

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

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

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Lê Thị Hồng Hiệp

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Hà Nội – 2025

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

Lê Thị Hồng Hiệp

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Vật liệu điện tử

Mã số: 9 44 01 23

**Xác nhận của Học viện
Khoa học và Công nghệ**

Người hướng dẫn 1

Người hướng dẫn 2

TS. Phạm Thanh Sơn

GS.TS. Vũ Đình Lãm

Hà Nội – 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án: "Nghiên cứu chế tạo vật liệu biến hoá có từ trường định xứ ứng dụng trong truyền dẫn năng lượng không dây ở dải tần số MHz" là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn khoa học của TS. Phạm Thanh Sơn và GS.TS. Vũ Đình Lãm. Luận án 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 án. Các số liệu, kết quả được trình bày trong luận án 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 án được hoàn thành trong thời gian tôi làm nghiên cứu sinh tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Hà Nội, ngày tháng năm 2025

Tác giả luận án

Lê Thị Hồng Hiệp

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên, tôi xin được gửi lời cảm ơn chân thành và sâu sắc nhất tới GS.TS. Vũ Đình Lâm và TS. Phạm Thanh Sơn, các thầy đã luôn tận tình hướng dẫn, định hướng kịp thời và tạo điều kiện thuận lợi nhất để tôi hoàn thành luận án này.

Tôi xin chân thành 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 hoá và ứng dụng - 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 án.

Tôi xin chân thành cảm ơn PGS.TS. Bùi Xuân Khuyển (Viện Khoa học vật liệu), TS. Bùi Sơn Tùng (Học viện Khoa học và Công nghệ), TS. Bùi Hữu Nguyên (Trường Đại học Mở - Địa Chất) và các anh chị em trong Nhóm nghiên cứu Meta-Group đã giúp đỡ, động viên tôi trong quá trình thực hiện luận án.

Tôi xin chân thành cảm ơn Ban Giám hiệu Trường Đại học Phòng cháy chữa cháy, Lãnh đạo Khoa và các đồng nghiệp Khoa Cơ sở ngành Phòng cháy chữa cháy, nơi tôi đang công tác, đã tạo điều kiện thuận lợi cho tôi về thời gian và công việc tại cơ quan trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Tôi xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ từ đề tài thuộc các hướng KHCN ưu tiên cấp Viện Hàn lâm KH&CNVN, mã số VAST03.01/21-22, đề tài thuộc chương trình phát triển nhóm nghiên cứu xuất sắc tại Viện Hàn lâm KH&CNVN, mã số NCXS02.01/23-24 và đề tài KHCN nghiên cứu cơ bản và phát triển vật liệu đặc biệt cấp Viện Hàn lâm KH&CNVN, mã số NCPTVL.03/24-25 đã tạo điều kiện cho tôi có cơ hội thực hiện những nghiên cứu có ý nghĩa góp phần hoàn thành luận án.

Tôi xin chân thành cảm ơn Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup, Viện Nghiên cứu Dữ liệu lớn đã tài trợ Học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước cho tôi với mã số VINIF.2022.TS040; Tổ chức Khoa học và Giáo dục Gặp gỡ Việt Nam đã trao học bổng cho tôi trong quá trình tôi học tập, nghiên cứu và thực hiện luận án.

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 án này.

Hà Nội, ngày tháng năm 2025

Tác giả luận án

Lê Thị Hồng Hiệp

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẬT LIỆU BIẾN HOÁ CÓ ĐỘ TỪ THÂM ÂM HOẠT ĐỘNG Ở DẢI TẦN SỐ MHz ỨNG DỤNG TRONG WPT.....	8
1.1. Lịch sử hình thành và phát triển của WPT	8
1.2. Phân loại, nguyên lý và một số ứng dụng của WPT	10
1.2.1. Phân loại WPT.....	10
1.2.2. Nguyên lý của WPT trường gần thông qua từ trường	18
1.2.3. Một số ứng dụng của WPT ở dải tần số MHz	21
1.3. Vật liệu biến hoá ứng dụng trong MR-WPT ở dải tần số MHz	30
1.3.1. Vật liệu biến hoá.....	30
1.3.2. Vật liệu MM ở dải tần số MHz ứng dụng trong MR-WPT.....	37
1.3.3. Lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu MM.....	49
1.4. Kết luận chương 1	51
CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	53
2.1. Phương pháp tính toán lý thuyết và mô hình hóa	54
2.1.1. Mô hình hóa các thành phần trong hệ thống MR-WPT sử dụng MM.....	54
2.1.2. Tính toán hiệu suất của hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM, các đặc trưng điện từ của vật liệu MM.....	55
2.2. Phương pháp mô phỏng	56
2.3. Phương pháp thực nghiệm	59
2.3.1. Chế tạo vật liệu MM và hệ thống MR-WPT ở dải tần số MHz.....	59
2.3.2. Đo đạc đặc trưng của hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM ở dải tần số MHz	63
2.4. Kết luận chương 2	67
CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU KHẢO SÁT CÁC THAM SỐ CỦA HỆ THỐNG MR-WPT CƠ BẢN VÀ THIẾT KẾ CHẾ TẠO VẬT LIỆU MM NHẪM TĂNG CƯỜNG HIỆU SUẤT CỦA HỆ THỐNG.....	69

3.1. Nghiên cứu khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất hệ thống MR-WPT cơ bản	70
3.1.1. Thiết kế hệ thống MR-WPT	70
3.1.2. Khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất hệ thống MR-WPT.....	71
3.1.2.1. Phân tích lý thuyết.....	71
3.1.2.2. Mô phỏng.....	74
3.1.3. Chế tạo và thực nghiệm đo đạc hệ thống MR-WPT tại hai dải tần số khác nhau.....	79
3.2. Hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp	84
3.2.1. Thiết kế hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp	84
3.2.2. Mô phỏng và phân tích hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp	86
3.2.3. Chế tạo và thực nghiệm đo đạc hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp	92
3.3. Kết luận chương 3	97
CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VẬT LIỆU MM LINH HOẠT CÓ TỪ TRƯỜNG ĐỊNH XÚ ỨNG DỤNG TRONG TĂNG CƯỜNG HIỆU SUẤT HỆ THỐNG MR-WPT	99
4.1. Hốc cộng hưởng và cơ chế hình thành hốc cộng hưởng	100
4.2. Tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong ứng dụng trong tăng cường hiệu suất hệ thống MR-WPT	102
4.2.1. Thiết kế tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong ứng dụng trong hệ thống MR-WPT	102
4.2.2. Mô phỏng hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong.....	104
4.2.3. Chế tạo và thực nghiệm đo đạc hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong	107
4.3. Kết luận chương 4	111

CHƯƠNG 5. NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VẬT LIỆU MM 2-D KHÔNG ĐỒNG NHẤT CÓ TỪ TRƯỜNG ĐỊNH XỬ ỨNG DỤNG TRONG TĂNG CƯỜNG HIỆU SUẤT LAN TRUYỀN NĂNG LƯỢNG TỪ TRƯỜNG TRONG CẤU TRÚC VẬT LIỆU	112
5.1. Lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu MM 1-D.....	112
5.1.1. Thiết kế ô cơ sở vật liệu MM	112
5.1.2. Đặc tính của ô cơ sở vật liệu MM.....	113
5.1.3. Lan truyền năng lượng từ trường trong chuỗi ô cơ sở MM 1-D.....	114
5.2. Lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu MM 2-D không đồng nhất	116
5.3. Kết luận chương 5	121
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	123
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN.....	126
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO	127

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
1-D	One Dimensional	Một chiều
2-D	Two Dimensional	Hai chiều
3-D	Three Dimensional	Ba chiều
CST	Computer Simulation Technology	Tên Phần mềm mô phỏng điện từ CST
DBS	Deep Brain Stimulation	Kích thích não sâu
FIT	Finite Integration Technique	Kỹ thuật tích phân hữu hạn
FR	Fire Retardant	Vật liệu chống cháy
IC-WPT	Inductive Coupling - Wireless Power Transfer	Truyền năng lượng không dây cảm ứng từ
KH&CN		Khoa học và Công nghệ
MIDs	Medical Implanted Devices	Thiết bị y tế cấy ghép
NIM	Negative-index Metamaterials	Vật liệu biến hóa có chiết suất âm
MM	Magnetic Metamaterials	Vật liệu biến hoá có độ từ thẩm âm
MPAs	Metamaterials Perfect Absorbers	Vật liệu hấp thụ mạnh sóng điện từ
MR-WPT	Magnetic Resonance Wireless Power Transfer	Truyền năng lượng không dây cộng hưởng từ
Tx	Transmitter	Cuộn cộng hưởng phát
Rx	Receiver	Cuộn cộng hưởng thu
WPT	Wireless Power Transfer	Truyền năng lượng không dây

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VIẾT TẮT

Chữ viết tắt	Tiếng Việt
A	Hằng số mạng
A_e	Diện tích hiệu dụng
α	Hệ số suy hao
B	Cảm ứng từ
β	Hằng số lan truyền
c_0	Vận tốc ánh sáng trong chân không
C	Điện dung
d	Khoảng cách
D	Độ dày
D_{MM}	Tổng kích thước ô cơ sở
ε	Độ điện thẩm
ξ	Suất điện động
E	Điện trường
Γ	Hệ số suy hao nội tại
Γ_{guided}	Tốc độ phân rã trong đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường,
Γ_0	Tốc độ phân rã trong chân không
f	Tần số
F	Hệ số lấp đầy
H	Từ trường

