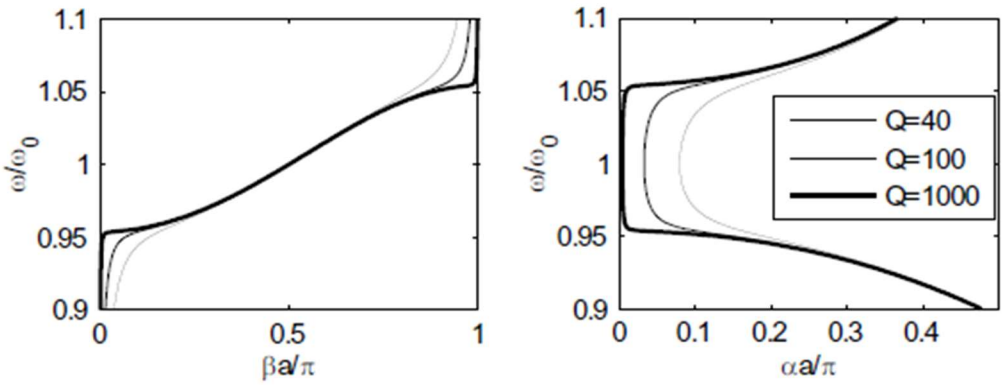
Sự phụ thuộc của hệ số suy hao vào hệ số phẩm chất Q, hệ số ghép cặp k và hằng số mạng a được xác định theo biểu thức:

$$\alpha a = \frac{1}{kQ\sin(\beta a)} \tag{1.32}$$

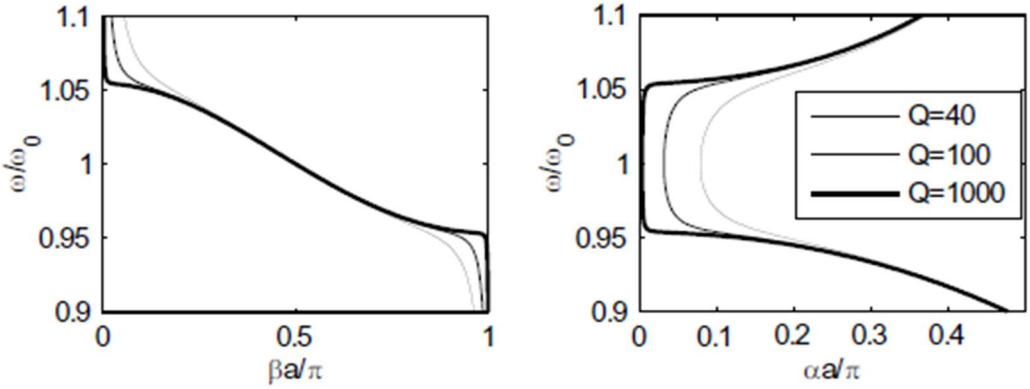
Các phương trình tán sắc đối với $k = \pm 0{,}1$ và khi không có tổn hao được minh họa trong Hình 1.13. Khi có tổn hao, các phương trình tán sắc được vẽ lại như trong Hình 1.14 và Hình 1.15 với Q = 40, 100 và 1000, bao gồm cả sự thay đổi pha và hệ số suy hao.



Hình 1.13. Đường cong tán sắc đối với chuỗi các vòng dây có $k = \pm 0{,}1$ và khi không có tổn hao [27].



Hình 1.14. Đường cong tán sắc đối với chuỗi các vòng dây cấu hình dạng trục $k = 0{,}1$ [27].

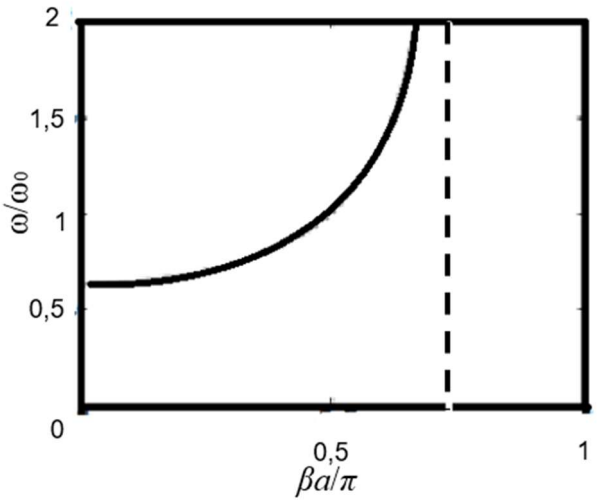


Hình 1.15. Đường cong tán sắc đối với chuỗi các vòng dây cấu hình dạng phẳng $k = -0{,}1$ [27].

Có thể thấy rằng (i) hệ số suy hao α tăng mạnh khi hệ số phẩm chất Q giảm và (ii) cả sự thay đổi pha và hệ số suy hao biến đổi nhanh chóng ở vị trí gần biên dải tần. Về lý thuyết, hệ số ghép cặp k có thể đạt giá trị lớn nhất bằng 2. Tuy nhiên, trong thực tế, giá trị cao nhất của hệ số ghép cặp đo được là 1,5 ở cấu hình dạng trục [28]. Với $k = 1{,}5$ và $Q = 100$, như có thể thấy trong Hình 1.16. Có một tần số cắt thấp hơn nhưng băng thông mở rộng đến tần số cao tùy ý với tiệm cận tại:

$$\beta a = \arccos\frac{1}{k} \tag{1.33}$$

trong trường hợp này dẫn tới $\beta a = 0{,}73\pi$.



Hình 1.16. Đường cong tán sắc đối với chuỗi các vòng dây cấu hình dạng đồng trục trong trường hợp ghép cặp mạnh k = 1,5 [27].

B. Năng lượng trong sóng cảm ứng từ một chiều

Năng lượng trong một đơn vị chiều dài truyền dẫn sóng cảm ứng từ có thể được tính bằng tổng năng lượng trong cuộn cảm của vòng dây, năng lượng trong tụ điện và năng lượng tương hỗ do ghép cặp giữa các vòng dây và có biểu thức đầy đủ [29]:

$$W = \frac{1}{2}L\left|I_n\right|^2 + \frac{1}{2}C\left|V_n\right|^2 + \frac{1}{2}M\left(I_n I_{n-1}^* + I_n I_{n+1}^*\right) \tag{1.34}$$

Trong đó, V_n là điện thế trên tụ điện của vòng dây thứ n, có liên hệ với dòng điện I_n như sau:

$$I_n = j\omega C V_n \tag{1.35}$$

Giả sử có một sóng lan truyền, thay thế các giá trị của I_{n-1} và I_{n+1} theo I_n và áp dụng phương trình tán sắc, biểu thức năng lượng trong một đơn vị chiều dài được đơn giản hóa thành:

$$W = \frac{\omega_0^2}{\omega^2}L\left|I_n\right|^2 \tag{1.36}$$

Lưu ý rằng không có năng lượng được truyền ở biên dải và truyền dẫn tối ưu ở tần số cộng hưởng khi $\gamma a = \pi/2$.

1.3.3 Sóng cảm ứng từ hai chiều

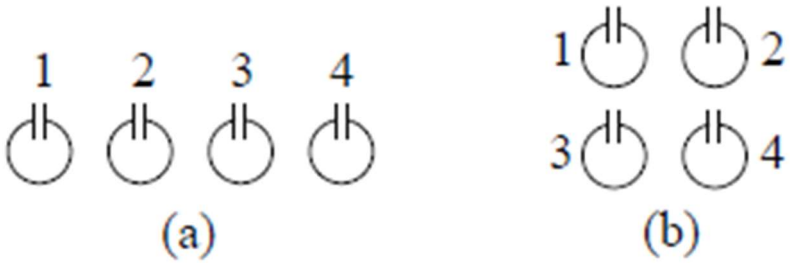
Việc nghiên cứu sóng cảm ứng từ một chiều là đủ để trình bày hầu hết các tính chất của sóng cảm ứng từ như sự lan truyền, hệ số (độ) suy hao, mật độ công suất và sự ghép cặp giữa chúng. Tuy nhiên, đối với một số tính chất khác, ví dụ như khúc xạ thì lý thuyết hai chiều là cần thiết. Dòng điện chạy trong phần tử thứ *n* liên quan đến điện áp kích thích trong tất cả các phần tử khác, xác định thông qua ma trận nghịch đảo trở kháng lẫn nhau như sau:

$$I = Z^{-1}V \tag{1.37}$$

Trong đó, khi xét sóng cảm ứng từ trong tấm vật liệu biến hóa hai chiều, một phần tử được ghép cặp với mọi phần tử khác, trở kháng giữa hai phần tử *n* và *m* vẫn là được biểu diễn như nhau là Z_{nm}. Điều này được minh họa trong một ví dụ đơn giản. Xét hai bộ bốn phần tử được minh họa trong Hình 1.17, thứ nhất là dãy một chiều, thứ hai là dãy hai chiều. Ma trận trở kháng cho cả hai dãy thể được viết dưới dạng:

$$\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{pmatrix} \tag{1.38}$$

Các giá trị của hỗ cảm, ví dụ giữa phần tử 1 và 4 chẳng hạn sẽ khá khác nhau đối với hai cấu hình nhưng công thức toán học sẽ giống hệt nhau.



Hình 17. Bốn vòng dây gắn tụ điện sắp xếp (a) thành một hàng, (b) thành hai hàng [31].

1.4. Kết luận chương 1

Chương 1 của luận văn đã trình bày tổng quan về công nghệ truyền năng lượng không dây (WPT), với sự phân tích chi tiết các phương pháp truyền năng lượng qua trường gần, bao gồm WPT cảm ứng từ và WPT cộng hưởng từ. Cùng với đó, việc áp dụng vật liệu biến hóa (metamaterials - MM) vào các hệ thống WPT đã được nhấn

mạnh như một hướng đi tiềm năng nhằm nâng cao hiệu suất truyền tải năng lượng, đặc biệt trong các hệ thống vận hành ở tần số thấp như MHz.

Các nghiên cứu trong chương này chỉ ra rằng việc sử dụng vật liệu biến hóa có thể cải thiện khả năng truyền năng lượng không dây bằng cách điều chỉnh các đặc tính điện từ của sóng cảm ứng từ, từ đó giúp mở rộng phạm vi truyền tải và giảm thiểu các tổn thất năng lượng trong quá trình truyền tải. Đặc biệt, sóng cảm ứng từ (MIW) đã được khẳng định là một công cụ hữu hiệu trong việc truyền năng lượng qua các cấu trúc vật liệu biến hóa.

Tổng quan về vật liệu biến hóa trong chương này cung cấp một cơ sở lý thuyết vững chắc để nghiên cứu và phát triển các cấu trúc MM, đặc biệt là trong việc cải thiện hiệu suất truyền năng lượng trong hệ thống WPT. Đồng thời, chương cũng chỉ ra những thách thức và cơ hội trong việc ứng dụng các vật liệu biến hóa trong các hệ thống WPT để tối ưu hóa khả năng truyền tải năng lượng không dây trong dải tần MHz.

Kết quả của chương này đã tạo nền tảng lý thuyết quan trọng cho các phương pháp nghiên cứu và thực nghiệm sẽ được thực hiện trong các chương tiếp theo của luận văn.

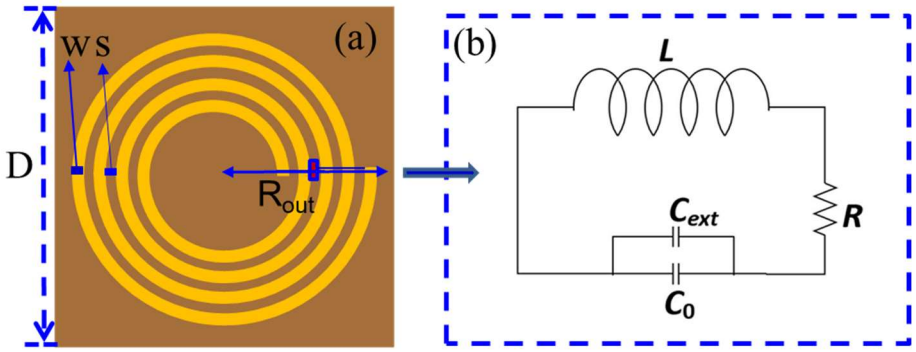
CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình hóa cấu trúc MM bằng mạch LC

Luận văn này tập trung vào việc phát triển vật liệu biến hóa nhằm phục vụ các ứng dụng trong lĩnh vực truyền năng lượng không dây. Cụ thể, nhóm nghiên cứu hướng đến việc áp dụng vật liệu biến hóa trong hệ thống truyền năng lượng không dây cộng hưởng từ vận hành trong dải tần MHz. Một hệ thống MR-WPT tiêu chuẩn được cấu tạo từ các bộ phận chính như sau: cuộn nguồn, hai cuộn cộng hưởng (truyền và nhận) và cuộn tải. Hai cuộn cộng hưởng vận hành ở cùng tần số nhằm tăng cường hiệu quả truyền năng lượng. Để nâng cao hiệu suất và phạm vi truyền tải, nghiên cứu này tập trung vào việc tích hợp vật liệu MM với cấu trúc cộng hưởng phù hợp với hệ thống. Theo đó, hệ thống MR-WPT tích hợp vật liệu MM là một tập hợp các thành phần có cấu trúc tương đồng ô cơ sở của MM, với các thông số có thể điều chỉnh theo nhu cầu, nhằm tối ưu hóa hoạt động đồng bộ ở dải tần số MHz thấp.

Các nghiên cứu khoa học đã chứng minh rằng, khi chịu tác động của sóng điện từ, các ô cơ sở trong vật liệu biến hóa sẽ hoạt động tương tự như những bộ cộng hưởng. Để xác định tính chất điện từ của các cấu trúc này, người ta áp dụng phương pháp mô phỏng mạch LC tương đương. Phương pháp này đơn giản và có thể mang lại kết quả nhanh chóng. Trong mô hình này, cuộn cảm (L) và tụ điện (C) được ứng dụng để biểu diễn các thành phần điện từ của cấu trúc. Do vật liệu này thường áp dụng kim loại dẫn điện tốt như đồng, bạc hoặc vàng, điện trở của chúng rất nhỏ và thường được bao phủ để giảm thiểu tổn thất. Các giá trị của L và C sẽ biến đổi tùy theo hình dạng và cấu trúc của vật liệu, từ đó tác động đến các tính chất điện từ của nó.

Dựa trên mô hình mạch điện LC tương đương, có thể xác định chính xác tần số cộng hưởng của vật liệu biến hóa và MM. Phương pháp này còn hỗ trợ dự đoán đặc tính điện từ và tác động của các thông số hình học, vật liệu đến tính chất của các vật liệu MM. Trong quá trình phát triển vật liệu MM, xoắn ốc hình π nổi bật như một trong những cấu trúc đặc biệt được ứng dụng để chế tạo MM cho nhiều vùng tần số khác nhau. Tuy nhiên, một thách thức lớn là việc mở rộng các cấu trúc nguyên bản này thường cộng hưởng ở tần số cao. Để giải quyết hạn chế này và phục vụ hiệu quả cho ứng dụng WPT ở dải tần số MHz thấp, nhóm nghiên cứu đã phát triển một cấu trúc kết hợp. Cụ thể, bằng cách tích hợp cuộn xoắn ốc với tụ điện bên ngoài, chúng tôi đã tạo ra cấu trúc có khả năng vận hành ổn định trong dải tần số MHz thấp.



Hình 2.1. Cấu trúc ô cơ sở vật liệu MM, mô hình mạch điện LC tương đương.