I	Cường độ dòng điện
k	Hệ số ghép cặp
L	Độ tự cảm
M	Hệ số hỗ cảm
μ	Độ từ thẩm
n	Chiết suất
N_v	Số vòng dây
n_g	Chỉ số nhóm
η	Hiệu suất
ω	Tần số góc
P	Công suất
ϕ	Từ thông
Q	Hệ số phẩm chất
R	Độ phản xạ
S	Khoảng cách giữa các dải
S_{11}	Hệ số phản xạ
S_{21}	Hệ số truyền qua
T	Độ truyền qua
U	Điện áp
V_0	Thể tích
V	Điện thế

W	Chiều rộng
Δx	Độ lệch trục
λ	Bước sóng
γ	Vectơ lan truyền năng lượng từ trường
Z	Trở kháng

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 3.1. So sánh hiệu suất của một số hệ thống MR-WPT trong môi trường dẫn điện.....	83
Bảng 3.2. Hệ số truyền qua S_{21} và hiệu suất η của hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có thể cuộn khi $d_{Tx-Rx} = 250$ mm và $d_{Tx-MM} = d_{MM-Rx} = 125$ mm.....	88
Bảng 3.3. Hệ số truyền qua và hiệu suất của hệ thống MR-WPT có cuộn cộng hưởng thu Rx lệch trục $\Delta x = 100$ mm, lệch góc $\alpha = 15^\circ, 30^\circ$ và 45° sử dụng tấm vật liệu MM có thể gấp theo góc lệch của Rx	92

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

<i>Hình 1.1.</i> Tháp Tesla [26].....	8
<i>Hình 1.2.</i> Vùng trường gần, vùng chuyển tiếp và vùng trường xa trong lan truyền sóng điện từ [31].....	10
<i>Hình 1.3.</i> Các phương pháp truyền năng lượng không dây chính đã và đang được nghiên cứu, phát triển [33].	11
<i>Hình 1.4.</i> Sơ đồ khối của hệ thống WPT trường gần [35].	12
<i>Hình 1.5.</i> Hệ thống WPT trường gần thông qua điện trường [33].	13
<i>Hình 1.6.</i> Hệ thống WPT trường gần thông qua từ trường [33].....	13
<i>Hình 1.7.</i> IC-WPT: (a) hệ thống IC-WPT [36], (b) sơ đồ hệ thống IC-WPT [37], (c) mô hình mạch điện tương đương [37], (d) các ứng dụng [38].....	15
<i>Hình 1.8.</i> Hệ thống MR-WPT: (a) MR-WPT qua khoảng cách 2,5 m [40], (b) sơ đồ của hệ thống [41], (c) mô hình mạch tương đương của hệ thống [42] và (d) hiệu suất của hệ thống [43].	17
<i>Hình 1.9.</i> Sơ đồ khối của hệ thống IC-WPT [44].	19
<i>Hình 1.10.</i> Nguyên lý của IC-WPT [33], [46].....	20
<i>Hình 1.11.</i> Sơ đồ khối của hệ thống MR-WPT [47].....	21
<i>Hình 1.12.</i> Khái niệm nhà bếp không dây: trang bị WPT cho các thiết bị nhà bếp không dây khác nhau [46].....	22
<i>Hình 1.13.</i> Một số thiết bị không dây của Haier: (a) đèn bàn thông minh WZDT502L-B, (b) robot hút bụi không dây 690RS, (c) nồi cơm điện không dây WFD-30A, (d) máy xay không dây WJD-380A [46].	23
<i>Hình 1.14.</i> Một hệ thống cung cấp năng lượng không dây bao gồm Tx, vải thêu hoa văn cảm ứng làm bằng dây dẫn điện và Rx (cảm biến) [48].	24
<i>Hình 1.15.</i> Cấu trúc của hệ thống WPT được đề xuất: Sơ đồ (ở trên) thể hiện cấu trúc bộ thu kép và bố cục 3D (ở dưới) hiển thị cách sắp xếp các cuộn dây [49]. ..	25
<i>Hình 1.16.</i> Cấu trúc các cuộn dây trong bộ thu kép (10 vòng): cuộn dây ở lòng bàn tay L_1 (bên phải), cuộn dây ở mu bàn tay L_2 (bên trái). Kích thước (mm): $L = 60$, $L_{in} = 40$, $W = 10$, $H = 46$, $H_{in} = 26$, $D = 40$, $D_{in} = 20$ [49].	26
<i>Hình 1.17.</i> Các thiết lập thử nghiệm: (a) Tx/Rx đối xứng trong môi trường không khí, (b) Tx/Rx đối xứng qua mu bàn tay, (c) Tx/Rx đối xứng thông qua chất lỏng	

mô phỏng cơ thể, (d) độ lệch chuẩn hóa của cuộn dây đối xứng, (e) hệ thống WPT với bộ thu kép đặt trong môi trường không khí, (f) hệ thống WPT với bộ thu kép đặt trên tay [49].	27
<i>Hình 1.18.</i> Hiệu suất của hệ thống WPT với bộ thu kép trong lần lượt khi đặt trong không gian và đeo trên tay [49].	28
<i>Hình 1.19.</i> Khái niệm về thiết bị kích thích não sâu, trong đó năng lượng và dữ liệu được truyền không dây [52].	29
<i>Hình 1.20.</i> Thiết lập và triển khai thực nghiệm cuộn dây cấy ghép với (a) đế FR-4 và (b) đế mạch in linh hoạt. Thiết lập đo đặc hệ thống WPT dưới mô (thịt lợn) [52].	29
<i>Hình 1.21.</i> Hiệu suất truyền năng lượng không dây theo khoảng cách khi sử dụng đế FR-4 và đế mạch in linh hoạt lần lượt qua không khí và qua mô [52].	30
<i>Hình 1.22.</i> Phân loại vật liệu dựa trên độ điện thẩm (ϵ) và độ từ thẩm (μ) [3].	31
<i>Hình 1.23.</i> Sơ đồ cấu trúc của SRR và các SRRs trong dãy tuần hoàn [11].	33
<i>Hình 1.24.</i> Nguyên lý hoạt động của SRR để tạo ra độ từ thẩm âm [11].	34
<i>Hình 1.25.</i> Dạng tổng quát của độ từ thẩm hiệu dụng cho mô hình SRR với giả sử vật liệu không có tổn hao [11].	35
<i>Hình 1.26.</i> (a) Ô cơ sở của MM, (b) mô hình mạch điện tương đương của ô cơ sở, (c) hệ số phản xạ và truyền qua, (d) độ từ thẩm [57].	36
<i>Hình 1.27.</i> Sự khuếch đại từ trường tắt dần của vật liệu MM [70].	41
<i>Hình 1.28.</i> Sơ đồ nguyên lý cải thiện hiệu suất của hệ thống MR-WPT dựa trên vật liệu MM: (a) không sử dụng tấm vật liệu MM, (b) sử dụng tấm vật liệu MM [67].	42
<i>Hình 1.29.</i> Thí nghiệm WPT với bóng đèn công suất 40 W: (a) hệ thống ban đầu, (b) hệ thống với vật liệu biến hóa 3-D, (c) hệ thống với vật liệu biến hóa dị hướng và (d) so sánh hiệu suất truyền tải đối với ba cấu hình [13].	43
<i>Hình 1.30.</i> (a) Hệ thống MR-WPT không đối xứng, (b) tấm vật liệu MM gồm 5×5 ô cơ sở, (c) hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT không đối xứng với các cấu hình khác nhau, (d) hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM đồng nhất và tấm vật liệu MM không đồng nhất theo khoảng cách từ tấm vật liệu MM đến cuộn cộng hưởng thu Rx [72].	45