Các cấu trúc vật liệu MM được triển khai thông qua quá trình nghiên cứu, thiết kế và phân tích lý thuyết, kết hợp với mô phỏng bằng phần mềm thiết kế chuyên dụng. Mỗi ô cơ sở của vật liệu MM được biểu diễn dưới dạng mạch LC tương đương, như minh họa trong Hình 2.1. Dựa vào mô hình này, tần số cộng hưởng của các phần tử trong hệ thống truyền năng lượng không dây cộng hưởng từ (MR-WPT) — bao gồm cuộn phát, cuộn thu và ô cơ sở MM — có thể được xác định theo công thức:

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

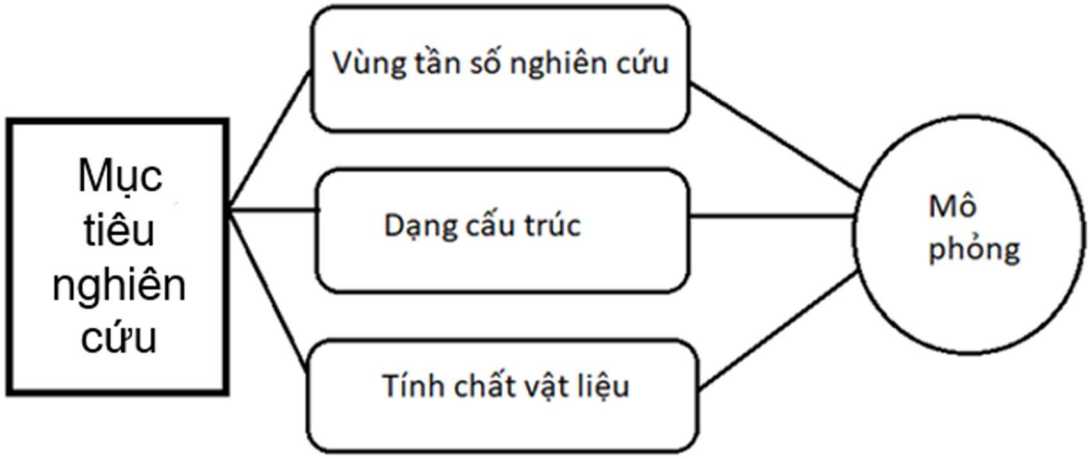
ở đây L và C_0 tương ứng biểu thị độ tự cảm hiệu dụng và điện dung hiệu dụng của mỗi thành phần cấu trúc, C_{ext} biểu thị tụ điện bổ sung bên ngoài nhằm đảm bảo mỗi thành phần và toàn bộ hệ thống MR-WPT có khả năng vận hành ở tần số mục tiêu (dải tần số MHz thấp).

2.2. Phương pháp mô phỏng

Ngoài mô hình lý thuyết và mạch LC tương đương, mô phỏng số đóng vai trò như một công cụ hỗ trợ hiệu quả trong việc nghiên cứu việc áp dụng vật liệu MM trong hệ thống WPT. Trong khi các phương pháp lý thuyết hỗ trợ thu được tần số cộng hưởng và hiệu suất thông qua các thông số cấu trúc, thì mô phỏng tạo điều kiện đánh giá định lượng chính xác hơn. Phương pháp này hỗ trợ xác định tần số vận hành, phổ truyền qua, phổ phản xạ và phân bố trường điện từ trong vùng tần số. Nhờ vậy, kết quả mô phỏng có thể kiểm chứng độc lập với mô hình LC, đóng góp quan trọng vào việc nghiên cứu ứng dụng vật liệu MM trong MR-WPT ở dải MHz.

Trong luận văn này này, tôi sử dụng phần mềm CST Studio Suite như một công cụ cốt lõi để thực hiện việc mô phỏng cũng như tối ưu hóa các thông số có liên quan đến hệ thống MR-WPT được tích hợp vật liệu MM. Việc có quyền sử dụng phần mềm này tại Học viện Khoa học và Công nghệ cũng như Viện Khoa học vật liệu đã

mang lại điều kiện thuận lợi trong việc thực hiện phân tích chi tiết về nhiều tính chất quan trọng. Từ đó, bốn thông số cơ bản của cấu trúc vật liệu đã được tìm hiểu gồm có: hệ số chất lượng của mỗi ô cơ sở; sự phụ thuộc của hệ số ghép cặp vào khoảng cách giữa các ô cơ sở; tính chất tán xạ của từ trường khi truyền qua cấu trúc; và việc tìm ra kích thước ô cơ sở tối ưu nhất để đạt được hiệu suất giam giữ năng lượng từ trường cao nhất.



Hình 2.2. Sơ đồ mục tiêu nghiên cứu.

Việc mô phỏng vật liệu MM về cơ bản là giải quyết bài toán về sự tương tác giữa sóng điện từ với các cấu trúc MM. Điều này tạo nên những thách thức đáng kể do các cấu trúc này biểu hiện tính chất không đồng nhất về mặt vật liệu (sự kết hợp giữa các thành phần kim loại và điện môi) cùng với việc có kích thước nhỏ hơn đáng kể so với bước sóng tương ứng với tần số vận hành. Trong phần mềm CST, kỹ thuật tích phân hữu hạn (Finite Integration Technique – FIT) được coi là một phương pháp tính toán có hiệu quả cao khi được áp dụng cho các đối tượng có cấu trúc phức tạp như vật liệu MM. Nguyên lý cơ bản của kỹ thuật FIT là thực hiện việc chuyển đổi các phương trình Maxwell từ dạng liên tục sang dạng rời rạc, từ đó mang lại những lợi thế trong quá trình tính toán số trên hệ thống máy tính. Phương trình Maxwell được biểu diễn như sau:

$$\oint_{(C)} \vec{E} d\vec{l} = -\iint_{S} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \tag{2.2}$$

$$\oiint_{S} \vec{D} d\vec{S} = \iiint_{V} \rho dV \tag{2.3}$$

$$\oint_{(C)} \vec{H} d\vec{l} = \iint_{S} \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) d\vec{S} \tag{2.4}$$

$$\oiint_{S} \vec{B} d\vec{S} = 0 \tag{2.5}$$

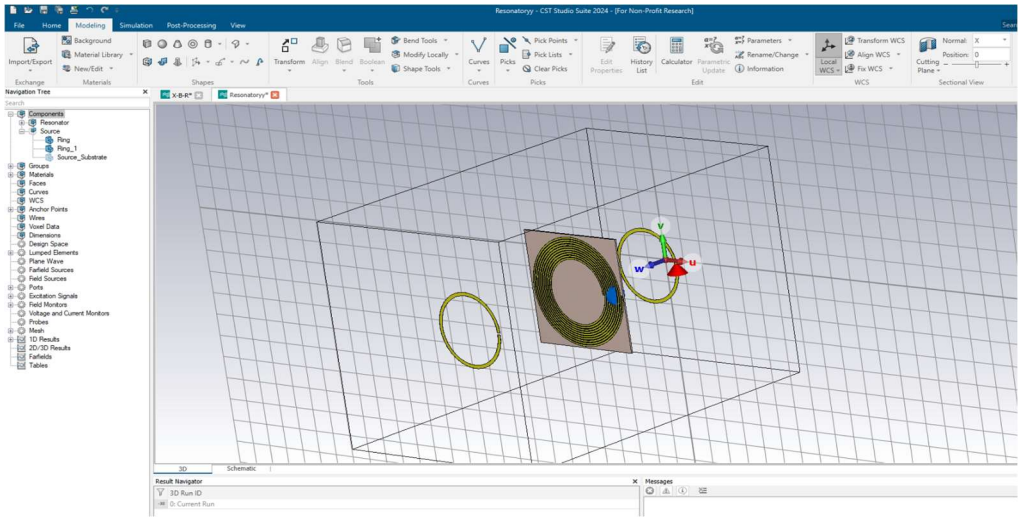
Trong đó: $d\vec{l}$ đại diện cho vi phân chiều dài theo phương của đường cong (C), $d\vec{S}$ là vector vi phân diện tích có phương vuông góc với mặt phẳng S và bị giới hạn bởi đường cong khép kín (C), dV là vi phân thể tích được bao quanh bởi mặt kín S.

Để tiếp cận và giải quyết các phương trình có liên quan đến các cấu trúc phức tạp không đồng nhất, các kỹ sư thường áp dụng phương pháp phân chia thành các thành phần vi mô đồng nhất hơn. Quá trình này được thực hiện thông qua việc xây dựng một hệ thống lưới chi tiết, tạo điều kiện chia tách vùng nghiên cứu rộng lớn thành nhiều phần tử nhỏ hơn (các điểm lưới). Phương pháp tính toán này đã được tích hợp vào các ứng dụng thương mại như CST, Ansys HFSS, COMSOL Multiphysics, và các phần mềm khác. Với những năng lực này, CST có khả năng thực hiện mô phỏng và phân tích một cách toàn diện các vấn đề về tương tác điện từ trên nhiều dải tần số khác nhau. Nhằm tối ưu hóa hiệu suất tính toán, CST cung cấp hai phương pháp giải quyết bài toán chính: Transient Solver (T) và Frequency Domain Solver (F). Phương pháp (T) được ưu tiên áp dụng khi mô phỏng các đặc tính của cấu trúc đơn lẻ, không tuần hoàn thông qua việc tính toán các phương trình Maxwell trên một dải tần số rộng. Ngược lại, phương pháp (F) thường được ưu tiên cho các bài toán có liên quan đến cấu trúc nhỏ có tính tuần hoàn, chẳng hạn như trong việc nghiên cứu vật liệu MM.

Việc thiết lập các thông số đầu vào đóng vai trò quan trọng trong quá trình sử dụng phần mềm mô phỏng. Việc xem xét và xác định một cách kỹ lưỡng các yếu tố có liên quan đến vùng tần số nghiên cứu, loại cấu trúc và tính chất vật liệu cần được thực hiện sao cho phù hợp với mục tiêu nghiên cứu vật liệu MM hay cụ thể hơn là vật liệu MM được ứng dụng trong truyền năng lượng không dây. Vùng tần số nghiên cứu có tác động quyết định đến việc lựa chọn dạng cấu trúc và đặc tính vật liệu tương ứng. Công trình nghiên cứu này được thực hiện tối ưu trong dải tần số MHz thấp (dưới 20 MHz), dẫn đến việc thiết kế cấu trúc vật liệu MM dạng kết hợp gồm có cuộn xoắn ốc và tụ điện gắn bên ngoài. Trong dải tần này, cuộn xoắn ốc có thể được chế tạo một cách thuận lợi thông qua kỹ thuật quang khắc, với chất nền dự kiến sử dụng là FR4 hoặc vật liệu đàn hồi như Polyimide thương mại - được đặc trưng bởi hằng số điện môi ε và hệ số tổn hao δ. Trong quá trình mô phỏng, cần thực hiện phân tích tác

động của các đế FR4 hoặc Polyimide đối với tính chất điện từ của vật liệu MM. Đối với các cấu trúc MM được nghiên cứu, đồng (Cu) được lựa chọn làm vật liệu dẫn điện với độ dẫn điện 5,96.107 $S.m^{-1}$. Bên cạnh các thông số vật lý của vật liệu, các thông số cấu trúc hình học ô cơ sở được xác định cho phù hợp với dải tần số MHz và được tích hợp để thiết kế trong mô phỏng CST. Sau khi hoàn thành thiết kế cấu trúc MM và toàn bộ hệ thống WPT trong môi trường mô phỏng CST, các điều kiện biên được thiết lập một cách phù hợp với hệ thống nghiên cứu và vùng tần số khảo sát.

Hình 2.3 cung cấp giao diện mô phỏng hệ thống truyền năng lượng không dây (WPT) được thực hiện trong phần mềm CST. Trong thiết kế này, các thành phần chính bao gồm cuộn cộng hưởng phát (T_X), cuộn cộng hưởng thu (R_X) và các ô cơ sở của vật liệu MM đều được thiết kế dưới dạng cấu trúc dạng xoắn ốc kết hợp với tụ điện gắn ngoài. Ngoài các thông số vật liệu đã được mô tả trước đó, mô hình mô phỏng CST còn thể hiện đầy đủ các tham số hình học chi tiết của toàn bộ hệ thống WPT, giúp tạo ra một mô hình mô phỏng toàn diện và chính xác để phân tích hiệu suất của hệ thống.



Hình 2.3. Giao diện phần mềm mô phỏng CST Studio Suite.

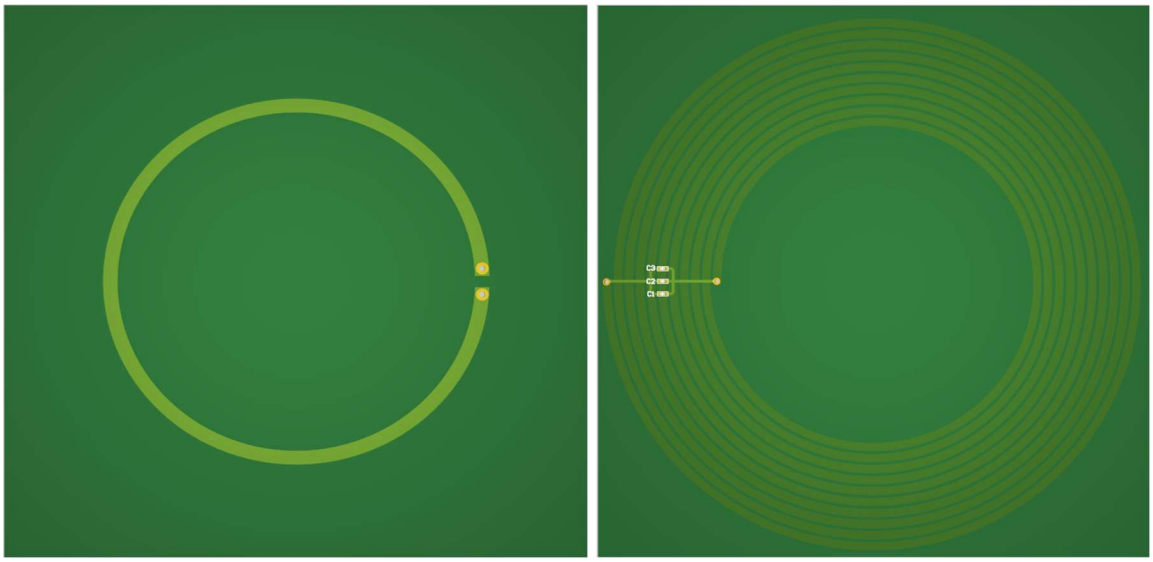
2.3. Phương pháp thực nghiệm

2.3.1. Phương pháp thiết kế mạch in (PCB)

Sau quá trình mô phỏng và tối ưu hóa các thông số của chuỗi vật liệu biến hóa, việc chuyển từ mô hình lý thuyết sang mẫu thực nghiệm đòi hỏi độ chính xác cao và phương pháp thiết kế chuyên nghiệp. Phần mềm Altium Designer được lựa chọn làm công cụ thiết kế mạch in chuyên dụng, cho phép xây dựng sơ đồ nguyên lý mạch điện và thiết kế mạch in (PCB) một cách đồng bộ. Quy trình này giúp đảm bảo tính chính xác của các tham số hình học quan trọng như kích thước cuộn dây, khoảng cách ghép cặp, và vị trí tụ điện điều chỉnh - những yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến tính năng của

vật liệu MM. Phương pháp thiết kế mạch in này không chỉ giúp tối ưu hóa hiệu suất của hệ thống mà còn đảm bảo tính khả thi trong quá trình chế tạo và tái tạo mẫu với độ lặp lại cao, đặc biệt quan trọng đối với nghiên cứu ứng dụng trong hệ thống MR-WPT.