<i>Hình 1.31.</i> Phân bố trường H trong hệ thống WPT khi cuộn Tx và cuộn Rx bị lệch: (a) hệ thống WPT ban đầu với sự lệch bên, (b) hệ thống WPT khi có tấm MM với sự lệch bên, (c) hệ thống WPT ban đầu với sự lệch góc, (d) hệ thống WPT khi có tấm MM với sự lệch góc [74].	46
<i>Hình 1.32.</i> Phân bố từ trường trong hệ thống WPT: (a) với tấm MM đồng nhất cộng hưởng ở $\omega_0 = 6,5$ MHz, (b) với tấm MM không đồng nhất cộng hưởng ở $1,1\omega_0$ ngoại trừ ô trung tâm, (c) với tấm MM không đồng nhất cộng hưởng ở $0,9\omega_0$ ngoại trừ ô trung tâm, (d) thông qua không khí [23].	47
<i>Hình 1.33.</i> (a) Sơ đồ và ảnh của bề mặt vật liệu biến hóa với ô cơ sở điều khiển được, (b) sự truyền trong hai trường hợp: bề mặt vật liệu biến hóa đồng nhất và không đồng nhất, (c) hai bộ thu đèn led trên bề mặt vật liệu biến hóa, (d) bộ thu được lựa chọn duy nhất [78].	48
<i>Hình 1.34.</i> Sơ đồ và ảnh của dãy các phần tử ghép nối cộng hưởng từ [79].	49
<i>Hình 1.35.</i> Mạch tương đương của chuỗi các vòng dây gắn tụ điện.	50
<i>Hình 2.1.</i> Phương pháp nghiên cứu vật liệu MM ứng dụng trong WPT ở dải tần số MHz.	53
<i>Hình 2.2.</i> Cấu trúc ô cơ sở vật liệu MM, mô hình mạch điện LC tương đương.	55
<i>Hình 2.3.</i> Sơ đồ khối quá trình chuẩn bị các tham số đầu vào cho mô phỏng.	56
<i>Hình 2.4.</i> Giao diện chương trình mô phỏng CST Studio Suite.	58
<i>Hình 2.5.</i> Kết quả mô phỏng bằng phần mềm CST: (a) các tham số phản xạ, (b) phân bố từ trường [87].	59
<i>Hình 2.6.</i> Hệ thiết bị quang khắc dùng trong chế tạo vật liệu biến hoá ở dải tần số MHz, GHz tại Viện Khoa học vật liệu.	60
<i>Hình 2.7.</i> Hệ thiết bị dùng để hàn linh kiện điện tử vào bản mạch in.	61
<i>Hình 2.8.</i> Quy trình công nghệ chế tạo cuộn cộng hưởng phát/thu và vật liệu MM cho hệ thống MR-WPT.	62
<i>Hình 2.9.</i> Máy phân tích mạng vectơ tại Viện Khoa học vật liệu.	64
<i>Hình 2.10.</i> Minh họa các thông số S của máy phân tích mạng vectơ hai cổng.	64
<i>Hình 2.11.</i> Chuẩn hóa hệ đo theo phương pháp SOLT: chế độ truyền qua hoàn toàn (Through), chế độ hở mạch (Open), chế độ ngắn mạch (Short), chế độ tải chuẩn (Load - Match).	65

- Hình 2.12.* (a) Sơ đồ thiết lập thí nghiệm đo đặc hệ số truyền qua của hệ thống MR-WPT khi sử dụng tấm vật liệu MM, (b) tấm vật liệu MM được thiết kế gồm 5×5 ô cơ sở [88]..... 67
- Hình 3.1.* Sơ đồ của hệ thống MR-WPT được đề xuất. 71
- Hình 3.2.* Kết quả mô phỏng phân bố cường độ trường xung quanh hệ thống MR-WPT: (a) điện trường xung quanh hệ thống MR-WPT trong môi trường không khí, (b) điện trường xung quanh hệ thống MR-WPT khi có mặt khối dẫn điện, (c) từ trường xung quanh hệ thống MR-WPT trong môi trường không khí, (d) từ trường xung quanh hệ thống MR-WPT khi có mặt khối dẫn điện..... 74
- Hình 3.3.* Kết quả mô phỏng phân bố cường độ điện trường tại mặt phẳng chính giữa của hệ thống MR-WPT: (a) trong môi trường không khí và (b) khi có mặt khối dẫn điện. 76
- Hình 3.4.* (a) Sơ đồ thiết lập mô phỏng cuộn cộng hưởng đặt gần khối dẫn điện; kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của các tham số của cuộn cộng hưởng theo tần số ở các độ dẫn điện khác nhau: (b) độ tự cảm L , (c) điện trở R , (d) hệ số phẩm chất Q 77
- Hình 3.5.* Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của các tham số của cuộn cộng hưởng theo tần số ở các độ dày khác nhau của khối dẫn điện: (a) độ tự cảm, (b) điện trở, (c) hệ số phẩm chất và (d) hệ số phẩm chất tối đa. 78
- Hình 3.6.* Thiết lập thí nghiệm cho hệ thống MR-WPT trong môi trường dẫn điện được đề xuất. 79
- Hình 3.7.* Kết quả đo đặc sự phụ thuộc hiệu suất truyền dẫn theo tần số hoạt động của các hệ thống MR-WPT với các độ dẫn khác nhau: (a) hệ thống MR-WPT hoạt động ở tần số 10 MHz, (b) hệ thống MR-WPT hoạt động ở tần số 20 MHz. 80
- Hình 3.8.* Kết quả đo đặc sự phụ thuộc hiệu suất truyền dẫn của các hệ thống MR-WPT theo độ dẫn điện trong các trường hợp: (a) độ dày khối dẫn điện là 1 cm, (b) độ dày khối dẫn điện là 5 cm. 81
- Hình 3.9.* Kết quả đo đặc sự phụ thuộc hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT 10 MHz và hệ thống MR-WPT 20 MHz theo độ rộng của khối dẫn điện..... 82
- Hình 3.10.* Sơ đồ hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có thể cuộn..... 85
- Hình 3.11.* (a) Thiết kế ô cơ sở vật liệu MM, (b) mạch tương đương của ô cơ sở... 86
- Hình 3.12.* Tần số cộng hưởng mô phỏng và đo đặc của ô cơ sở vật liệu MM..... 87

- Hình 3.13.* Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có thể cuộn được thả dần từng hàng ô cơ sở vật liệu MM: (a) 1 hàng, (b) 2 hàng, (c) 3 hàng, (d) 4 hàng, (e) 5 hàng, (f) 6 hàng. 87
- Hình 3.14.* (a) Sơ đồ hệ thống MR-WPT với cuộn cộng hưởng thu lệch trục và lệch góc khi sử dụng tấm vật liệu MM có thể gấp, (b) sơ đồ hai vòng dây lệch trục Δx và lệch góc α 89
- Hình 3.15.* Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT khi Rx sai lệch trục $\Delta x = 100$ mm và sai lệch góc lần lượt là 15° , 30° , 45° trong các trường hợp: (a), (d), (g) khi hệ thống không có tấm vật liệu MM; (b), (e), (h) khi hệ thống có tấm vật liệu MM thẳng; (c), (f), (i) khi hệ thống có tấm vật liệu MM được gấp lệch một góc tương ứng với góc sai lệch của Rx. 91
- Hình 3.16.* Thiết lập thí nghiệm đo đặc hiệu suất của hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có thể uốn hoặc gấp. 93
- Hình 3.17.* Hiệu suất đo đặc của hệ thống MR-WPT ban đầu và khi sử dụng tấm vật liệu MM có thể cuộn được thả dần từng hàng ô cơ sở vật liệu MM như minh họa trong Hình 3.13 ở khoảng cách truyền dẫn $d_{Tx-Rx} = 250$ mm. 93
- Hình 3.18.* Định hiệu suất đo đặc của hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM với ba khoảng cách d_{Tx-Rx} lần lượt là 200 mm, 250 mm và 300 mm. 94
- Hình 3.19.* Hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT khi cuộn cộng hưởng thu Rx lệch $\Delta x = 100$ mm so với trục của Tx/Rx ban đầu, lệch góc $\alpha = 30^\circ$ so với Tx và khi sử dụng tấm vật liệu MM thẳng, tấm vật liệu MM gấp theo góc sai lệch của Rx như minh họa ở Hình 3.15(d), (e), (f). 95
- Hình 3.20.* Các định hiệu suất truyền dẫn đo được của hệ thống MR-WPT khi sai lệch trục $\Delta x = 100$ mm và sai lệch góc α lần lượt là 0° , 15° , 30° và 45° như minh họa ở Hình 3.15(a-i). 96
- Hình 4.1.* (a) Sơ đồ và ảnh chụp của tấm vật liệu MM chủ động với các ô cơ sở có tần số có thể điều chỉnh được. Khoảng cách giữa cuộn cộng hưởng phát Tx và tấm vật liệu MM là 20 cm, (b) Đặc điểm tán sắc của sự lan truyền năng lượng từ trường và lan truyền sóng điện từ, (c) Hệ số phản xạ đo được của một ô cơ sở vật liệu MM khi điều chỉnh điện thế V_{TUNE} , (d) Hệ số truyền qua đo được đối với tấm vật liệu MM đồng nhất và tấm vật liệu MM với hốc cộng hưởng (khi sử dụng cuộn cộng hưởng phát Tx và cuộn cộng hưởng thu Rx) [78]. 101

<i>Hình 4.2.</i> Sơ đồ của hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong.....	103
<i>Hình 4.3.</i> (a) Thiết kế ô cơ sở vật liệu MM và (b) mô hình mạch điện tương đương của ô cơ sở vật liệu MM.....	104
<i>Hình 4.4.</i> (a) Sơ đồ của tấm vật liệu MM uốn cong, (b) tần số cộng hưởng mô phỏng của ô cơ sở vật liệu MM theo bán kính uốn cong.	105
<i>Hình 4.5.</i> Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT: (a) với tấm MM đồng nhất, (b) với tấm MM không đồng nhất (có một hốc cộng hưởng tại tâm tấm).....	105
<i>Hình 4.6.</i> Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt: (a) tấm vật liệu MM đồng nhất và (b) tấm vật liệu MM không đồng nhất. Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trên tấm vật liệu MM với: (c) tấm vật liệu MM đồng nhất và (d) tấm vật liệu MM không đồng nhất.	107
<i>Hình 4.7.</i> Thiết lập thí nghiệm đo đặc đặc trưng của hệ thống MR-WPT không đối xứng sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong.....	108
<i>Hình 4.8.</i> Hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT trong các trường hợp: khi không có tấm vật liệu MM (hệ thống MR-WPT 4 cuộn), khi có tấm vật liệu MM đồng nhất và khi có tấm MM với hốc cộng hưởng.....	109
<i>Hình 4.9.</i> Hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT là hàm của tần số với các bán kính cong khác nhau khi sử dụng: (a) tấm MM vật liệu đồng nhất và (b) tấm vật liệu MM không đồng nhất.	110
<i>Hình 5.1.</i> (a) Ô cơ sở vật liệu MM, (b) mạch điện tương đương của ô cơ sở vật liệu MM.....	113
<i>Hình 5.2.</i> Tần số cộng hưởng mô phỏng và đo đạc của ô cơ sở vật liệu MM.....	113
<i>Hình 5.3.</i> (a) Sơ đồ của chuỗi ô cơ sở vật liệu MM 1-D, (b) kết quả mô phỏng phân bố từ trường trong chuỗi 9 ô cơ sở vật liệu MM 1-D.	114
<i>Hình 5.4.</i> (a) Kết quả tính toán tỉ lệ dòng điện của phần tử thứ n và phần tử đầu tiên, (b) hệ số truyền qua đo được ở một số phần tử trong chuỗi vật liệu MM 1-D.	115

- Hình 5.5.* Tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất tăng cường hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường. 116
- Hình 5.6.* Cường độ từ trường đo được ở 20,3 MHz trong: (a) tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất và (b) tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất. 117
- Hình 5.7.* (a) So sánh sự lan truyền năng lượng từ trường đo được cho ba cấu hình: chuỗi vật liệu MM 1-D (màu đen), tấm vật liệu MM đồng nhất (màu xanh), tấm vật liệu MM không đồng nhất (màu đỏ) (b) hệ số truyền qua đo được trong chế độ ghép cặp yếu để trích xuất hệ số phẩm chất của ô cơ sở vật liệu MM trong chuỗi MM 1-D và của tấm vật liệu MM không đồng nhất. 119
- Hình 5.8.* Kết quả tính toán, đo đạc: (a) mối quan hệ tán sắc và (b) độ suy hao của đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường trong tấm MM 2-D không đồng nhất. 120

MỞ ĐẦU

Ngày nay, cùng với sự phát triển nhanh chóng của khoa học và công nghệ, các hệ thống truyền năng lượng không dây (Wireless Power Transfer – WPT) có rất nhiều ứng dụng cho các thiết bị điện tử thông minh, cho các thiết bị y tế cấy ghép và cho sạc không dây trên các phương tiện giao thông. Căn cứ vào nguyên lý làm việc và dải tần số hoạt động, WPT thường được chia thành: (i) WPT ở khoảng cách gần (short-range) – khi khoảng cách truyền nhỏ hơn kích thước của bộ thu phát; (ii) WPT ở khoảng cách trung bình (mid-range) – khi khoảng cách truyền lớn hơn kích thước bộ thu phát và (iii) WPT ở khoảng cách xa (long-range) – khi khoảng cách truyền lớn hơn rất nhiều so với kích thước bộ thu phát [1].

Nguyên lý làm việc của WPT ở khoảng cách gần và khoảng cách trung bình đều dựa trên tương tác trường gần thông qua từ trường hoặc thông qua điện trường nên được gọi chung là WPT trường gần. Trong đó, tương tác trường gần thông qua từ trường được chứng minh là an toàn hơn đối với con người so với tương tác trường gần thông qua điện trường [2]. Trong hệ thống WPT ở khoảng cách gần thông qua từ trường, năng lượng truyền trực tiếp từ bộ phát tới bộ thu thông qua hiện tượng cảm ứng điện từ nên được gọi là WPT cảm ứng từ (Inductive Coupling - Wireless Power Transfer – IC-WPT). Trong trường hợp này, khoảng cách truyền nhỏ hơn nhiều so với kích thước của bộ thu phát. Đối với WPT ở khoảng cách trung bình thông qua từ trường, bằng cách sử dụng hai bộ cộng hưởng, năng lượng được truyền dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ giữa hai bộ cộng hưởng ở tần số cao nên được gọi là WPT cộng hưởng từ (Magnetic Resonant - Wireless Power Transfer – MR-WPT). Và do đó MR-WPT cho phép năng lượng truyền đi xa hơn nhiều so với IC-WPT. Cơ chế vật lý của hai loại WPT này có thể được giải thích bởi sự tương tác giữa bộ phát và bộ thu thông qua từ trường có cường độ giảm dần theo khoảng cách hay còn được gọi là hiện tượng sóng tắt dần (evanescent wave) [3]. Trong vùng trường gần, cường độ từ trường suy giảm rất nhanh theo khoảng cách so với nguồn, dẫn đến sự suy giảm nhanh chóng hiệu suất của hệ thống WPT khi khoảng cách giữa bộ phát và bộ thu tăng lên. Ngoài ra, MR-WPT có thể được giải thích bằng chế độ ghép cặp [4], trong đó khi khoảng cách truyền dẫn tăng, sự ghép cặp giữa các bộ cộng hưởng giảm, dẫn đến hiệu suất của hệ thống giảm. Trong những năm gần đây, đối với WPT trường gần, các nghiên cứu tập trung vào WPT ở khoảng cách trung bình hay MR-WPT vì lợi thế có thể mở rộng khoảng cách truyền dẫn [5]. Tuy nhiên khoảng cách và hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT hiện vẫn chưa đáp ứng được các yêu cầu thực tế trong một số lĩnh vực như quân sự, y tế, xe điện. Để thực hiện WPT trường gần,

khoảng cách truyền dẫn phải nằm trong vùng trường gần, khoảng cách tới nguồn nhỏ hơn $\lambda/2\pi$ với λ là bước sóng điện từ, khi đó dải tần số MHz được xác định là dải tần số thích hợp. Thực tế, theo báo cáo kỹ thuật của Viện Tiêu chuẩn Viễn thông châu Âu năm 2020 [6], các hiệp hội liên minh công nghiệp, tập đoàn và viện nghiên cứu đã đưa ra một số dải tần cho phép sử dụng công nghệ WPT, trong đó dải tần MHz là dải tần số hứa hẹn tiềm năng ứng dụng WPT trong nhiều lĩnh vực.

Vật liệu biến hóa là vật liệu nhân tạo có các đặc tính điện từ độc đáo, vượt trội mà các vật liệu thông thường không có [7]. Khái niệm vật liệu biến hóa được đề xuất lần đầu tiên bởi Victor Georgievich Veselago vào năm 1968 dựa trên một phân tích lý thuyết về vật liệu có đồng thời độ điện thẩm (ϵ) và độ từ thẩm (μ) cùng âm [8]. Tuy nhiên, có quan điểm cho rằng vật liệu biến hóa bắt nguồn từ 1898 với nghiên cứu của Jagadish Chandra Bose về vật liệu vi sóng nhân tạo bất đối xứng cấu tạo từ các thành phần điện môi bất đối xứng [9]. Cho đến 30 năm sau kể từ khi mô hình lý thuyết về vật liệu biến hóa được đề xuất bởi Victor Georgievich Veselago, lần lượt vào năm 1996 và năm 1999 John Brian Pendry đã lần đầu tiên chế tạo thành công vật liệu biến hóa trong thực tế với cấu trúc lưới dây kim loại cho độ điện thẩm âm [10] và cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh cho độ từ thẩm âm [11]. Dựa vào giá trị độ điện thẩm và độ từ thẩm, vật liệu nói chung có thể được phân thành bốn nhóm là: (i) vật liệu có độ điện thẩm và độ từ thẩm cùng dương (double positive); (ii) vật liệu có độ điện thẩm âm (epsilon negative); (iii) vật liệu có độ từ thẩm âm (mu negative); (iv) vật liệu có độ điện thẩm và độ từ thẩm cùng âm (double negative) [3]. Trong trường hợp vật liệu có độ từ thẩm âm, chỉ có tương tác của vật liệu với từ trường được quan tâm. Vật liệu này cũng được biết đến với tên gọi vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm (Negative-permeability Materials hoặc Magnetic Metamaterials – MM), có khả năng lan truyền năng lượng từ trường ở kích thước nhỏ hơn bước sóng (sub-wavelength scale) [12]. Sự lan truyền năng lượng từ trường này được tạo thành bởi sự kết hợp giữa các ô cơ sở khi được kích thích bởi từ trường biến thiên [12]. Vật liệu MM được chứng minh là có khả năng khuếch đại từ trường tắt dần giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu, do đó vật liệu MM đã được nghiên cứu ứng dụng trong hệ thống WPT để tăng cường hiệu suất truyền dẫn từ năm 2011 [1], [13]. Hiện nay, vật liệu MM hoạt động ở dải tần số thấp (MHz) đang được xem là giải pháp khả thi để đẩy mạnh các ứng dụng trong thông tin và truyền dẫn năng lượng không dây. Đây được coi là một trong các giải pháp giúp thực hiện thắng lợi mục tiêu phát triển công nghệ năng lượng sạch của quốc gia trong cuộc cách mạng công nghiệp số 4.0 trước mắt. Bên cạnh đó, vùng tần số MHz cũng phù hợp với định hướng ứng dụng của hệ thống WPT trong

nhều lĩnh vực và phù hợp với các nghiên cứu đã và đang được thực nghiệm trong nước, đặc biệt là tại Viện Khoa học vật liệu.