Sau khi hoàn thiện mô phỏng bằng CST, bước tiếp theo trong quy trình thiết kế là chuyển từ lý thuyết sang mạch in thực tế (Printed Circuit Board - PCB). Hình 2.4 minh họa hai thiết kế PCB chính được sử dụng trong nghiên cứu này, được thực hiện trên nền FR-4 màu xanh lá.



(a) (b)

Hình 2.4. (a) Thiết kế mạch in (PCB) cuộn phát, (b) thiết kế mạch(PCB) in cho vòng cộng hưởng.

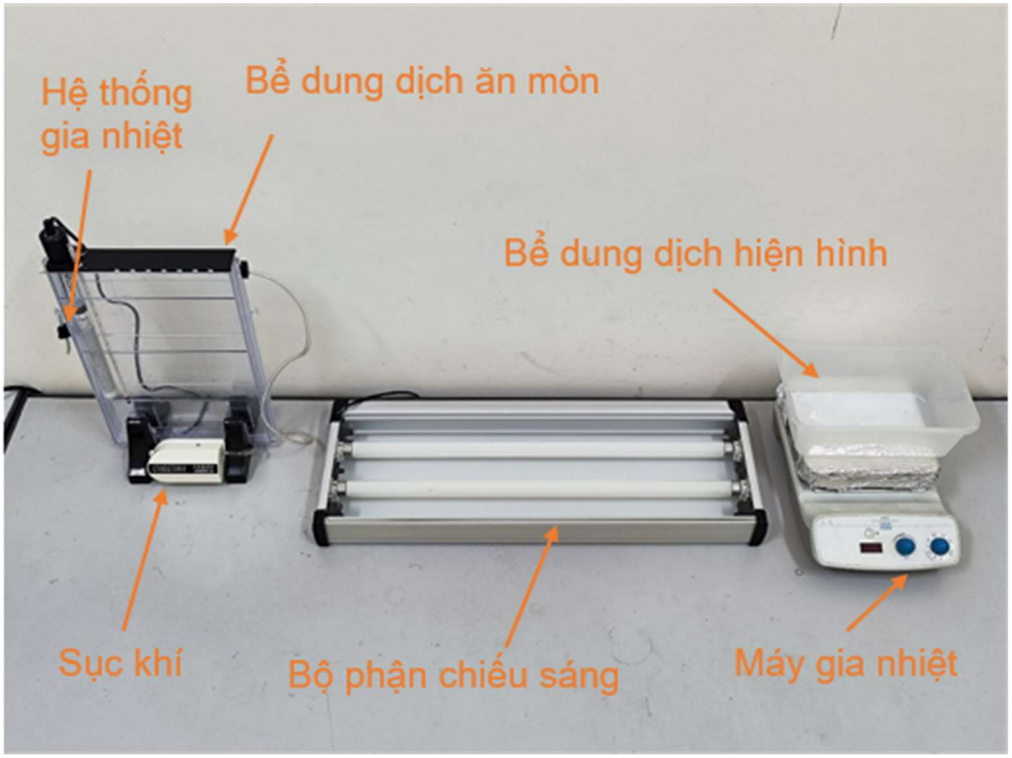
Hình 2.4(a) trình bày cấu trúc cộng hưởng đơn vòng với khe hở (split-ring resonator), một trong những cấu trúc cơ bản của vật liệu MM. Thiết kế bao gồm một vòng dẫn đơn với khe hở nhỏ tại một vị trí, tạo điều kiện để hình thành mạch LC cộng hưởng. Hai điểm tiếp xúc màu vàng được bố trí tại vị trí khe hở, cho phép kết nối với thiết bị đo hoặc các thành phần khác trong hệ thống. Hình 2.4(b) thể hiện thiết kế phức tạp hơn với cuộn dây xoắn ốc nhiều vòng, giúp tăng đáng kể độ tự cảm (L) của cấu trúc. Thiết kế này phù hợp hơn cho ứng dụng MR-WPT ở dải tần MHz thấp, khi cần đạt giá trị L cao mà không làm tăng kích thước vật lý của cấu trúc. Ở bên trái của cuộn dây, ba vị trí đánh dấu (C_1, C_2, C_3) được thiết kế giữa hai điểm tiếp xúc, cho phép hàn tụ điện điều chỉnh (C_{ext}) để điều khiển tần số cộng hưởng theo công thức (2.1). Việc bố trí ba vị trí này cho phép linh hoạt trong việc lựa chọn và kết hợp các giá trị tụ điện khác, giúp tối ưu hóa đặc tính cộng hưởng và điều chỉnh tần số hoạt

động của hệ thống. Các thiết kế PCB này đã được tối ưu hóa về kích thước đường dẫn, khoảng cách giữa các vòng xoắn, và vị trí các điểm kết nối, đảm bảo đạt được giá trị Q cao nhất có thể trong khi vẫn duy trì hệ số ghép cặp k phù hợp khi tích hợp vào hệ thống MR-WPT hoàn chỉnh.

2.3.2. Phương pháp chế tạo

a) Phương pháp quang khắc và phương pháp hàn

Các kỹ thuật quang khắc và quy trình hàn được sử dụng rộng rãi trong việc sản xuất vật liệu MM, với cách thức cụ thể tùy thuộc vào kích thước ô đơn vị cần thiết cho từng dải tần số hoạt động. Đối với các vật liệu MM hoạt động trong vùng ánh sáng hồng ngoại và ánh sáng nhìn thấy, các kỹ thuật như khắc bằng tia electron, khắc laser hoặc phương pháp tia ion hội tụ thường được ưu tiên lựa chọn. Khi xử lý với dải tần THz hoặc cao hơn, với ô cơ sở có kích thước micromet, công nghệ quang khắc sử dụng nguồn laser một màu được ứng dụng phổ biến. Với các thiết kế hoạt động ở tần số MHz và GHz, có kích thước ô đơn vị lớn hơn (mm đến cm), phương pháp quang khắc với nguồn sáng halogen thường được sử dụng.



Hình 2.5. Hệ quang khắc đặt tại Phòng Vật liệu biến hóa và cảm biến – Viện Khoa học vật liệu.

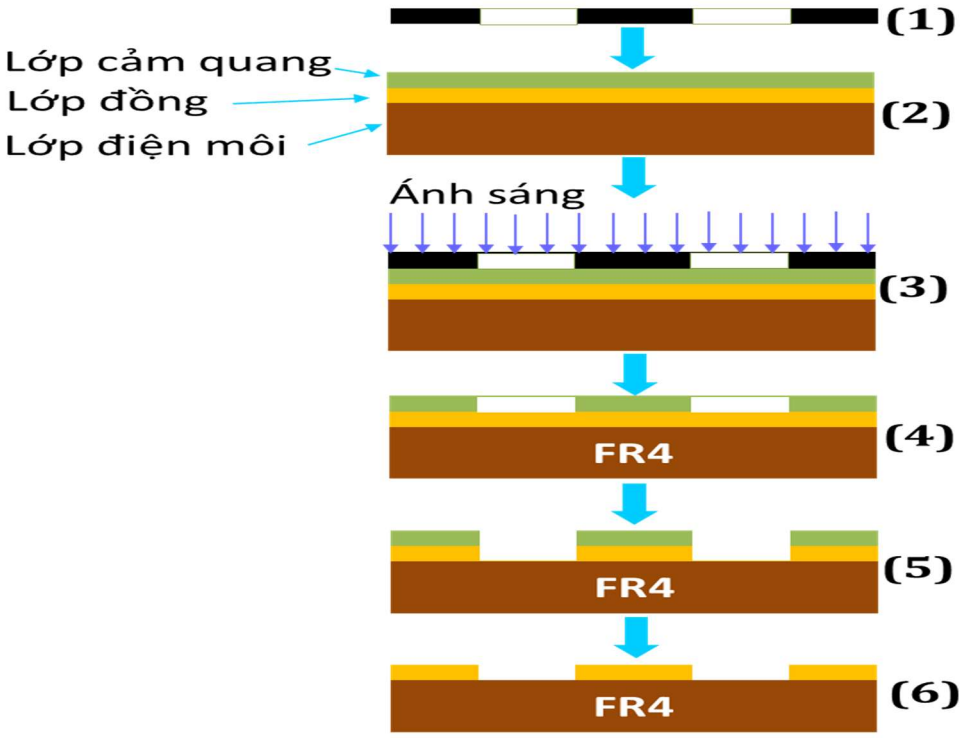
Hệ thống MR-WPT được tích hợp với vật liệu MM gồm có năm bộ phận cơ bản: cuộn dây nguồn, cuộn dây cộng hưởng truyền, cuộn dây cộng hưởng nhận, cuộn dây thu và lớp vật liệu MM có nhiều ô cơ sở. Các cuộn dây cộng hưởng cùng ô cơ sở thường được thiết kế theo dạng xoắn ốc nhiều vòng. Tuy nhiên, để xây dựng hệ thống

MR-WPT có kích thước nhỏ gọn mà vẫn duy trì khoảng cách truyền tải hiệu quả (vài chục cm), các cuộn dây và ô cơ sở được sản xuất bằng công nghệ quang khắc thường vận hành ở tần số cao (khoảng 100 MHz). Vì vậy, để xây dựng hệ thống MR-WPT vận hành trong dải MHz thấp, phương pháp hàn các tụ điện dán lên từng cuộn dây và ô cơ sở được sử dụng nhằm điều chỉnh tần số cộng hưởng theo yêu cầu.

Đối với vật liệu MM hoạt động trong dải tần số MHz, các thông số cấu trúc có kích thước khá lớn (vài cm), do vậy phương pháp quang khắc bảng mạch in (PCB) kết hợp với công nghệ hàn đã được nhóm nghiên cứu tại Viện Khoa học vật liệu áp dụng hiệu quả. Hình minh họa hệ thống thiết bị quang khắc dùng để sản xuất mẫu trong dải MHz và GHz được lắp đặt tại phòng thí nghiệm trọng điểm của Viện Khoa học vật liệu thuộc Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, trong khi Hình 2.6 minh họa hệ thống thiết bị hàn các linh kiện điện tử.

Hình 2.6. Máy hàn tụ điện đặt tại Phòng Vật liệu biến hóa và cảm biến – Viện Khoa học vật liệu.

b) Quy trình chế tạo vật liệu MM và hệ thống MR-WPT



Hình 2.7. Quy trình chế tạo vật liệu MM

Trong việc chế tạo cuộn cộng hưởng phát/thu cho hệ thống MR-WPT, luận văn này áp dụng quy trình gồm các bước:

Bước 1: Xây dựng thiết kế và chế tạo mặt nạ cấu trúc.

- Việc thiết kế cấu trúc cuộn cộng hưởng được thực hiện trên phần mềm Altium dành riêng cho thiết kế mạch điện tử, kết quả thiết kế sau đó được chuyển thành mặt nạ có kích thước đường dẫn nhỏ nhất là 0,5 mm.

Bước 2: Tạo lớp phủ cảm quang trên bề mặt chất nền

- Quy trình làm sạch tấm mạch in (có sẵn lớp đồng phủ) được thực hiện bằng cách dùng các dung môi gồm: nước cất, ethanol và acetone trong bể có thể tích 3 lít.
- 10 ml dung dịch chứa chất cảm quang (Negative photoresist I) được phủ lên tấm mạch in thông qua kỹ thuật quay phủ (spin coating) theo hai giai đoạn: bắt đầu với tốc độ 500 vòng/phút trong 15 giây, sau đó chuyển sang 1000 vòng/phút trong 30 giây. Mẫu được để khô tự nhiên trong 24 giờ.

Bước 3: Thực hiện chiếu xạ vật liệu thông qua mặt nạ

- Mặt nạ được cố định áp chặt lên bề mặt vật liệu thông qua kỹ thuật hút chân không.

- Quá trình chiếu xạ được thực hiện qua mặt nạ với nguồn sáng đồng nhất (đèn halogen hoặc ánh sáng trắng 45 W) trong khoảng 10 phút. Khoảng cách giữa nguồn sáng và mặt nạ được giữ ở 15 cm. Ở những khu vực chất cảm quang tiếp xúc ánh sáng sẽ xảy ra hiện tượng biến tính, làm cho chúng không bị hòa tan bởi dung dịch tẩy rửa chuyên dụng. Ngược lại, những vùng bị che khuất bởi mặt nạ, chất cảm quang vẫn duy trì đặc tính gốc.

Bước 4: Loại bỏ phần cảm quang không được chiếu xạ

- Mặt nạ được tháo ra khỏi tấm vật liệu bằng dung dịch tẩy rửa chuyên biệt.
- Tấm vật liệu sau khi chiếu xạ được ngâm trong hóa chất chuyên dụng (Negative developer) khoảng 5 phút để loại bỏ những phần chất cảm quang không được chiếu xạ, quá trình này diễn ra trong bể có dung tích 2 lít.

Bước 5: Thu nhận mẫu và thực hiện hàn tụ điện

- Việc thu mẫu được thực hiện cẩn thận để tránh gây tổn hại.

PCB được xử lý làm sạch nhằm nâng cao độ bám dính. Quá trình hàn được thực hiện bằng máy hàn có nhiệt độ được kiểm soát, đảm bảo nhiệt độ cao nhất không vượt 245°C để bảo vệ tụ ceramic khỏi hư hỏng.

2.4. Kết luận chương 2

Chương 2 của luận văn đã trình bày chi tiết về phương pháp nghiên cứu được áp dụng trong việc khảo sát và phát triển vật liệu biến hóa (MM) cho hệ thống truyền năng lượng không dây (WPT). Các phương pháp này bao gồm mô hình hóa cấu trúc vật liệu biến hóa thông qua mạch LC, mô phỏng số sử dụng phần mềm CST Studio Suite, và phương pháp thực nghiệm với thiết kế mạch in (PCB) và kỹ thuật chế tạo vật liệu bằng quang khắc kết hợp với hàn tụ điện.

Qua mô hình hóa mạch LC tương đương, chúng tôi đã xây dựng được những cấu trúc vật liệu MM phù hợp với hệ thống WPT, đảm bảo khả năng hoạt động ổn định tại tần số MHz. Phương pháp mô phỏng đã giúp dự đoán và tối ưu hóa các thông số quan trọng như tần số cộng hưởng, hệ số chất lượng (Q-factor), và các đặc tính điện từ của cấu trúc vật liệu, qua đó đánh giá khả năng ứng dụng của vật liệu biến hóa trong việc cải thiện hiệu suất truyền năng lượng không dây.