Cùng với xu thế nghiên cứu chung của thế giới, từ năm 2009 hướng nghiên cứu về vật liệu biến hoá đã được GS.TS. Vũ Đình Lâm triển khai nghiên cứu tại Viện Khoa học vật liệu bằng cả tính toán lý thuyết, mô phỏng và thực nghiệm. Nhóm nghiên cứu đã triển khai nhiều nghiên cứu mới về vật liệu biến hoá, tập trung giải quyết các vấn đề chính gồm: tính chất điện từ và cơ chế hoạt động của các loại vật liệu biến hoá; điều khiển linh hoạt vật liệu biến hoá; triển khai ứng dụng vật liệu biến hoá trong một số lĩnh vực. Đối với nghiên cứu tính chất điện từ của vật liệu biến hoá hấp thụ mạnh sóng điện từ (Metamaterials Perfect Absorbers – MPAs) có thể kể đến TS. Đỗ Thành Việt với nghiên cứu làm rõ cơ chế của MPAs trong vùng vi sóng [14], TS. Phạm Thị Trang với nghiên cứu về MPAs có vùng hấp thụ vi sóng mở rộng theo mô hình cộng hưởng bất đối xứng [15]; TS. Đinh Hồng Tiệp với nghiên cứu về MPAs hoạt động với băng tần rộng trong vùng tần số GHz [16]; TS. Dương Thị Hà với nghiên cứu về đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hoá cộng hưởng bậc cao có tính năng đàn hồi ở vùng tần số GHz [17]. Về nghiên cứu làm rõ cơ chế hoạt động của vật liệu biến hoá có chiết suất âm nổi bật với luận án của TS. Nguyễn Thị Hiền [18]. Các nghiên cứu nhằm điều khiển linh hoạt vật liệu biến hoá có thể kể đến gồm: luận án của TS. Đặng Hồng Lưu nhằm điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ bằng kích thích quang, nhiệt [19]; luận án của TS. Trần Văn Huỳnh nhằm điều khiển tính chất hấp thụ sóng điện từ đẳng hướng của vật liệu biến hoá bằng điện trường [20]; luận án của TS. Lê Văn Long nhằm điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hoá bằng tác động cơ học và điện áp [21]. Trong những năm gần đây, nhóm đã phát triển các nghiên cứu nhằm triển khai ứng dụng vật liệu biến hoá trong một số lĩnh vực như cảm biến protein phân tử bò [19], cảm biến khí CO₂ [22], WPT [23]. Song song với sự thành công và phát triển tại Viện Khoa học vật liệu, lĩnh vực nghiên cứu về vật liệu biến hoá đã được nhân rộng tại nhiều nhóm khác trong nước như: nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Trần Mạnh Cường, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội; nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Nguyễn Thị Quỳnh Hoa, Trường Đại học Vinh; nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Lê Minh Thùy, Đại học Bách Khoa Hà Nội; nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Lê Đắc Tuyên, Trường Đại học Mỏ - Địa chất; nhóm nghiên cứu của TS. Lê Văn Quỳnh, Trường Đại học VinUni; nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Nguyễn Thị Hiền, Đại học Thái Nguyên. Nhằm giải quyết các vấn đề về hiện thực hóa các ứng dụng của vật liệu biến hoá trong thực tế, bên cạnh sự phối hợp chặt chẽ với các nhóm nghiên cứu trong nước, nhóm nghiên cứu tại Viện Khoa học vật liệu cũng tiếp tục mở rộng hợp tác với các nhóm nghiên cứu trên thế giới như

Trường Đại học Hanyang, Trường Đại học Kyung Hee (Hàn Quốc); Trường Đại học KU Leuven (Vương quốc Bỉ); Viện nghiên cứu hóa lý RIKEN (Nhật Bản).

Tại thời điểm xây dựng đề cương của luận án Tiến sĩ này, năm 2021, hướng nghiên cứu về vật liệu biến hoá nói chung và vật liệu MM nói riêng ứng dụng trong truyền dẫn năng lượng không dây ở dải tần số MHz đang là hướng nghiên cứu được rất nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới quan tâm [1]. Tại thời điểm đó, trong nước, hướng nghiên cứu về WPT cũng bắt đầu thu hút được sự quan tâm của nhóm nghiên cứu về vật liệu biến hoá tại Viện khoa học vật liệu và sự quan tâm của nhóm nghiên cứu của PGS.TS. Lê Minh Thủy, Đại học Bách Khoa Hà Nội [24], [25]. Các nghiên cứu đã thực hiện cho thấy mặc dù sử dụng vật liệu MM cho truyền dẫn năng lượng không dây đã giúp cải thiện đáng kể hiệu suất và khoảng cách truyền dẫn của hệ thống, tuy nhiên hệ thống vẫn tồn tại một số nhược điểm lớn khiến hạn chế khả năng ứng dụng của chúng, đó là:

i) Hiệu suất và khoảng cách truyền dẫn của hệ thống MR-WPT vẫn còn thấp so với yêu cầu thực tế, đặc biệt là yêu cầu về tăng hiệu suất khi khoảng cách truyền dẫn tăng. Trong khi đó, các nghiên cứu về những tham số ảnh hưởng đến hiệu suất truyền dẫn của hệ thống còn chưa đầy đủ. Trong hệ thống MR-WPT, tham số quan trọng có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất hệ thống là hệ số phẩm chất Q của các cuộn dây. Tham số này phụ thuộc vào điện trở, độ tự cảm của các cuộn và chúng lại phụ thuộc vào độ dẫn điện và kích thước của môi trường truyền dẫn, tần số hoạt động của hệ thống.

ii) Hầu hết các cấu trúc vật liệu MM ứng dụng trong hệ thống MR-WPT có cấu hình phẳng nên hạn chế trong các ứng dụng yêu cầu bề mặt linh hoạt có thể uốn cong, cuộn hoặc gấp. Đồng thời hầu hết vật liệu MM có cấu trúc đồng nhất nên hạn chế trong các ứng dụng yêu cầu cần định xứ từ trường.

iii) Cấu trúc vật liệu MM cũng đã được nghiên cứu và ứng dụng trong lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu, tuy nhiên vật liệu MM một chiều (One Dimensional – 1-D) hạn chế về khả năng ứng dụng, vật liệu MM hai chiều (Two Dimensional – 2-D) đồng nhất tuy có khả năng ứng dụng cao hơn nhưng hiện còn hạn chế về hiệu suất do chưa có khả năng định xứ từ trường.

Do đó, chúng tôi nhận thấy cần thực hiện các nghiên cứu về bản chất vật lý của vật liệu MM, đặc biệt vật liệu MM có khả năng định xứ từ trường. Trên cơ sở đó các vấn đề còn tồn tại đối với ứng dụng vật liệu MM trong truyền dẫn năng lượng không dây có khả năng được giải quyết, cụ thể như các hệ thống MR-WPT yêu cầu hiệu suất cao, thay đổi cấu hình linh hoạt hoặc yêu cầu định xứ từ trường hoặc các thiết bị dựa trên sự lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu.

Từ những lí do trên, chúng tôi đã lựa chọn đề tài nghiên cứu của luận án là: **“Nghiên cứu chế tạo vật liệu biến hoá có từ trường định xứ ứng dụng trong truyền dẫn năng lượng không dây ở dải tần số MHz”**.

Mục tiêu nghiên cứu của luận án

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

Chế tạo được vật liệu biến hoá có từ trường định xứ ứng dụng trong truyền dẫn năng lượng không dây ở dải tần số MHz nhằm tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT và tăng cường lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu.

Nội dung nghiên cứu của luận án

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

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

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

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

Đối tượng nghiên cứu của luận án

Vật liệu MM hoạt động ở dải tần số MHz tích hợp trong hệ thống WPT.

Phương pháp nghiên cứu của luận án

Luận án sử dụng phương pháp tính toán lý thuyết và mô hình hoá, phương pháp mô phỏng vật lý kết hợp với thực nghiệm.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Luận án đã nghiên cứu một cách hệ thống về vật liệu MM và WPT, đặc biệt tập trung vào hệ thống WPT trường gần dựa trên từ trường do đặc tính an toàn hơn của nó so với điện trường. Trên cơ sở đó, tiếp tục nghiên cứu làm rõ bản chất điện từ của vật liệu MM ứng dụng trong hệ thống WPT trường gần dựa trên từ trường ở khoảng cách trung bình hay hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số MHz nhằm tăng hiệu suất của hệ thống. Từ đó xác định được cơ sở để thiết kế, tối ưu các tham

số cấu trúc của vật liệu MM nhằm đạt được tính chất điện từ mong muốn ở vùng tần số MHz để ứng dụng cho các hệ thống WPT. Đồng thời, để tăng khả năng ứng dụng của vật liệu MM trong các hệ thống WPT, luận án đã khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số MHz trong môi trường dẫn điện. Bên cạnh đó, do nhu cầu ngày càng tăng đối với các hệ thống MR-WPT cho các thiết bị điện tử linh hoạt có thể cuộn, gấp hoặc uốn cong, luận án cũng đã thiết kế chế tạo được cấu trúc vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp, cấu trúc vật liệu MM có từ trường định xứ với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong giúp tăng cường đáng kể hiệu suất của hệ thống. Cũng do nhu cầu ngày càng tăng đối với các thiết bị ứng dụng quá trình lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu, vật liệu MM 2-D không đồng nhất có từ trường định xứ đã được thiết kế chế tạo và chứng minh được hiệu quả tăng cường sự lan truyền năng lượng trong cấu trúc đó. Luận án đã tiếp nối các nghiên cứu trước về hệ thống WPT, về vật liệu biến hóa ứng dụng trong hệ thống MR-WPT và trong lan truyền năng lượng từ trường, từ đó đã góp phần xây dựng một hệ thống tri thức, kỹ thuật và công nghệ về vật liệu biến hóa nói chung và vật liệu MM nói riêng ứng dụng trong WPT. Luận án có thể là một tài liệu tham khảo có giá trị cho các nhà khoa học, nghiên cứu sinh và học viên cao học khi nghiên cứu về vật liệu biến hóa hoạt động ở vùng tần số MHz nói chung và vật liệu MM nói riêng cũng như nghiên cứu về WPT. Luận án mở ra nhiều triển vọng ứng dụng của vật liệu MM trong tương lai, đặc biệt trong các lĩnh vực: WPT, thông tin liên lạc, y sinh, ...

Những đóng góp mới của luận án

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

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

ii) Đã khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số MHz (nhỏ hơn 30 MHz) trong môi trường dẫn điện (độ dẫn điện của môi trường thay đổi từ 0 đến 8 S/m), bao gồm: độ dẫn điện, kích thước của môi trường dẫn điện và tần số hoạt động của hệ thống.

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

MM này đã giúp cải thiện hiệu suất của hệ thống cả khi hệ thống không có sai lệch và khi hệ thống có sai lệch trục 100 mm cũng như các sai lệch góc.

iv) Đã thiết kế, chế tạo được tấm vật liệu MM linh hoạt có từ trường định xứ do thiết kế hốc cộng hưởng và có thể uốn cong hoạt động ở dải tần số MHz ứng dụng trong hệ thống MR-WPT giúp tăng cường hiệu suất truyền dẫn và tăng độ linh động của hệ thống. Khi sử dụng tấm vật liệu này, tồn tại bán kính uốn cong 150 mm mà ở đó hiệu suất của hệ thống đạt cực đại kể cả khi sử dụng tấm vật liệu MM đồng nhất và tấm vật liệu MM với hốc cộng hưởng.

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

Bên cạnh phần Mở đầu, Kết luận và Tài liệu tham khảo, Luận án được chia thành năm chương như sau:

Chương 1 giới thiệu tổng quan về sự hình thành, phát triển, các hướng nghiên cứu chính về vật liệu MM, WPT, các thành tựu đạt được và những vấn đề còn tồn tại khi sử dụng vật liệu MM trong WPT.

Chương 2 trình bày các phương pháp nghiên cứu chính sử dụng trong luận án, bao gồm: phương pháp tính toán bán lý thuyết và mô hình hóa sử dụng mạch LC tương đương, phương pháp mô phỏng vật lý và phương pháp thực nghiệm.

Chương 3 trình bày các kết quả khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số MHz trong môi trường dẫn điện và kết quả thiết kế, chế tạo tấm vật liệu MM có thể cuộn hoặc gấp có khả năng tích hợp trong hệ thống MR-WPT nhằm tăng cường hiệu suất, khoảng cách truyền dẫn và khả năng ứng dụng của hệ thống khi có sai lệch.

Chương 4 trình bày các kết quả nghiên cứu về vật liệu MM linh hoạt có từ trường định xứ nhờ sử dụng hốc cộng hưởng và có thể uốn cong có khả năng tích hợp trong hệ thống MR-WPT nhằm tăng cường hiệu suất, khoảng cách truyền dẫn và khả năng ứng dụng của hệ thống.

Chương 5 trình bày các kết quả nghiên cứu về vật liệu MM 2-D không đồng nhất có từ trường định xứ nhờ sử dụng chuỗi các hốc cộng hưởng ở tâm tấm có khả năng tích hợp trong WPT nhằm tăng cường hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu.

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

Để làm rõ lí do và mục đích nghiên cứu của luận án, trong chương này, luận án trình bày tổng quan về WPT, vật liệu MM ứng dụng trong WPT. Trong đó, tập trung làm rõ cơ chế của vật liệu MM giúp tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT và trình bày các hướng nghiên cứu hiện nay về vật liệu MM hoạt động ở dải tần số MHz ứng dụng trong MR-WPT.

1.1. Lịch sử hình thành và phát triển của WPT

Ngày nay, cùng với sự phát triển nhanh chóng của khoa học và công nghệ, hệ thống WPT có thể tìm thấy trong nhiều ứng dụng cho các thiết bị điện tử dân dụng, thiết bị điện tử đeo, thiết bị y tế cấy ghép, xe điện, Trong thuật ngữ kỹ thuật, WPT được sử dụng để biểu thị cho quá trình truyền năng lượng từ nguồn điện đến tải tiêu thụ mà không cần dây dẫn.



Hình 1.1. Tháp Tesla [26].

Trở lại hơn một thế kỷ trước, vào năm 1899, Nikola Tesla (1856 – 1943) đã lần đầu tiên trình diễn quá trình WPT, ở đó các bóng đèn được thắp sáng không dây

bằng điện trường ở vùng tần số cao, 150 kHz [27]. Tesla đã đề xuất hệ thống WPT của mình được gọi là tháp Tesla (Hình 1.1). Ý định của ông là truyền tải điện mà không cần dây dẫn, nhưng do cạn kiệt nguồn vốn, dự án của ông đã dừng lại khi còn dang dở. Trong các công trình của ông, WPT có thể là không bức xạ hoặc bức xạ, tùy thuộc vào cơ chế truyền năng lượng [26].

Ban đầu, WPT bức xạ vùng vi sóng (WPT vi sóng) được quan tâm và được chia thành hai giai đoạn: giai đoạn đầu vào khoảng năm 1958 đến năm 1977 và giai đoạn hai từ năm 1977 đến năm 1980 [27]. Từ năm 1958, sự phát triển của WPT vi sóng được thực hiện bởi Raytheon và cộng sự, với các nhà tài trợ gồm: Tập đoàn công nghệ Raytheon, Trung tâm phát triển không quân Rome của Không quân Hoa Kỳ; một số trung tâm nghiên cứu, phòng thí nghiệm của Cơ quan Hàng không và Vũ trụ Hoa Kỳ (NASA). Tiếp theo, vào những năm 1960, Brown đã khởi động lại các thí nghiệm WPT với công nghệ vi sóng hiệu suất cao dựa trên sự phát triển công nghệ liên lạc không dây và viễn thám radar trong Thế chiến II. Mặc dù ông đã thành công trong các thí nghiệm WPT vi sóng ở 2,45 GHz nhưng trong các thí nghiệm đó, ăng-ten phát thu rất lớn, đắt tiền, nguy hiểm khi vận hành và khoảng cách truyền lại ngắn so với WPT trường xa. Vì vậy, các thí nghiệm của ông chủ yếu để chứng minh có thể thu nhận năng lượng bằng vi sóng chứ không có nhiều ý nghĩa thực tế. Từ năm 1977 là giai đoạn thứ hai của quá trình phát triển WPT vi sóng, được tài trợ chính bởi Bộ năng lượng Hoa Kỳ, Cơ quan Hàng không và Vũ trụ Hoa Kỳ, bắt đầu với đánh giá về khái niệm vệ tinh năng lượng mặt trời và kết thúc vào năm 1980.

Sau hơn 30 năm, cho đến năm 2007 người ta mới chú ý nhiều hơn đến các hệ thống WPT, khi nhóm nghiên cứu tại Viện Công nghệ Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology) do GS. Marin Soljagic đứng đầu đã đổi mới hướng nghiên cứu về WPT với hệ thống cộng hưởng từ ghép cặp (Coupled Magnetic Resonance System). Hệ thống WPT của họ có khả năng truyền năng lượng không bức xạ hiệu quả trên khoảng cách lên tới tám lần bán kính của cuộn dây, hiệu suất khoảng 40% ở khoảng cách 2 m [28]. Sau đó, từ năm 2008 trở đi, nhiều tổ chức quan tâm đến năng lượng không dây được thành lập và lần lượt đưa ra các tiêu chuẩn riêng [29].

Một trong những nghiên cứu nổi bật đóng góp vào sự phát triển của công nghệ WPT là năm 2015, nhóm Kỹ thuật hạt nhân và lượng tử tại Viện Khoa học và Công nghệ Tiên tiến Hàn Quốc do giáo sư Chun T. Rim đứng đầu đã phát triển "Hệ thống cộng hưởng cuộn dây lưỡng cực (Dipole Coil Resonant System)" để mở rộng phạm vi truyền dẫn lên đến 5 m giữa cuộn dây máy phát và máy thu. Hệ thống cộng hưởng cuộn dây lưỡng cực này nhỏ hơn đáng kể so với hệ thống cộng hưởng từ ghép cặp do