Phương pháp thực nghiệm, bao gồm thiết kế PCB và chế tạo mẫu vật liệu biến hóa, đã được triển khai nhằm kiểm tra độ chính xác và khả năng thực thi của mô phỏng lý thuyết. Quy trình thiết kế mạch in và chế tạo mẫu thực tế đảm bảo các thông

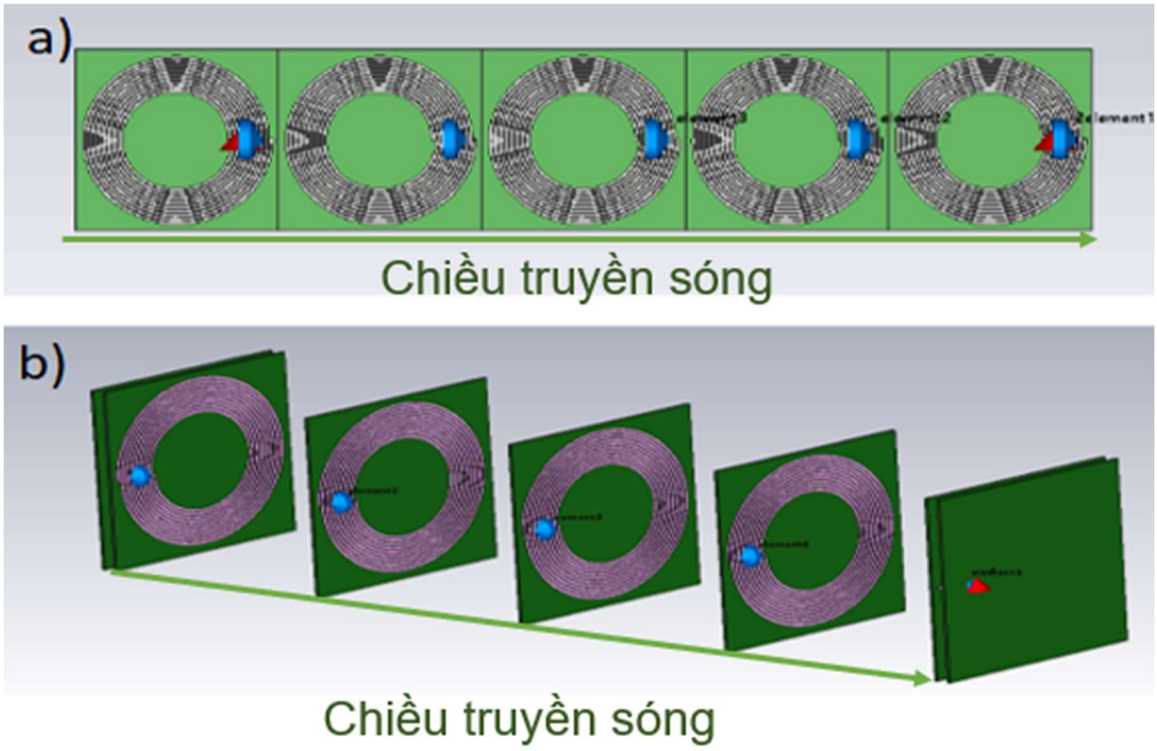
số như kích thước cuộn dây, khoảng cách ghép cặp, và vị trí của tụ điện được thực hiện chính xác, hỗ trợ việc tối ưu hóa hiệu suất của hệ thống WPT trong các thử nghiệm thực tế.

Chương này đã thiết lập nền tảng phương pháp luận vững chắc cho các nghiên cứu tiếp theo, cung cấp công cụ và kỹ thuật cần thiết để tiến hành mô phỏng, chế tạo và thử nghiệm các cấu trúc vật liệu biến hóa ứng dụng trong hệ thống WPT. Những phương pháp này sẽ tiếp tục được áp dụng và đánh giá trong các chương tiếp theo của luận văn.

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

3.1. Kết quả mô phỏng cấu trúc truyền năng lượng sử dụng sóng cảm ứng từ

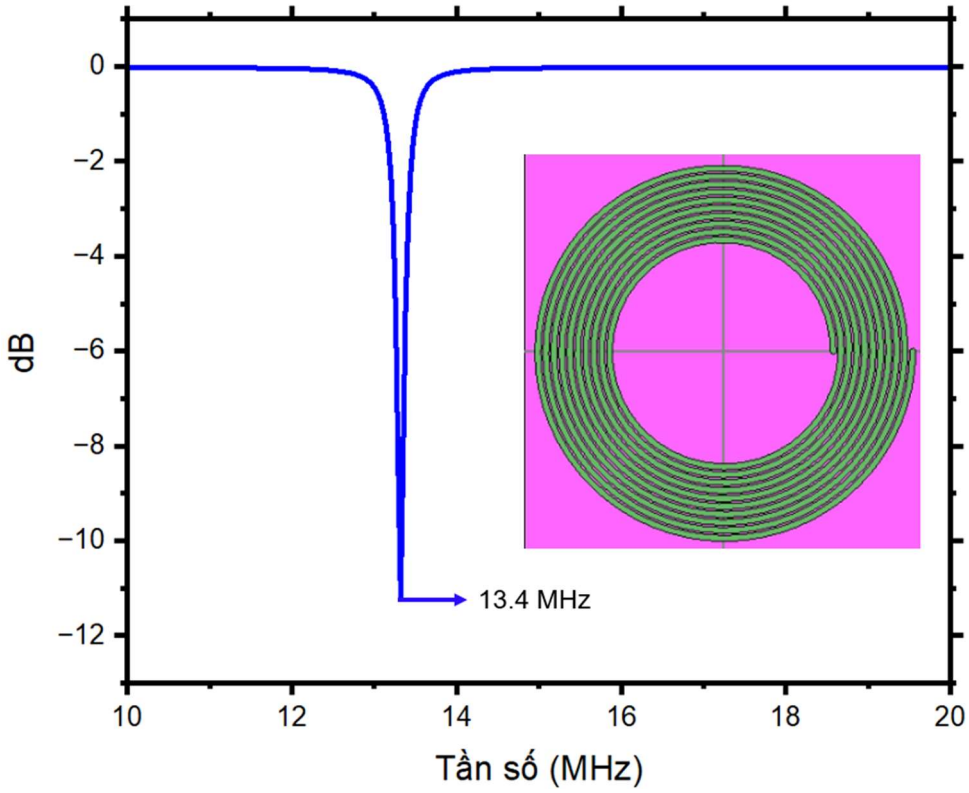
Luận văn này đã thực hiện mô phỏng và đưa ra hai cấu trúc tối ưu cho việc truyền năng lượng bằng sóng cảm ứng từ. Cả hai cấu trúc này đều sử dụng chuỗi các phần tử cộng hưởng được chế tạo từ vật liệu đồng trên đế FR-4. Hai cấu trúc này được trình bày lần lượt trong Hình 3.1(a) và Hình 3.1(b). Cấu trúc thứ nhất bao gồm một dãy năm phần tử cộng hưởng có cấu hình dạng phẳng. Mỗi phần tử là một cuộn dây xoắn ốc đa vòng với tụ điện gắn ngoài để tạo ra cộng hưởng phù hợp với dải tần hoạt động MHz. Cấu trúc này được thiết kế với mục tiêu tối ưu hóa khả năng ghép cặp và tăng cường độ lan truyền sóng cảm ứng từ, đảm bảo hiệu suất truyền năng lượng cao ở khoảng cách truyền dẫn ngắn đến trung bình. Cấu trúc thứ hai sử dụng cùng một số lượng phần tử (năm phần tử cộng hưởng) nhưng được bố trí theo cấu hình dạng trục. Các phần tử trong cấu trúc này được xếp song song với nhau theo chiều dọc với khoảng cách giữa 2 ô cơ sở là 10 cm, nhằm mục đích khảo sát sự khác biệt trong đặc tính truyền dẫn năng lượng và tối ưu hóa việc ứng dụng thực tế cho các điều kiện cụ thể của hệ thống truyền năng lượng không dây.



Hình 3.1.(a) Cấu trúc phẳng (b) cấu trúc đồng trục.

3.1.1. Tần số cộng hưởng

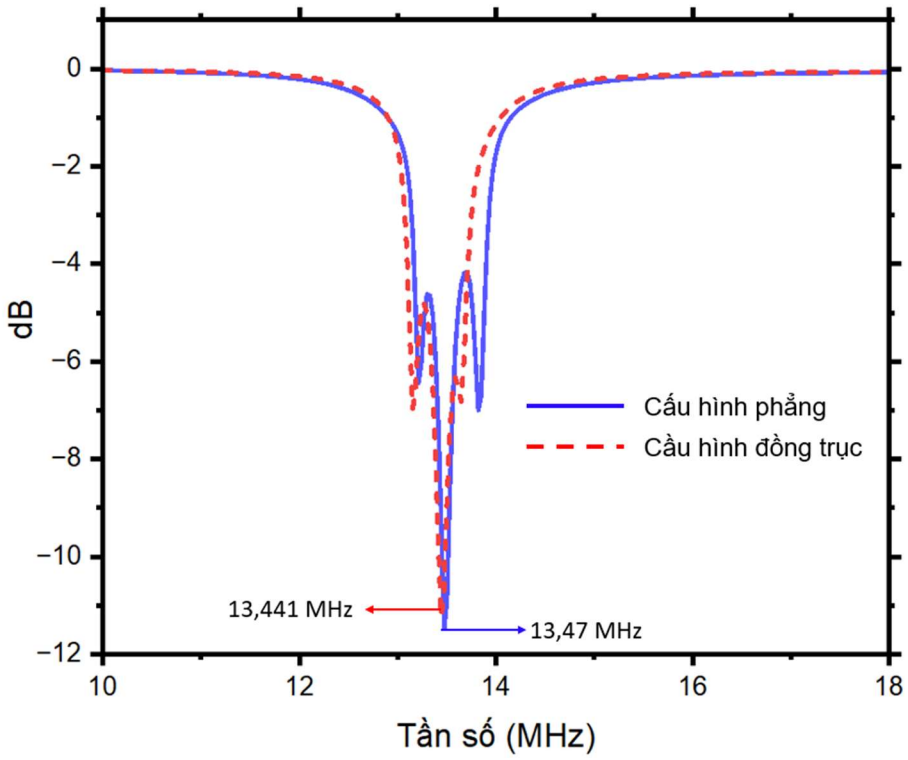
Kết quả mô phỏng Hình 3.2 cho thấy tần số cộng hưởng của một ô cơ sở trong hệ thống truyền năng lượng không dây sử dụng sóng cảm ứng từ (MIW) đạt 13.4 MHz khi sử dụng tụ điện 11 pF. Các thông số mô phỏng trên tấm vật liệu có kích thước ô cơ sở 10×10 cm , số vòng dây N = 10 vòng, khoảng cách giữa các vòng dây 2 mm, vật liệu đế sử dụng FR-4 với độ dày đế 1,2 mm và độ dày lớp đồng 0,035 mm, tần số cộng hưởng này được xác định qua đồ thị phản xạ S_{11} (hệ số phản xạ đầu vào), với giá trị đạt -11.5 dB, cho thấy hiệu suất phối hợp trở kháng tốt và khả năng truyền năng lượng cao tại tần số này. Tụ điện 11 pF được sử dụng để điều chỉnh tần số cộng hưởng của mạch, giúp đạt được sự cộng hưởng mạnh mẽ và tối ưu hóa hiệu suất hệ thống trong dải tần số từ 10 MHz đến 20 MHz.



Hình 3.2. Tần số cộng hưởng 1 ô cơ sở.

Đồ thị trong Hình 3.3 trình bày kết quả mô phỏng thông số S_{11} cho hai cấu trúc đã thiết kế ở phần trước, bao gồm cấu hình dạng đồng trục và cấu hình dạng phẳng. Giá trị S_{11} giúp đánh giá hiệu quả phối hợp trở kháng và xác định tần số cộng hưởng của hệ thống truyền năng lượng không dây dựa trên vật liệu biến hóa. Kết quả mô phỏng cho thấy rõ cả hai cấu hình đều xuất hiện hiện tượng cộng hưởng mạnh, với đỉnh cộng hưởng sâu và sắc nét. Đỉnh cộng hưởng của cấu hình phẳng đạt được tại tần số 13,47 MHz với giá trị S_{11} khoảng -11,5 dB, trong khi cấu hình đồng trục cộng hưởng tại tần số 13,441 MHz với giá trị S_{11} khoảng -11 dB. Các giá trị này thể hiện

sự phối hợp trở kháng rất tốt giữa nguồn phát và các phần tử cộng hưởng. Trong cả hai cấu hình, từ một đỉnh cộng hưởng đơn tại tần số 13,4 MHz, cấu trúc vật liệu MM đã mở rộng vùng cộng hưởng thành một dải tần số từ 12,8 MHz tới 14 MHz.



Hình 3.3. Tần số cộng hưởng của hai cấu hình.

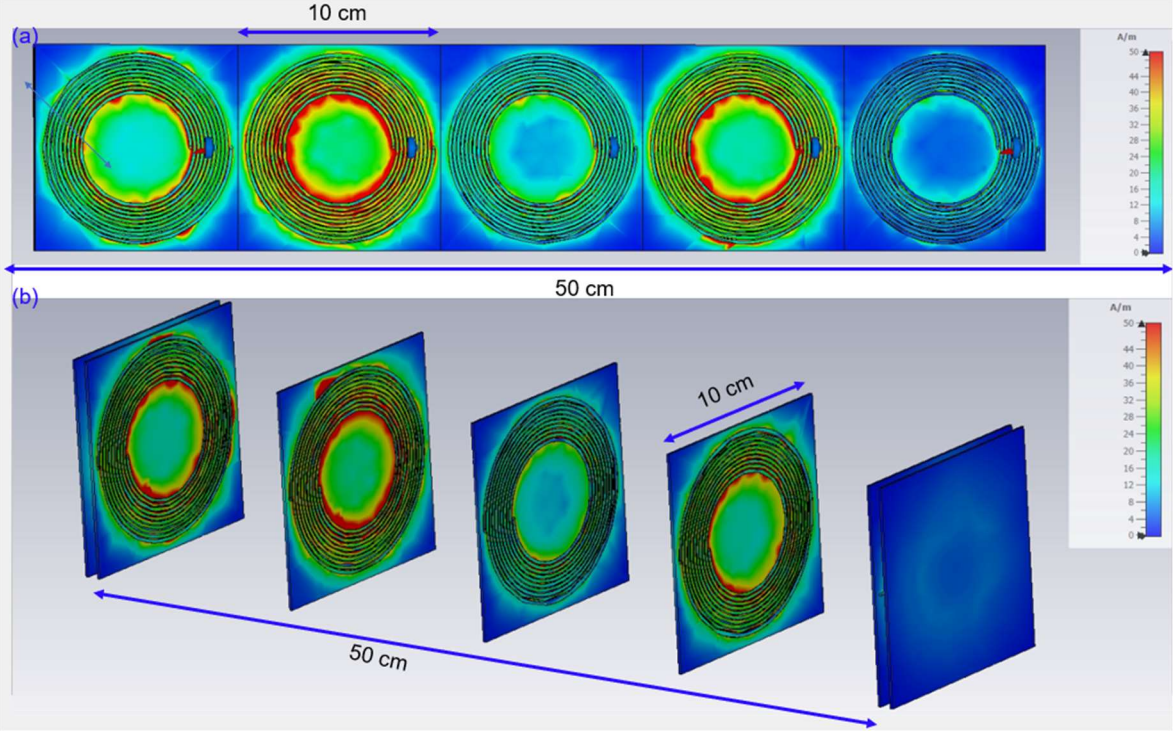
Sự chênh lệch nhỏ về tần số cộng hưởng giữa hai cấu trúc (khoảng 0,03 MHz) cho thấy cả hai thiết kế đều hoạt động ổn định và đạt được hiệu suất tốt trong cùng dải tần số. Tuy nhiên, cấu hình dạng phẳng có giá trị S_{11} thấp hơn, cho thấy cấu hình này có khả năng phối hợp trở kháng tốt hơn một chút so với cấu hình đồng trục, từ đó tiềm năng đem lại hiệu suất truyền năng lượng cao hơn trong ứng dụng thực tế. Kết quả này khẳng định khả năng ứng dụng hiệu quả của các cấu trúc vật liệu biến hóa dạng chuỗi một chiều đã thiết kế trong luận văn cho việc truyền năng lượng không dây sử dụng sóng cảm ứng từ tại dải tần MHz thấp, cụ thể trong khoảng 13–14 MHz.

3.1.2. Phân bố trường từ

Sau khi khảo sát và đánh giá khả năng phối hợp trở kháng thông qua thông số S_{11}, để hiểu rõ hơn về cơ chế truyền năng lượng và đặc tính lan truyền của sóng cảm ứng từ trong hai cấu trúc đã thiết kế, chúng tôi tiếp tục thực hiện mô phỏng và phân tích sự phân bố của trường từ (H-field). Thông tin về cường độ và sự phân bố của trường từ sẽ giúp minh họa trực quan quá trình tương tác và truyền năng lượng giữa

các phần tử cộng hưởng, từ đó khẳng định rõ hơn tính hiệu quả và phù hợp của các cấu trúc được đề xuất cho ứng dụng truyền năng lượng không dây.