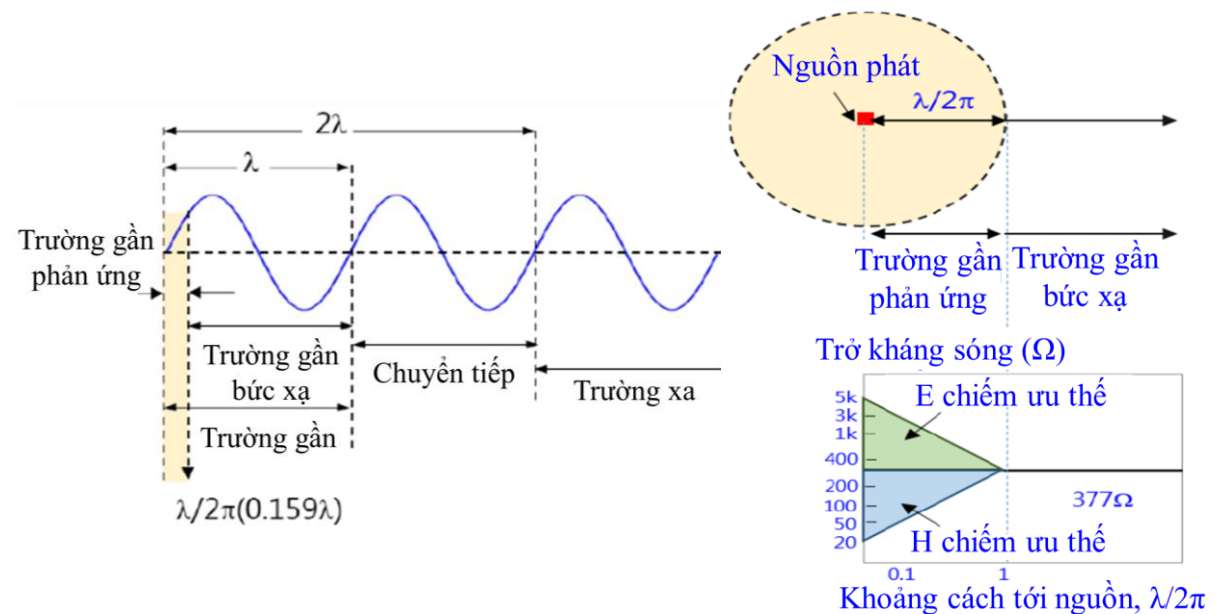
GS. Marin Soljagic đề xuất, hệ thống này có hệ số phẩm chất Q là 100, hoạt động tốt ở tần số thấp 100 kHz. Nhóm này đã tiến hành thử nghiệm và đạt được một số kết quả đầy hứa hẹn: với hệ thống hoạt động ở tần số 20 kHz, công suất đầu ra tối đa và hiệu suất lần lượt là 1403 W và 29% ở khoảng cách 3 m, 471 W và 16% ở khoảng cách 4 m, 209 W và 8% ở khoảng cách 5 m [30].

Từ đó đến nay, đã có rất nhiều công trình nghiên cứu hệ thống WPT đi sâu tìm hiểu cơ chế của hệ thống, các dải tần số và các mức công suất khác nhau nhằm phù hợp với các ứng dụng thực tế, đồng thời tăng cường hiệu suất truyền dẫn, bù đắp sự sai lệch và giảm rò rỉ từ trường – tăng độ an toàn cho con người khi sử dụng. Các kết quả nghiên cứu này bước đầu đã được triển khai trong các sản phẩm thương mại không dây như sạc cho thiết bị điện tử dân dụng, thiết bị điện tử đeo, thiết bị y tế cấy ghép, công nghệ ô tô điện và hứa hẹn sự phát triển ngày càng lớn mạnh của công nghệ WPT.

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

1.2.1. Phân loại WPT

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



Hình 1.2. Vùng trường gần, vùng chuyển tiếp và vùng trường xa trong lan truyền sóng điện từ [31].

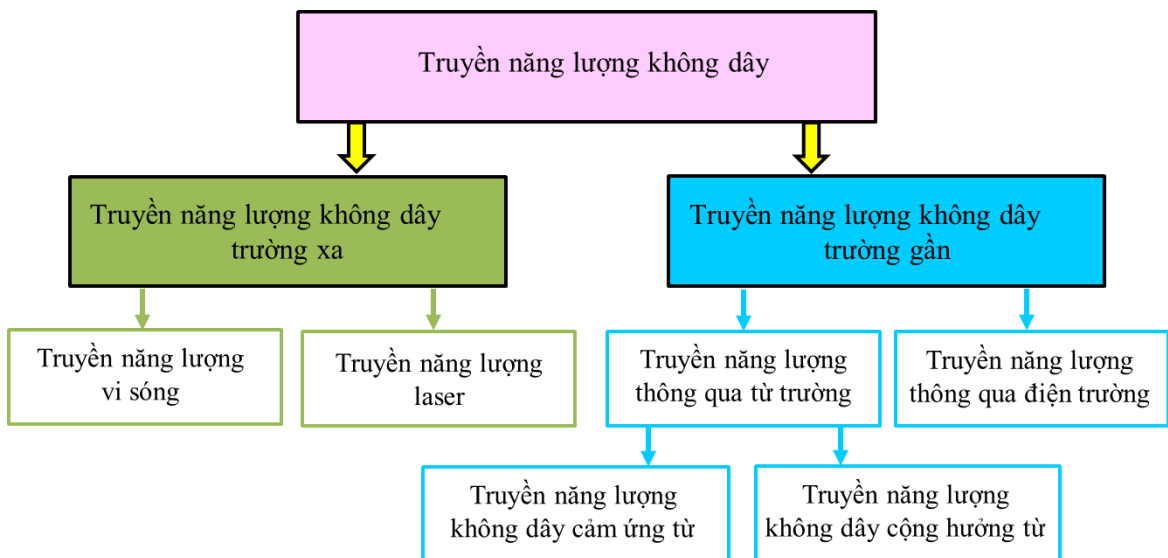
Mọi nguồn điện từ đều tạo ra cả điện trường (trường E) và từ trường (trường H) xung quanh nó và chúng được đặc trưng bởi thành phần bức xạ và thành phần không bức xạ. Căn cứ vào khoảng cách so với nguồn, có thể chia thành ba vùng: vùng

trường gần, vùng chuyển tiếp và vùng trường xa như minh họa ở [Hình 1.2](#) [32]. Các vùng này được xác định theo cách điện từ trường tương tác với môi trường xung quanh, trong đó vùng chuyển tiếp nhỏ, có cả đặc tính của vùng trường gần và vùng trường xa.

Khi khoảng cách đến nguồn nhỏ hơn bước sóng λ được xác định là vùng trường gần. Vùng trường gần bao gồm vùng trường gần phản ứng và vùng trường gần phát xạ. Vùng trường gần phản ứng là vùng ngay cạnh nguồn, trong khoảng $\lambda/2\pi$ so với nguồn, trong vùng này điện trường và từ trường lệch pha nhau 90° nên không xảy ra lan truyền sóng điện từ. Vùng trường gần phát xạ nằm trong khoảng từ $\lambda/2\pi$ đến λ so với nguồn, tiếp theo là vùng chuyển tiếp và tới vùng trường xa khi khoảng cách so với nguồn lớn hơn hai lần bước sóng [32].

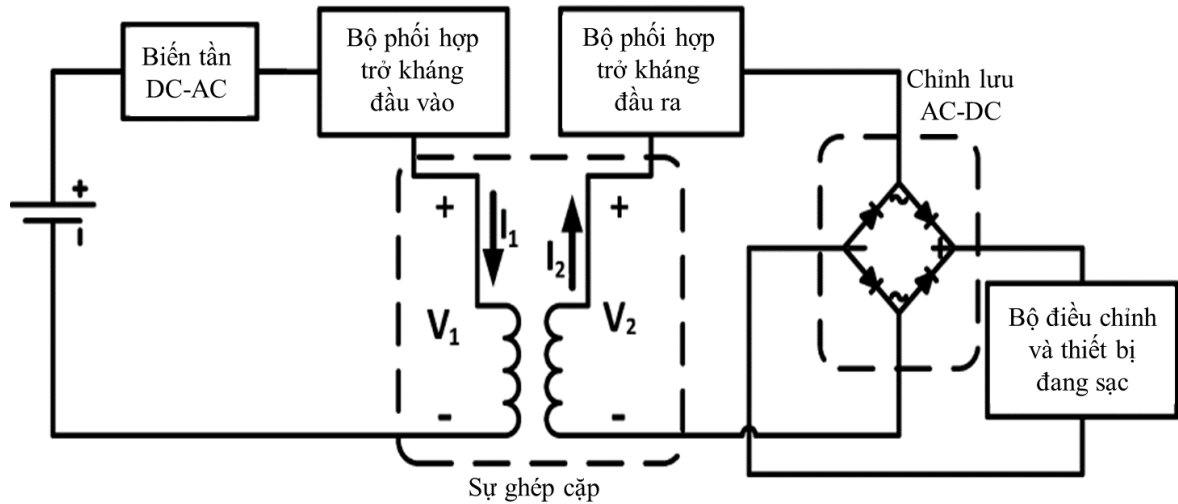
b) WPT trường gần

[Hình 1.3](#) chỉ ra các phương pháp WPT chính đã và đang được nghiên cứu, phát triển [33], [34]. Căn cứ vào vùng truyền dẫn, WPT được chia làm hai nhánh nghiên cứu lớn là WPT trường gần và WPT trường xa. Do WPT trường xa có khả năng xuyên qua yếu, hiệu quả thấp và không chắc chắn đảm bảo về độ an toàn nên hiện nay ngành công nghiệp quan tâm nhiều hơn đến WPT trường gần.



[Hình 1.3](#). Các phương pháp truyền năng lượng không dây chính đã và đang được nghiên cứu, phát triển [33].

Sơ đồ khối của một hệ thống WPT trường gần điển hình bao gồm một số khối như trong [Hình 1.4](#). Trong hầu hết các trường hợp, nó được thể hiện dưới dạng bộ phát công suất sơ cấp và bộ thu công suất thứ cấp được ghép cặp mạnh mẽ, cách nhau từ 1 đến 10 cm [35].