Kết quả mô phỏng phân bố trường từ (H-field) của hai cấu hình vật liệu MM được thể hiện trên Hình 3.4(a) (cấu hình phẳng) và Hình 3.4(b) (cấu hình đồng trục). Thông qua phân bố này, chúng ta có thể quan sát rõ sự lan truyền của sóng cảm ứng từ (MIW) giữa các phần tử cộng hưởng trong cấu trúc dạng chuỗi một chiều. Trong cả hai cấu hình, cường độ trường từ đạt giá trị lớn nhất tại phần tử cộng hưởng đầu tiên, là vị trí kích thích ban đầu, sau đó giảm dần dọc theo chiều truyền sóng cảm ứng từ. Hiện tượng này phù hợp với lý thuyết lan truyền MIW, do sóng cảm ứng từ suy hao khi di chuyển qua từng phần tử cộng hưởng liên tiếp trong chuỗi. Đặc biệt, phân bố cường độ trường từ cho thấy sự tương tác giữa các phần tử trong cấu hình đồng trục và cấu hình phẳng có đặc điểm rõ rệt. Cả hai cấu hình đều có khả năng dẫn sóng MI hiệu quả, thể hiện bởi việc duy trì được cường độ trường từ ổn định tại vùng giữa của chuỗi cấu trúc. Điều này chứng minh rằng các cấu trúc được đề xuất đều có thể ứng dụng hiệu quả vào các hệ thống truyền năng lượng không dây sử dụng MIW ở dải tần MHz.



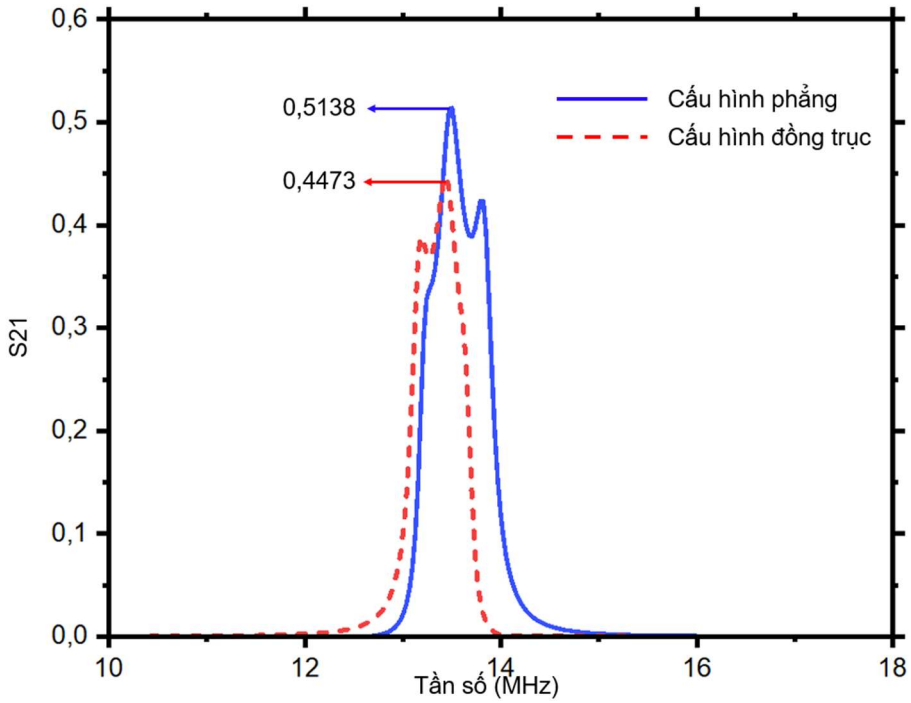
Hình 3.4. (a) Phân bố từ trường cấu hình phẳng, (b) phân bố từ trường cấu hình đồng trục.

Ngoài ra, phân tích chi tiết hơn cho thấy trường từ tập trung mạnh tại vùng gần tâm các phần tử cộng hưởng và suy yếu dần khi lan truyền về hai phía của chuỗi, điều này một lần nữa nhấn mạnh tính chất suy hao tự nhiên của sóng MI trong các cấu trúc

vật liệu biến hóa dạng chuỗi một chiều. Phân bố trường thu được giá trị cường độ từ trường mạnh tại một số ô cơ sở trong khi nó lại yếu hơn tại một số ô khác bởi vì sự khác nhau về pha truyền dẫn trong khi lấy phân bố từ trường. Và một đặc điểm không thể bỏ qua là sự phản xạ tạo thành sóng đứng của MIW trên chuỗi vật liệu MM. Như vậy, việc phân tích phân bố H-field đã giúp làm rõ hơn cơ chế lan truyền sóng cảm ứng từ và khả năng ứng dụng thực tế của hai cấu trúc thiết kế trong nghiên cứu này.

3.1.3. Hệ số truyền qua

Sau khi đã trình bày đặc tính cộng hưởng và phân bố trường trong hai cấu trúc được thiết kế, chúng tôi tiếp tục khảo sát đặc tính truyền dẫn của sóng cảm ứng từ thông qua việc mô phỏng hệ số truyền qua (S_{21}). Kết quả mô phỏng của thông số này được thể hiện trong Hình 3.5 cho cả hai cấu hình: dạng phẳng và dạng đồng trục. Từ kết quả mô phỏng, có thể nhận thấy cả hai cấu hình đều cho thấy đặc tính truyền dẫn mạnh tại tần số cộng hưởng. Đặc biệt, cấu hình phẳng cho giá trị cực đại của hệ số truyền qua S_{21} đạt khoảng 0,5138 dB tại tần số cộng hưởng 13,47 MHz, trong khi cấu hình đồng trục đạt đỉnh thấp hơn một chút là khoảng 0,4473 dB tại tần số 13,44 MHz.



Hình 3.5. Hệ số truyền qua của hai cấu hình

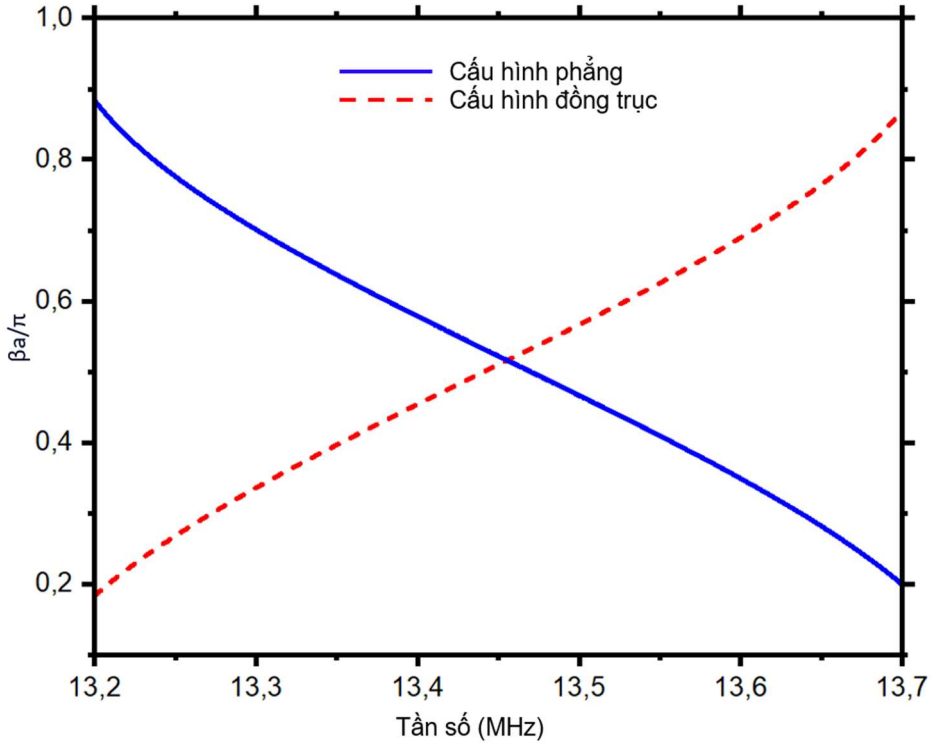
Tuy nhiên, một điểm quan trọng trong cả hai cấu hình, không chỉ tồn tại các đỉnh truyền dẫn đơn lẻ mà còn xuất hiện một vùng truyền dẫn liên tục xung quanh tần số cộng hưởng. Vùng này được hình thành do sự tương tác qua lại giữa các phần tử cộng hưởng (ô cơ sở) trong chuỗi vật liệu MM. Khi các phần tử này được bố trí gần nhau và có sự ghép cặp từ tính, chúng tạo nên hiện tượng lai hóa, cho phép năng

lượng truyền đi hiệu quả trong một dải tần số rộng hơn, thay vì chỉ tập trung tại một điểm cộng hưởng cụ thể. Điều này là đặc trưng của các hệ thống sử dụng cấu trúc chuỗi có tương tác liên kết gần, thường gặp trong truyền sóng chậm (slow-wave propagation).

Sự khác biệt nhỏ giữa hai cấu hình về giá trị cực đại của S_{21} có thể được lý giải bởi sự khác nhau về cơ chế tương tác và hệ số ghép cặp giữa các phần tử cộng hưởng. Cụ thể, cấu hình phẳng có thể đạt hiệu quả truyền dẫn cao hơn do tương tác theo mặt phẳng tạo ra các điều kiện ghép cặp từ tính thuận lợi hơn. Trong khi đó, cấu hình đồng trục tuy vẫn đảm bảo khả năng truyền dẫn tốt, nhưng tương tác theo chiều trục, ở khoảng cách xa hơn, có thể làm giảm nhẹ hiệu suất truyền năng lượng. Điều này chỉ ra rằng cấu hình phẳng có hiệu quả truyền dẫn MIW cao hơn một chút so với cấu hình đồng trục, phù hợp với kết quả về thông số phản xạ S_{11} đã khảo sát trước đó. Sự khác biệt nhỏ trong hệ số truyền dẫn này có thể được giải thích bởi sự khác biệt về cơ chế tương tác và hệ số ghép cặp giữa các phần tử cộng hưởng trong hai cấu hình. Cụ thể, cấu hình phẳng có thể đạt được sự truyền dẫn cao hơn do đặc tính tương tác thuận lợi giữa các phần tử theo mặt phẳng, trong khi cấu hình đồng trục dù có sự truyền dẫn khá tốt nhưng tương tác theo chiều trục có thể làm giảm nhẹ hiệu suất truyền dẫn. Kết quả này khẳng định khả năng truyền sóng cảm ứng từ hiệu quả của các cấu trúc được thiết kế và cho thấy tiềm năng lớn trong ứng dụng thực tế cho các hệ thống truyền năng lượng không dây và truyền thông trường gần.

3.1.4. Đường cong tán sắc của sóng cảm ứng từ (MIW)

Để đánh giá các đặc tính lan truyền của sóng cảm ứng từ trong các cấu trúc vật liệu MM dạng phẳng và đồng trục, chúng tôi tiến hành phân tích đường cong tán sắc, thể hiện sự phụ thuộc của hằng số pha ($\beta a/\pi$) theo tần số. Kết quả tính toán ứng với hai cấu hình: cấu hình đồng trục có $k_{trục} = 0{,}021$, $Q = 154{,}5$, cấu hình phẳng có $k_{\text{phẳng}} = -0{,}0212$, $Q = 154{,}5$ được trình bày trong Hình 3.6, cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa hai cấu hình. Trong cấu hình phẳng (đường liền màu xanh), đường cong tán sắc có độ dốc âm, tức là hằng số pha $\beta a/\pi$ giảm dần khi tần số tăng. Điều này phản ánh đặc tính sóng lan truyền ngược (backward wave propagation) của cấu trúc này, với pha của sóng lan truyền không đi theo hướng thông thường của sóng điện từ. Ngược lại, trong cấu hình đồng trục (đường gạch đỏ), đường cong tán sắc có độ dốc dương, với hằng số pha $\beta a/\pi$ tăng dần theo tần số. Đây là đặc trưng của sóng thuận (forward wave propagation), trong đó sóng truyền theo hướng thông thường.



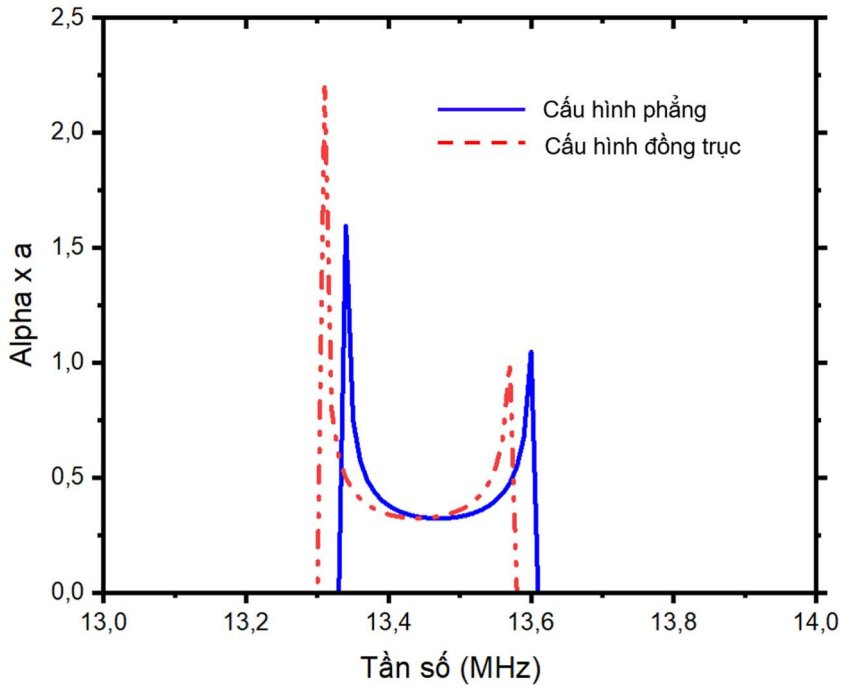
Hình 3.6. Đường cong tán sắc của sóng MI lan truyền trong cấu trúc vật liệu biến hóa.

Sự khác biệt giữa hai cấu hình này chủ yếu do hệ số ghép cặp và cách các phần tử trong chuỗi cấu trúc tương tác với nhau. Cấu hình đồng trục với hệ số ghép cặp dương tạo ra sự tương tác thuận lợi cho sóng truyền theo hướng thẳng, trong khi cấu hình phẳng với hệ số ghép cặp âm khiến đường sức từ trường bị đổi hướng khi lan truyền sang ô cơ sở lân cận.

3.1.5. Tổn hao trong truyền dẫn

Để đánh giá chi tiết hơn đặc tính suy hao của sóng MI trong các cấu trúc vật liệu MM, chúng tôi đã khảo sát mối quan hệ giữa độ suy giảm $Alpha \times a$ ($a = 0.1$ m) và tần số đối với hai cấu hình phẳng và đồng trục. Kết quả được thể hiện trong Hình 3.7 cho thấy cấu hình đồng trục có đáy suy hao tương ứng là $Alpha_{trục} \times a = 0{,}3052$; trong khi đó, cấu hình phẳng có đáy suy hao $Alpha_{phẳng} = 0{,}3037$. Quan sát từ Hình 3.7 cho thấy rõ sự khác biệt về đặc tính suy hao giữa hai cấu hình. Đối với cấu hình đồng trục (đường nét đứt, màu đỏ), đồ thị thể hiện các đỉnh suy giảm rõ rệt tại khoảng tần số cộng hưởng từ 13,44 MHz đến 13,55 MHz. Điều này phản ánh mức suy hao cao hơn do hệ số ghép cặp dương nhỏ, khiến sự lan truyền của sóng MI bị cản trở mạnh khi qua từng phần tử cộng hưởng. Ngược lại, cấu hình phẳng (đường liền, màu xanh) có hệ số suy hao thấp hơn trong cùng dải tần, nhờ hệ số ghép cặp âm và giá trị tuyệt đối lớn hơn. Điều này tạo ra điều kiện thuận lợi hơn cho việc truyền năng lượng qua chuỗi phần tử cộng hưởng. Sự khác biệt về cơ chế ghép cặp và phân cực lan

truyền sóng dẫn đến hiệu suất truyền sóng ổn định và ít suy giảm hơn trong cấu hình đồng trục.



Hình 3.7. Đồ thị suy giảm và tán sắc.

3.2. Kết luận chương 3

Chương 3 của luận văn đã trình bày và phân tích kết quả mô phỏng đối với các cấu trúc vật liệu biến hóa (MM) ứng dụng trong hệ thống truyền năng lượng không dây (WPT) sử dụng sóng cảm ứng từ (MIW). Kết quả mô phỏng cho thấy các cấu trúc vật liệu biến hóa dạng chuỗi một chiều chế tạo từ kim loại đồng trên nền chất FR-4 hoạt động hiệu quả trong dải tần MHz, đặc biệt là trong việc tối ưu hóa tần số cộng hưởng và khả năng truyền tải năng lượng.

Cụ thể, kết quả mô phỏng tần số cộng hưởng cho thấy các cấu trúc vật liệu biến hóa với các đặc tính tần số cộng hưởng ổn định ở khoảng 13–14 MHz và đạt được sự phối hợp trở kháng tốt, giúp nâng cao hiệu suất truyền năng lượng trong hệ thống WPT. Các phân tích về sự phân bố trường từ (H-field) đã chỉ ra rằng sóng MIW có thể duy trì cường độ từ trường mạnh mẽ và ổn định trong suốt quá trình truyền năng lượng, đặc biệt là ở khu vực giữa các phần tử cộng hưởng trong chuỗi.

Bên cạnh đó, kết quả mô phỏng hệ số truyền qua (S21) cho thấy rằng các cấu trúc thiết kế có khả năng truyền năng lượng mạnh mẽ tại tần số cộng hưởng, với các giá trị S21 cao và khả năng truyền dẫn ổn định trong dải tần số từ 13 MHz đến 14 MHz. Đặc biệt, cấu hình dạng phẳng đã thể hiện khả năng truyền năng lượng cao hơn

so với cấu hình đồng trục, chứng minh sự tối ưu hóa trong thiết kế cho các ứng dụng thực tế.

Các kết quả mô phỏng cũng chỉ ra sự khác biệt nhỏ giữa các cấu hình thiết kế, điều này có thể được lý giải bởi sự khác biệt trong cơ chế tương tác và hệ số ghép cặp giữa các phần tử cộng hưởng trong từng cấu trúc. Mặc dù có sự khác biệt nhỏ về tần số cộng hưởng và hệ số truyền qua, nhưng các cấu trúc vật liệu biến hóa đã chứng tỏ được hiệu quả và tiềm năng trong việc cải thiện hệ thống WPT.

Chương này đã cung cấp những kết quả quan trọng và vững chắc để tiến hành các thử nghiệm thực tế trong chương tiếp theo, đồng thời khẳng định rằng vật liệu biến hóa có thể đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiệu suất truyền năng lượng không dây, mở rộng ứng dụng của công nghệ WPT trong các hệ thống thực tế.

CHƯƠNG 4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

4.1. Thiết kế vật liệu biến hóa dạng chuỗi một chiều

4.1.1. Chế tạo tấm vật liệu biến hóa

Thực nghiệm được tiến hành trên các mẫu cuộn dây cộng hưởng từ được chế tạo cụ thể với kích thước mẫu 10 cm × 10 cm, số vòng dây $N = 10$ vòng, khoảng cách giữa các vòng dây 2 mm, vật liệu đế sử dụng FR-4 với độ dày đế 1,2 mm và độ dày lớp đồng 0,035 mm. Các thông số này được lựa chọn nhằm phù hợp với thiết kế đã được tối ưu qua mô phỏng, bảo đảm cân bằng giữa hiệu suất truyền dẫn, độ bền vật liệu, và khả năng chế tạo thực tế. Đặc biệt, vật liệu đế FR-4 được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng điện tử nhờ tính chất điện môi ổn định, độ bền cơ học cao và chi phí hợp lý, phù hợp cho việc triển khai thực nghiệm trên thực tế.

Hình 4.1. Tấm vật liệu biến hóa sau khi đã chế tạo và hàn tụ.

4.1.2. Quy trình thực nghiệm

Mục tiêu chính của thực nghiệm là đo đạc các thông số đặc trưng điện từ như hệ số truyền qua S_{21} và đánh giá các ảnh hưởng của các yếu tố thực tế như, ảnh hưởng của môi trường đến hiệu suất truyền dẫn. Các kết quả đo đạc này sẽ được so sánh trực tiếp với kết quả mô phỏng để kiểm chứng tính chính xác và độ tin cậy của các mô hình tính toán, đồng thời làm cơ sở cho việc đánh giá tiềm năng ứng dụng thực tiễn của hệ thống truyền dẫn năng lượng không dây sử dụng cấu trúc vật liệu biến hóa.

a) Thiết bị thực nghiệm

Thiết bị chính được sử dụng trong quá trình đo đạc thực nghiệm là máy phân tích mạng vector (Vector Network Analyzer – VNA) Rohde & Schwarz ZNB20

(R&S ZNB20) đặt tại Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Đây là thiết bị hai cổng, đo chính xác trong dải tần từ 100 kHz đến 20 GHz với dải động lên tới 140 dB, phù hợp với phép đo chính xác ở tần số MHz. VNA hoạt động dựa trên nguyên lý đưa năng lượng vào một cổng và đo năng lượng thu được tại cùng cổng đó hoặc cổng khác để xác định các thông số quan tâm như R, L, C và các thông số mạng Z, S, $ABCD$. Trong nghiên cứu vật liệu MM ứng dụng trong WPT ở dải tần MHz, các thông số tán xạ (thông số S) như S_{11}, S_{21} là các tham số chính được quan tâm và đo đạc thực nghiệm. Đây cũng là cách biểu diễn thông dụng nhất của máy phân tích mạng vectơ.

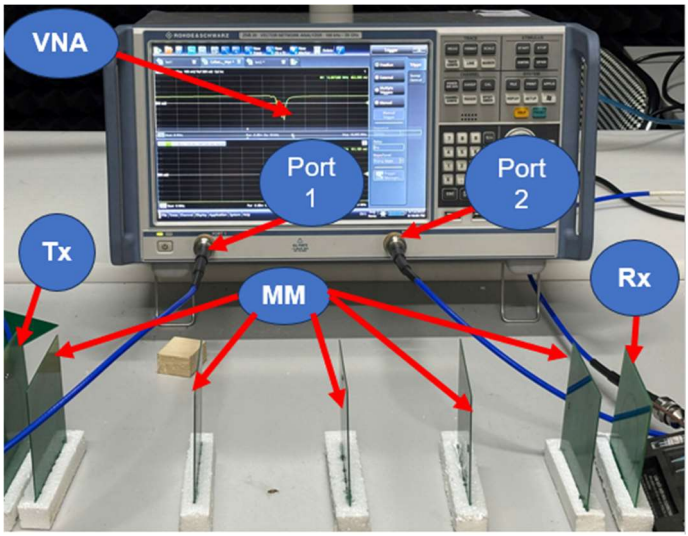
Hình 4.2. Máy phân tích mạng vector (Vector Network Analyzer – VNA) đặt tại Phòng Vật liệu biến hóa và cảm biến – Viện Khoa học vật liệu.

b) Thiết lập thực nghiệm

Để kiểm tra độ chính xác của mô hình mô phỏng, chúng tôi tiến hành thử nghiệm với hai cấu hình: cấu hình đồng trục và cấu hình phẳng. Các phép đo thực nghiệm sẽ được sử dụng để đối chiếu với kết quả mô phỏng về các tham số như tần số cộng hưởng, hệ số truyền qua. Hai đầu của mỗi cuộn thu và phát được kết nối trực tiếp với hai cổng đo của máy VNA. Trước khi tiến hành đo, hệ thống được hiệu chuẩn đầy đủ bằng bộ kit chuẩn theo phương pháp SOLT (Short-Open-Load-Through), nhằm đảm bảo độ chính xác của kết quả đo.

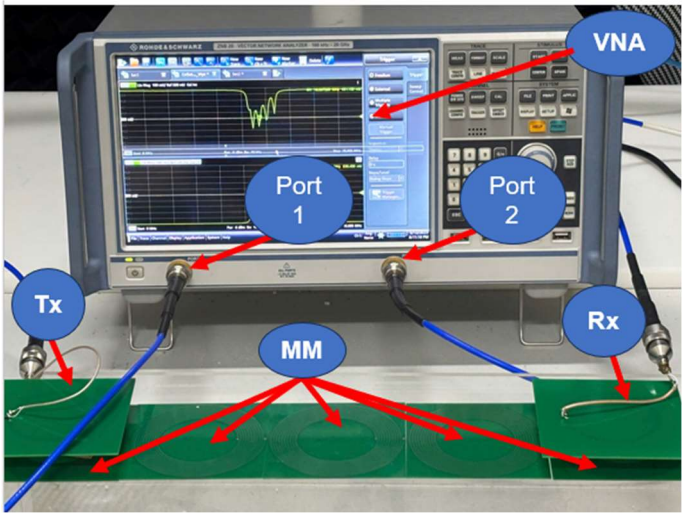
Thiết lập phép đo cho cấu hình đồng trục được thể hiện trong Hình 4.3. Trong thiết lập này, các tấm vật liệu biến hóa được cố định bằng vật liệu cách điện nhằm tránh ảnh hưởng đến kết quả đo. Các thông số quan trọng như khoảng cách giữa hai tấm cuộn cộng hưởng, cũng như khoảng cách giữa nguồn và cuộn thu phát, được bố

trí sao cho phù hợp với các điều kiện trong mô phỏng lý thuyết. Cấu hình này giúp đảm bảo tính đồng nhất giữa thực nghiệm và mô phỏng, từ đó nâng cao độ chính xác trong việc so sánh kết quả.



Hình 4.3. Thiết lập đo cấu hình đồng trục.

Phép đo cho cấu hình phẳng được thiết lập như minh họa trong Hình 4.4. Trong thiết lập này, các tấm vật liệu biến hóa được xếp phẳng trên đế phẳng có tính cách điện, giúp hạn chế tác động từ môi trường lên kết quả đo. Tương tự như cấu hình đồng trục, các thông số như khoảng cách giữa hai tấm cuộn cộng hưởng, cũng như khoảng cách giữa nguồn và cuộn thu phát, đều được bố trí sao cho phù hợp với các điều kiện trong mô phỏng lý thuyết. Các phép đo được thực hiện nhiều lần nhằm đảm bảo độ chính xác cao nhất và cung cấp kết quả đáng tin cậy. Việc lặp lại các phép đo giúp xác định các sai số tiềm ẩn và tăng cường độ chính xác của các kết quả thực nghiệm.



Hình 4.4. Thiết lập đo cấu hình phẳng.

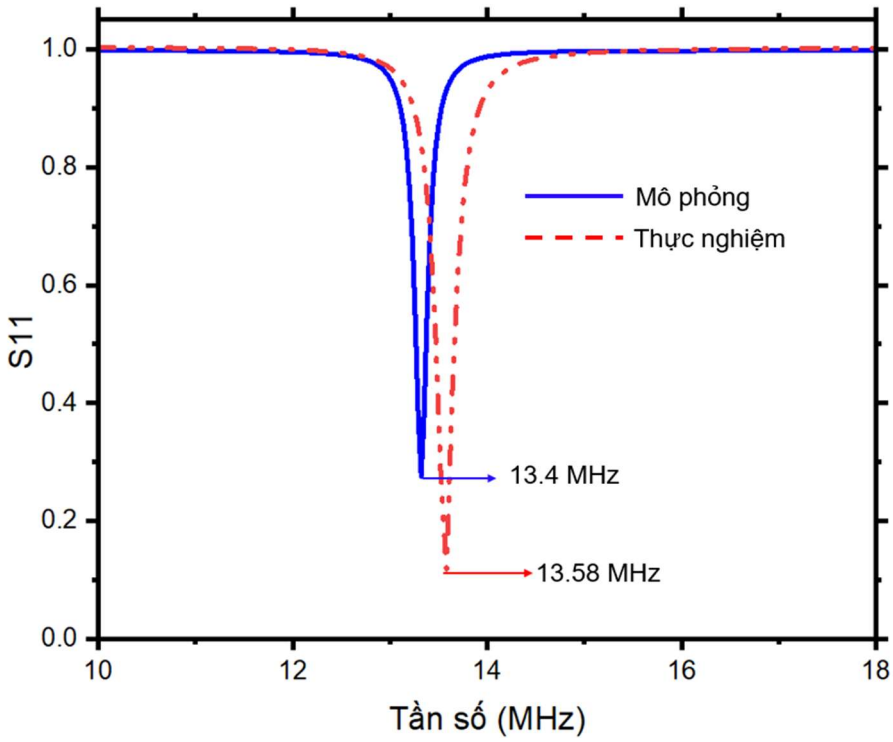
4.2. Khảo sát kết quả thực nghiệm

4.2.1. Tần số cộng hưởng

a) 1 ô cơ sở

Hình 4.5 trình bày sự so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm của phổ phản xạ S_{11} cho 1 ô cơ sở, cho thấy sự trùng khớp khá cao giữa các kết quả lý thuyết và thực tế. Cụ thể, đồ thị mô phỏng (đường màu xanh) cho thấy tần số cộng hưởng tại 13.44 MHz, trong khi kết quả thực nghiệm (đường gạch đỏ) ghi nhận tần số cộng hưởng ở mức 13.58 MHz, với sự chênh lệch nhỏ khoảng 0.14 MHz. Đây là sự khác biệt nằm trong phạm vi có thể chấp nhận được, có thể được giải thích do các yếu tố thực nghiệm như sai số trong chế tạo mẫu, dung sai linh kiện, hoặc sự thay đổi của các điều kiện môi trường trong quá trình thực nghiệm.

Mặc dù có sự chênh lệch nhỏ về tần số cộng hưởng giữa mô phỏng và thực nghiệm, nhưng kết quả thực nghiệm vẫn xác nhận tính chính xác của mô phỏng lý thuyết. So với kết quả mô phỏng trong Hình 3.3, tần số cộng hưởng 13.4 MHz với giá trị S_{11} đạt -11.5 dB, tần số cộng hưởng của ô cơ sở trong thực nghiệm có giá trị 13,56 MHz với độ sâu đáy cộng hưởng tương tự. Điều này chỉ ra rằng mô phỏng đã dự đoán đúng được đặc tính cộng hưởng của ô cơ sở, mở ra cơ hội tối ưu hóa thiết kế cho hệ thống truyền năng lượng không dây sử dụng sóng cảm ứng từ (MIW) trong thực tế.

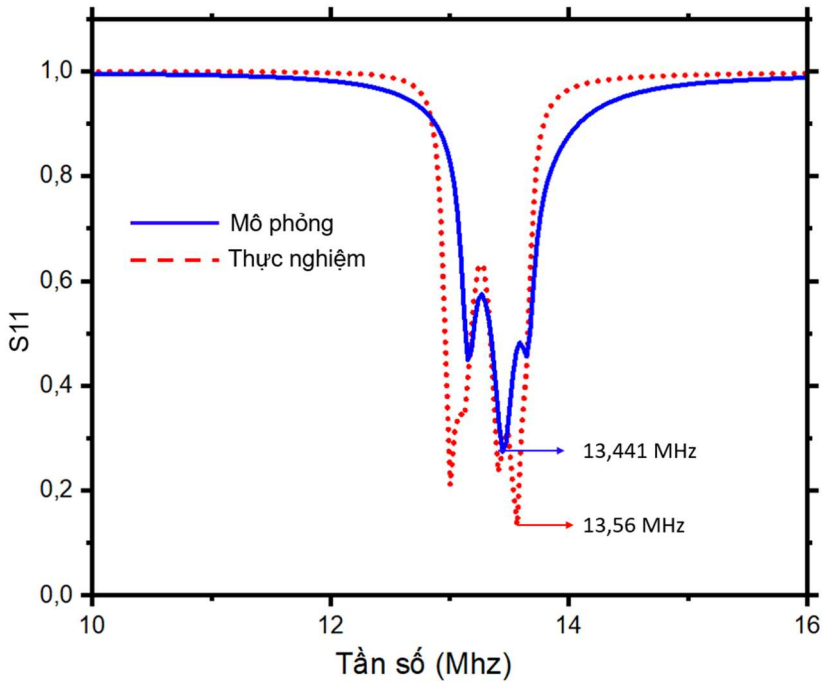


Hình 4.5. Tần số cộng hưởng của 1 ô cơ sở so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng.

b) Cấu hình đồng trục

Biểu đồ S_{11} trong Hình 4.6 thể hiện sự so sánh giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm đối với tần số cộng hưởng của cấu hình đồng trục trong chuỗi vật liệu biến hóa. Nhờ sự tương tác mạnh giữa các ô cơ sở trong chuỗi MM, hiện tượng cộng hưởng không chỉ xuất hiện tại một điểm đơn lẻ mà đã mở rộng thành một dải cộng hưởng liên tục trong khoảng từ 13 MHz đến 13,8 MHz. Kết quả mô phỏng ghi nhận đỉnh cộng hưởng tại 13,441 MHz, trong khi thực nghiệm cho thấy đỉnh tương ứng tại 13,56 MHz – chênh lệch khoảng 0,12 MHz. Mức sai lệch này được đánh giá là nhỏ và hoàn toàn có thể chấp nhận trong các điều kiện thí nghiệm thực tế, vốn chịu ảnh hưởng từ sai số thiết bị đo, dung sai linh kiện, cũng như các biến động trong quá trình chế tạo và môi trường xung quanh.

Sự trùng khớp về xu hướng cộng hưởng và dải tần hoạt động giữa mô phỏng và thực nghiệm khẳng định tính chính xác của mô hình lý thuyết. Điều này không chỉ chứng minh năng lực dự đoán của phương pháp mô phỏng đối với hành vi điện từ của hệ thống, mà còn củng cố độ tin cậy trong việc áp dụng thiết kế mô phỏng để định hướng chế tạo thực tế trong các hệ thống truyền năng lượng không dây sử dụng sóng cảm ứng từ.



Hình 4.6. Tần số cộng hưởng cấu hình đồng trục so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng.

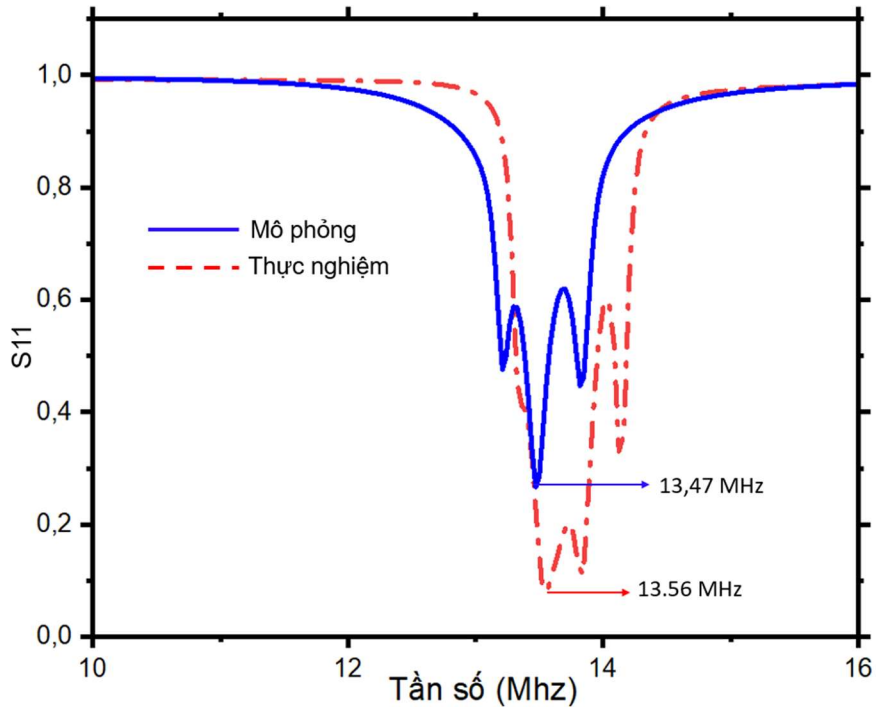
Các kết quả này hỗ trợ giả thuyết rằng vật liệu biến hóa có thể sử dụng hiệu quả trong việc cải thiện hệ thống WPT thông qua MIW, với tần số cộng hưởng gần như khớp giữa mô phỏng và thực nghiệm. Điều này khẳng định tính khả thi và độ tin

cậy của mô hình mô phỏng trong việc thiết kế các hệ thống sử dụng vật liệu biến hóa ở dải tần MHz thấp.

c) Cấu hình phẳng

Hình 4.7 cho ta thấy cấu hình phẳng cho thấy sự so sánh giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm, với hai đỉnh cộng hưởng tại 13,47 MHz (cho kết quả mô phỏng) và 13,56 MHz (cho kết quả thực nghiệm). Sự chênh lệch nhỏ giữa hai tần số cộng hưởng này, khoảng 0,09 MHz, cho thấy 2. Sự khác biệt này vẫn nằm trong phạm vi có thể chấp nhận được do các yếu tố thực nghiệm như sai số đo, sự thay đổi của vật liệu, và các điều kiện môi trường. Điều này chứng tỏ rằng mô phỏng lý thuyết đã được thực hiện chính xác và có thể tin cậy trong việc dự đoán hành vi của hệ thống.

Kết quả cho thấy cấu hình phẳng có thể đạt được hiệu quả truyền năng lượng tương đối tốt trong dải tần số 13-14 MHz, và mô phỏng lý thuyết có thể sử dụng để dự đoán chính xác các đặc tính của hệ thống trong thực tế. Từ kết quả so sánh tần số cộng hưởng thực nghiệm và mô phỏng của cấu hình đồng trục, tuy có sự khác biệt nhỏ về tần số cộng hưởng nhưng kết cho thấy phép đo thực nghiệm có thể được tin tưởng để tối ưu hóa các hệ thống truyền năng lượng không dây.

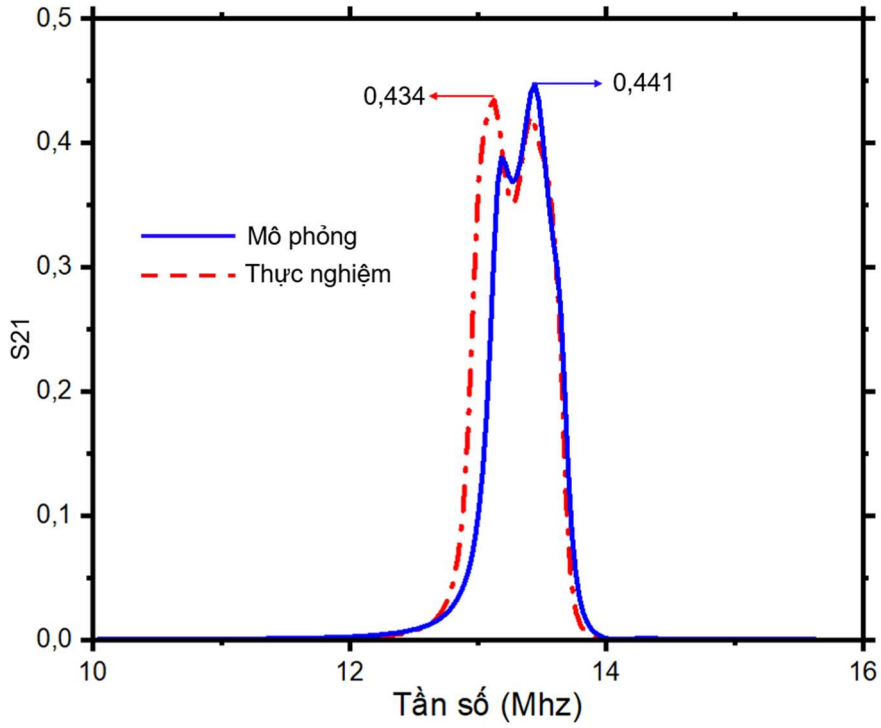


Hình 4.7. Tần số cộng hưởng cấu hình phẳng so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng.

4.2.2. Hệ số truyền qua

Sau khi hoàn thành khảo sát tần số cộng hưởng và so sánh kết quả thực nghiệm với mô phỏng lý thuyết, chúng tôi đo đạc đặc tính truyền dẫn của sóng cảm ứng từ

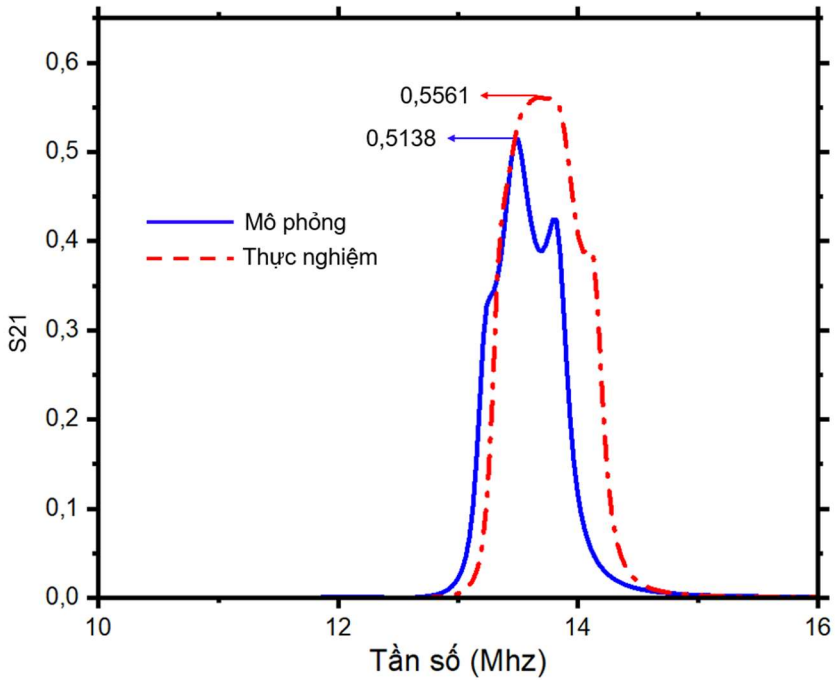
trong hệ thống vật liệu MM. Việc so sánh hệ số truyền qua (S_{21}) giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng sẽ giúp đánh giá mức độ đồng nhất và hiệu quả của hệ thống truyền năng lượng không dây. Hình 4.8 trình bày kết quả so sánh hệ số truyền qua giữa mô phỏng và thực nghiệm cho cấu hình đồng trục. Tại tần số cộng hưởng, giá trị cực đại của S_{21} đạt khoảng 0,441 trong mô phỏng và 0,434 trong thực nghiệm. Sai lệch giữa hai kết quả chỉ khoảng 0,007 – một mức rất nhỏ, hoàn toàn chấp nhận được trong điều kiện thực nghiệm với những yếu tố không lý tưởng như sai số đo đạc, dung sai linh kiện và điều kiện môi trường. Quan sát hình dạng của đường cong S_{21}, có thể thấy rằng không chỉ đỉnh cộng hưởng mà toàn bộ dải tần truyền dẫn từ khoảng 13–14 MHz giữa mô phỏng và thực nghiệm đều có sự tương đồng cao về biên độ và xu hướng. Điều này cho thấy mô hình mô phỏng không chỉ phản ánh chính xác vị trí cộng hưởng mà còn tái hiện được đặc tính truyền sóng của toàn chuỗi vật liệu – nơi năng lượng được dẫn truyền không chỉ tại điểm cộng hưởng mà còn trong một vùng tần số rộng hơn do tương tác giữa các phần tử cộng hưởng.



Hình 4.8. Hệ số truyền qua cấu hình đồng trục so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm.

Tương tự, Hình 4.9 thể hiện kết quả S_{21} của cấu hình phẳng. Trong mô phỏng, giá trị cực đại đạt 0,5138, trong khi thực nghiệm ghi nhận giá trị 0,5561, chênh lệch khoảng 0,0423. Mặc dù mức chênh lệch này lớn hơn so với cấu hình đồng trục, kết quả vẫn nằm trong phạm vi sai số cho phép và không ảnh hưởng nhiều đến tính đồng

nhất chung giữa hai phương pháp khảo sát. Đặc biệt, xu hướng của đường cong S_{21} trong cả hai trường hợp đều gần như trùng khớp – từ độ rộng phổ cho đến độ dốc tại các cạnh biên. Dải truyền dẫn thu được trong thực nghiệm có độ rộng và biên dạng tương tự với kết quả mô phỏng, khẳng định tính chính xác của mô hình lý thuyết và năng lực mô phỏng trong việc dự đoán hành vi lan truyền của sóng cảm ứng từ trong cấu trúc thực tế.



Hình 4.9. Hệ số truyền qua cấu hình đồng phẳng so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm.

Tổng kết lại, sự tương đồng cao giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm ở cả hai cấu hình về cả giá trị cực đại lẫn hình dạng phổ truyền dẫn là minh chứng rõ ràng cho tính khả thi của mô hình nghiên cứu. Điều này đồng thời củng cố niềm tin rằng hệ thống truyền năng lượng không dây sử dụng vật liệu biến hóa dạng chuỗi một chiều có thể được ứng dụng hiệu quả trong thực tiễn, với khả năng kiểm soát và tối ưu hóa hiệu suất truyền năng lượng nhờ thiết kế cấu trúc chính xác ngay từ khâu mô phỏng.

4.3. Kết luận chương 4

Chương 4 của luận văn đã trình bày kết quả thực nghiệm của các cấu trúc vật liệu biến hóa dạng chuỗi một chiều sử dụng kim loại đồng trên nền FR-4, ứng dụng trong hệ thống truyền năng lượng không dây (WPT) sử dụng sóng cảm ứng từ (MIW). Các kết quả thực nghiệm đã được tiến hành để kiểm chứng độ chính xác của mô phỏng lý thuyết và đánh giá hiệu quả thực tế của các cấu trúc vật liệu biến hóa đã thiết kế.

Kết quả thực nghiệm cho thấy sự trùng khớp cao giữa các dữ liệu mô phỏng và thực tế. Tần số cộng hưởng của các cấu trúc vật liệu biến hóa trong thực nghiệm đạt giá trị gần tương đồng với các giá trị mô phỏng, với sự chênh lệch nhỏ nằm trong phạm vi chấp nhận được. Điều này chứng tỏ rằng mô phỏng lý thuyết đã phản ánh chính xác đặc tính cộng hưởng của vật liệu biến hóa, giúp tối ưu hóa thiết kế và dự đoán hiệu suất của hệ thống truyền năng lượng không dây.

Kết quả đo đạc hệ số truyền qua (S21) cũng cho thấy sự tương đồng giữa thực nghiệm và mô phỏng, đặc biệt ở cấu hình đồng trục và cấu hình phẳng. Cả hai cấu hình đều cho thấy khả năng truyền năng lượng mạnh mẽ tại tần số cộng hưởng, với sự khác biệt nhỏ trong các giá trị đo đạc, điều này có thể được lý giải bởi các yếu tố thực tế như sai số trong chế tạo mẫu và điều kiện môi trường trong quá trình thử nghiệm. Tuy nhiên, sự đồng nhất này củng cố tính khả thi và độ tin cậy của các mô phỏng lý thuyết và chứng minh tiềm năng ứng dụng của vật liệu biến hóa trong việc cải thiện hiệu suất hệ thống WPT.

Các kết quả thực nghiệm đã xác nhận rằng vật liệu biến hóa có thể cải thiện hiệu suất truyền năng lượng không dây, đồng thời mở ra khả năng ứng dụng thực tế cho các hệ thống WPT trong các dải tần MHz thấp. Điều này giúp khắc phục một số hạn chế của các hệ thống truyền năng lượng không dây hiện tại, đặc biệt là trong việc mở rộng phạm vi truyền tải và tăng cường hiệu quả năng lượng trong các ứng dụng thực tế.

Chương này đã hoàn thành việc kiểm chứng và đánh giá các kết quả thực nghiệm, từ đó xác nhận tính khả thi của việc sử dụng vật liệu biến hóa trong các hệ thống truyền năng lượng không dây. Những kết quả này sẽ là cơ sở vững chắc cho việc triển khai các ứng dụng thực tế và tối ưu hóa thiết kế các hệ thống WPT trong tương lai.

KẾT LUẬN

Luận văn "Nghiên cứu vật liệu biến hóa dạng chuỗi một chiều chế tạo từ kim loại đồng trên đế FR-4 hoạt động tại tần số MHz ứng dụng trong truyền năng lượng không dây" đã tập trung nghiên cứu và phát triển vật liệu biến hóa (MM) ứng dụng trong hệ thống truyền năng lượng không dây (WPT), với mục tiêu cải thiện hiệu suất truyền tải năng lượng trong các hệ thống hoạt động ở tần số MHz. Trong quá trình nghiên cứu, luận văn đã xây dựng được cơ sở lý thuyết vững chắc về nguyên lý truyền năng lượng không dây, đặc biệt là WPT sử dụng sóng cảm ứng từ (MIW) và cộng hưởng từ (MR-WPT). Những nghiên cứu này giúp chỉ ra vai trò quan trọng của vật liệu biến hóa trong việc tối ưu hóa quá trình truyền năng lượng, đặc biệt trong các hệ thống hoạt động ở dải tần thấp.

Phương pháp nghiên cứu được áp dụng trong luận văn bao gồm mô hình hóa mạch LC để mô phỏng cấu trúc vật liệu biến hóa, sử dụng phần mềm CST Studio Suite để tiến hành mô phỏng số và thực hiện các thí nghiệm chế tạo mẫu vật liệu biến hóa. Những phương pháp này đã giúp xác định được các cấu trúc vật liệu MM phù hợp với hệ thống WPT, đảm bảo khả năng hoạt động ổn định ở tần số MHz và tối ưu hóa hiệu suất truyền tải năng lượng. Mô phỏng số đã dự đoán chính xác các thông số quan trọng như tần số cộng hưởng và hệ số chất lượng, từ đó hỗ trợ thiết kế hệ thống truyền năng lượng không dây hiệu quả.

Kết quả mô phỏng trong luận văn đã cho thấy các cấu trúc vật liệu biến hóa có thể hoạt động hiệu quả trong việc tối ưu hóa tần số cộng hưởng, đồng thời tăng cường khả năng truyền tải năng lượng không dây. Các cấu trúc được nghiên cứu, bao gồm cấu hình phẳng và đồng trục, đều đạt được hiệu quả cao trong việc duy trì tần số cộng hưởng và truyền năng lượng. Bên cạnh đó, mô phỏng hệ số truyền qua (S21) cho thấy các cấu trúc này có khả năng truyền năng lượng mạnh mẽ tại tần số cộng hưởng, với khả năng truyền dẫn ổn định trong dải tần từ 13 MHz đến 14 MHz.

Kết quả thực nghiệm cũng đã xác nhận tính khả thi và hiệu quả của mô phỏng lý thuyết. Các thí nghiệm về tần số cộng hưởng và hệ số truyền qua (S21) đã chỉ ra sự trùng khớp cao với kết quả mô phỏng, với sự chênh lệch nhỏ nằm trong phạm vi chấp nhận được. Điều này chứng tỏ rằng mô phỏng lý thuyết đã phản ánh chính xác các đặc tính cộng hưởng và hiệu suất hoạt động của vật liệu biến hóa, đồng thời khẳng định rằng các vật liệu này có thể ứng dụng hiệu quả trong các hệ thống WPT thực tế. Các kết quả thực nghiệm về phân bố trường từ (H-field) cũng cho thấy sóng cảm ứng từ (MIW) có thể duy trì cường độ trường từ ổn định, giúp tối ưu hóa quá trình truyền tải năng lượng qua các phần tử cộng hưởng.

Cuối cùng, nghiên cứu trong luận văn này không chỉ chứng minh tính khả thi của vật liệu biến hóa trong việc cải thiện hiệu suất truyền năng lượng không dây mà còn mở ra tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống WPT. Các kết quả thực nghiệm đã khẳng định rằng việc sử dụng vật liệu biến hóa có thể giúp cải thiện đáng kể hiệu suất truyền năng lượng, đặc biệt là trong các ứng dụng yêu cầu khoảng cách truyền tải lớn và hiệu suất năng lượng cao, từ đó đóng góp vào việc phát triển các ứng dụng trong điện tử, viễn thông và các hệ thống sạc không dây.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH LIÊN QUAN

1. **N. K. Viet**, L. T. H. Hiep, B. X. Khuyen, B. S. Tung, V. D. Lam, and T. S. Pham, "Magneto-inductive wave propagating in magnetic metamaterial structure for wireless power transfer and near-field communications", The 11th International Workshop on Advanced Materials Science and Nanotechnology (IWAMSN 2024), 22-25 September, 2024 – Da Nang, Vietnam.
2. Nguyen Ngoc Linh, Thi Hong Hiep Le, **Nguyen Khanh Viet**, Huu Nguyen Bui, Hai Anh Nguyen, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Thanh Son Pham and Vu Dinh Lam "Patterned ground shielding for wireless power transfer system based 1-D metamaterial array in conductive media*"* Physica Scripta Accepted Manuscript online 20 May 2025, DOI: 10.1088/1402-4896/addb02.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Lee W. and Yoon Y.-K., 2020, Wireless Power Transfer Systems Using Metamaterials: A Review, *IEEE Access*, 8, pp. 147930–147947.
2. Rong C., Yan L., Li L., Li Y., and Liu M., 2023, A Review of Metamaterials in Wireless Power Transfer, Materials, 16(17), pp. 6008., .
3. I. Alhamrouni, M. Iskandar, M. Salem, L. J. Awalin, A. Jusoh, and T. Sutikno, "Application of inductive coupling for wireless power transfer," IJPEDS, vol. 11, no. 3, p. 1109, Sep. 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i3.pp1109-1116., .
4. D.-W. Seo, J.-H. Lee, and H. Lee, "A Study on Two-coil and Four-coil Wireless Power Transfer System Using Z-parameter Approach," ETRI J, Feb. 2016, doi: 10.4218/etrij.16.0115.0692., .
5. Abou Houran M., Yang X., and Chen W., 2018, Magnetically Coupled Resonance WPT: Review of Compensation Topologies, Resonator Structures with Misalignment, and EMI Diagnostics, *Electronics*, 7(11), pp. 296.
6. B. Wang, K. H. Teo, T. Nishino, W. Yerazunis, J. Barnwell, and J. Zhang, "Experiments on wireless power transfer with metamaterials," Appl. Phys. Lett., vol. 98, no. 25, p. 254101, Jun. 2011, doi: 10.1063/1.3601927.,.
7. A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, Jul. 2007, doi: 10.1126/science.1143254.,.
8. X. Zhang, H. Meng, B. Wei, S. Wang, and Q. Yang, "An improved three-coil wireless power link to increase spacing distance and power for magnetic resonant coupling system," J Wireless Com Network, vol. 2018, no. 1, p. 131, Dec. 2018, doi: 10.1186/s13638-018-1148-8.,.
9. M. Song, P. Belov, and P. Kapitanova, "Wireless power transfer inspired by the modern trends in electromagnetics," Applied Physics Reviews, vol. 4, no. 2, p. 021102, Jun. 2017, doi: 10.1063/1.4981396.,.
10. X. Wei, Z. Wang, and H. Dai, "A Critical Review of Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Energies, vol. 7, no. 7, pp. 4316–4341, Jul. 2014, doi: 10.3390/en7074316.,.
11. W. Lee and Y.-K. Yoon, "Wireless Power Transfer Systems Using Metamaterials: A Review," IEEE Access, vol. 8, pp. 147930–147947, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015176.,

12. L. T. Hong Hiep et al., “Enhanced transmission efficiency of magneto-inductive wave propagating in non-homogeneous 2-D magnetic metamaterial array,” Phys. Scr., vol. 97, no. 2, p. 025504, Feb. 2022, doi: 10.1088/1402-4896/ac4a3a.,.
13. Veselago V.G., 1968, THE ELECTRODYNAMICS OF SUBSTANCES WITH SIMULTANEOUSLY NEGATIVE VALUES OF ϵ AND μ, *Sov Phys Uspekhi*, 10(4), pp. 509–514.
14. Pendry J.B., Holden A.J., Stewart W.J., and Youngs I., 1996, Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures, *Phys Rev Lett*, 76(25), pp. 4773–4776.
15. Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., and Stewart W.J., 1999, Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 47(11), pp. 2075–2084.
16. Rong C., Lu C., Zeng Y., Tao X., Liu X., Liu R., He X., and Liu M., 2021, A critical review of metamaterial in wireless power transfer system, *IET Power Electron*, 14(9), pp. 1541–1559.
17. N. Shinohara, “Power without wires,” IEEE Microwave, vol. 12, no. 7, pp. S64–S73, Dec. 2011, doi: 10.1109/MMM.2011.942732.,.
18. Y. Zeng et al., “Analysis and Design of Asymmetric Mid-Range Wireless Power Transfer System with Metamaterials,” Energies, vol. 14, no. 5, p. 1348, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14051348.,.
19. Pham T.S., Nguyen T.D., and Vu D.L., 2022, Metamaterials for Improving Efficiency of Magnetic Resonant Wireless Power Transfer Applications, *Commun Phys*, 32(1), pp. 39.
20. Harris W.C., Stancil D.D., and Ricketts D.S., 2019, Improved wireless power transfer efficiency with non-perfect lenses, *Appl Phys Lett*, 114(14), pp. 143903.
21. W. C. Harris, D. D. Stancil, and D. S. Ricketts, “Improved wireless power transfer efficiency with non-perfect lenses,” Appl. Phys. Lett., vol. 114, no. 14, p. 143903, Apr. 2019, doi: 10.1063/1.5081629.,.
22. R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, “Experimental Verification of a Negative Index of Refraction,” Science, vol. 292, no. 5514, pp. 77–79, Apr. 2001, doi: 10.1126/science.1058847.,.

23. R. Marqués, F. Medina, and R. Rafii-El-Idrissi, “Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials,” Phys. Rev. B, vol. 65, no. 14, p. 144440, Apr. 2002, doi: 10.1103/PhysRevB.65.144440,.

24. E. Shamonina, V. A. Kalinin, K. H. Ringhofer, and L. Solymar, “Magneto-inductive waveguide,” Electron. Lett., vol. 38, no. 8, p. 371, 2002, doi: 10.1049/el:20020258.,

25. E. Shamonina, V. A. Kalinin, K. H. Ringhofer, and L. Solymar, “Magnetoinductive waves in one, two, and three dimensions,” Journal of Applied Physics, vol. 92, no. 10, pp. 6252–6261, Nov. 2002, doi: 10.1063/1.1510945,.

26. Solymar L. and Shamonina E., 2009, Waves in Metamaterials, *Oxford University Press Inc., New York.*

27. Solymar L. and Shamonina E., 2009, Waves in metamaterials, *Oxford University Press.*

28. Syms R.R.A., Young I.R., and Solymar L., 2006, Low-loss magneto-inductive waveguides, *J Phys Appl Phys*, 39(18), pp. 3945–3951.

29. Syms R.R.A., Shamonina E., and Solymar L., 2005, Positive and negative refraction of magnetoinductive waves in two dimensions, *Eur Phys J B*, 46(2), pp. 301–308.

30. T. S. Pham, H. N. Bui, and J.-W. Lee, “Wave propagation control and switching for wireless power transfer using tunable 2-D magnetic metamaterials,” J. Magn. Magn. Mater., vol. 485, pp. 126–135, Sep. 2019.

31. L. T. H. Hiep, B. X. Khuyen, B. S. Tung, Q. M. Ngo, V. D. Lam, and T. S. Pham, “Flexible magnetic metasurface with defect cavity for wireless power transfer system,” Materials, vol. 15, no. 19, Art. no. 19, Jan. 2022.

32. L. T. H. Hiep, T. S. Pham, B. X. Khuyen, B. S. Tung, Q. M. Ngo, N. T. Hien, N. T. Minh, and V. D. Lam, “Enhanced transmission efficiency of magneto-inductive wave propagating in non-homogeneous 2-D magnetic metamaterial array,” Phys. Scr., vol. 97, no. 2, p. 025504, Jan. 2022.

33. A. Voronov, O. Sydoruk, and R. R. A. Syms, “Power waves and scattering parameters in magneto-inductive systems,” AIP Adv., vol. 11, no. 4, p. 045327, Apr. 2021

34. L. Zhang, Y. Yang, Z. Jiang, Q. Chen, Q. Yan, Z. Wu, B. Zhang, J. Huangfu, and H. Chen, “Demonstration of topological wireless power transfer,” Sci. Bull., vol. 66, no. 10, pp. 974 980, May 2021.

35. C. Xiao, K. Wei, D. Cheng, and Y. Liu, “Wireless Charging System Considering Eddy Current in Cardiac Pacemaker Shell: Theoretical Modeling, Experiments, and Safety Simulations,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 5, pp. 3978–3988, May 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2645142.

36. J. H. Choi, S. H. Kang, and C. W. Jung, “Magnetic Resonant Wireless Power Transfer with L-Shape Arranged Resonators for Laptop Computer,” *Journal of electromagnetic engineering and science*, vol. 17, no. 3, pp. 126–132, Jul. 2017, doi: 10.5515/JKIEES.2017.17.3.126.

37. Sadeque Reza Khan, Sumanth Kumar Pavuluri, Gerard Cummins “Wireless Power Transfer Techniques for Implantable Medical Devices: A Review”, 2020 Jun 19;20(12):3487, doi: 10.3390/s2012348

38. Amjad Iqbal, Penchala Reddy Sura, Muath Al-Hasan, Ismail Ben Mabrouk & Tayeb A. Denidni, “Wireless power transfer system for deep-implanted biomedical devices”, Scientific Reports, 12, Article number: 13689 (2022)

39. Sultan Mahmud, Ali Nezaratizadeh, Alfredo Bayu Satriya, Yong-Kyu Yoon, John S. Ho & Adam Khalif, “Harnessing metamaterials for efficient wireless power transfer for implantable medical devices”, Bioelectronic Medicine, 10, Article number: 7 (2024)