Hình 1.4. Sơ đồ khối của hệ thống WPT trường gần [35].

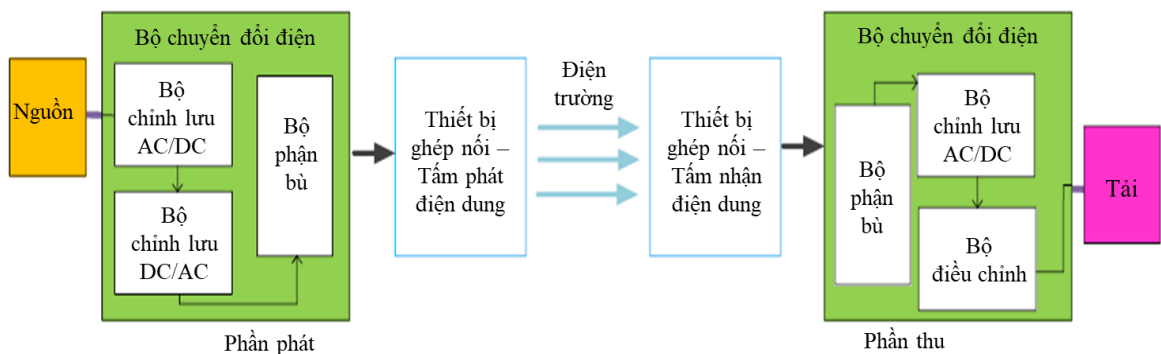
Hình 1.4 cho thấy cấu trúc cơ bản của hệ thống WPT trường gần. Trước tiên, một máy biến tần thực hiện chuyển đổi nguồn điện một chiều thành nguồn điện xoay chiều ở tần số thích hợp, thường cỡ hàng trăm kHz đến vài MHz. Tiếp theo là một mạng biến đổi trở kháng, ở đây trở kháng đầu vào của cuộn phát được biến đổi sao cho trở kháng đầu ra của tải xuất hiện trong quá trình hoạt động sẽ nằm trong dải mà biến tần có thể xử lý, cho hiệu suất rất cao (lớn hơn 90%). Điều này nhằm đảm bảo cung cấp nguồn chính xác khi tải thay đổi, tuy nhiên thực tế đây là một thách thức lớn. Trong hệ thống WPT trường gần, mạng biến đổi trở kháng biểu thị cho mạch điều chỉnh công suất, mạch này cơ bản điều chỉnh các tham số công suất máy phát theo nhu cầu của máy thu. Cuối cùng, một bộ thu có vai trò chỉnh lưu nguồn xoay chiều thành nguồn một chiều và ổn áp được sử dụng để đảm bảo nguồn một chiều ở đầu ra được ổn định [2].

Đối với WPT trường gần, do bản chất là sự ghép cặp trường gần giữa máy phát và máy thu nên chúng không thể tách rời nhau, khoảng cách giữa chúng chỉ trong phạm vi cỡ mm tới hàng m. Hiệu suất WPT trường gần phụ thuộc vào sự ghép cặp giữa máy phát và máy thu, đồng thời phụ thuộc vào cả tải ở máy thu. Khi tải ở máy thu biến đổi, máy phát sẽ ghi nhận sự thay đổi của tải.

Dựa vào sự ghép cặp giữa máy phát và máy thu, WPT trường gần được chia thành hai loại: WPT trường gần thông qua điện trường và WPT trường gần thông qua từ trường.

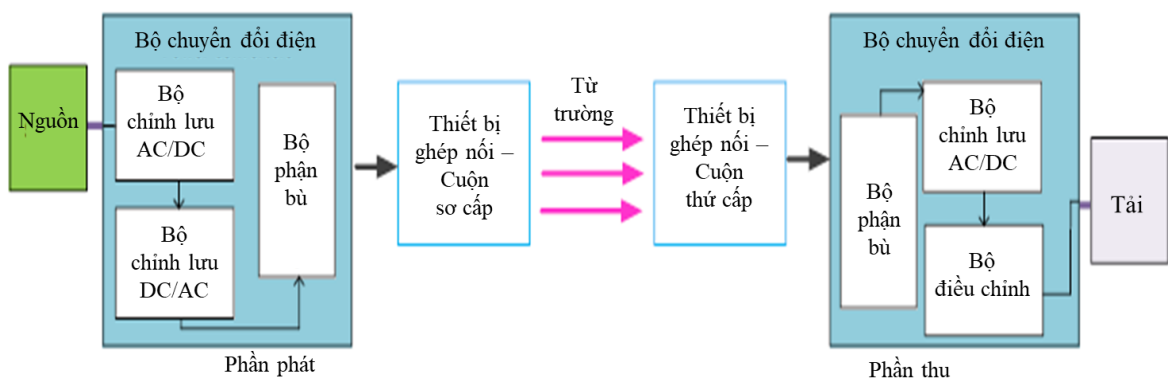
** WPT trường gần thông qua điện trường*

WPT trường gần thông qua điện trường sử dụng sự ghép cặp điện trường giữa máy phát và máy thu, là các điện cực của tụ điện có dạng vỏ kim loại. Hệ thống máy phát được cung cấp nguồn điện xoay chiều, làm xuất hiện điện thế xoay chiều truyền đến tải trên vỏ máy thu. Công nghệ WPT trường gần thông qua điện trường rẻ hơn công nghệ WPT trường gần thông qua từ trường, nhưng hạn chế đáng kể của nó là khoảng cách yêu cầu giữa máy phát và máy thu rất ngắn. WPT trường gần thông qua điện trường được xác định là công nghệ kém an toàn hơn, nhưng đôi khi nó được sử dụng trong các ứng dụng quy mô nhỏ, chẳng hạn như cấy ghép y tế. Ngoài ra, do tính linh hoạt và kích thước nhỏ, công nghệ này đôi khi được sử dụng trong các hệ thống có thể cấu hình lại hoặc cánh tay robot. Một hệ thống WPT trường gần thông qua điện trường cơ bản được thể hiện trong Hình 1.5.



Hình 1.5. Hệ thống WPT trường gần thông qua điện trường [33].

** WPT trường gần thông qua từ trường*



Hình 1.6. Hệ thống WPT trường gần thông qua từ trường [33].

Công nghệ WPT trường gần thông qua từ trường dựa trên ghép cặp từ trường giữa cuộn phát và cuộn thu được coi là hiệu quả và an toàn hơn [2]. WPT trường gần thông qua từ trường đã được nghiên cứu và phát triển từ hệ thống IC-WPT sang hệ

thống MR-WPT. Một mô hình hệ thống WPT trường gần thông qua từ trường điện hình được sử dụng cho cả IC-WPT và MR-WPT được minh họa như trong [Hình 1.6](#).

c) IC-WPT và MR-WPT

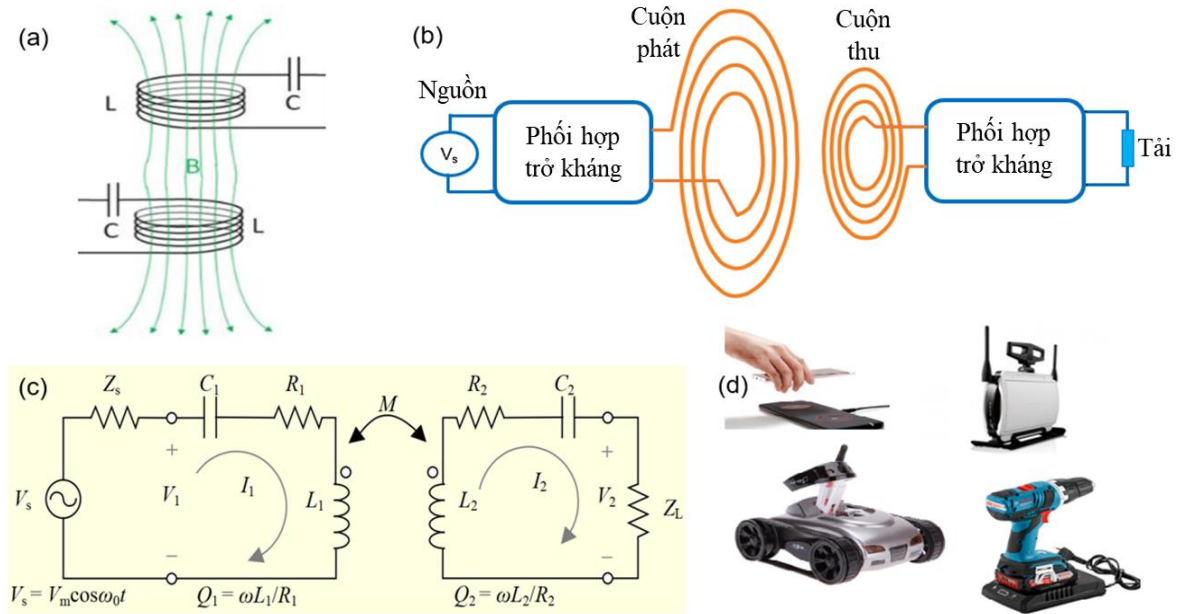
** IC-WPT*

Hệ thống IC-WPT gồm hai cuộn (cuộn phát và cuộn thu) đặt gần nhau. Cơ chế của IC-WPT được chỉ ra trong [Hình 1.7\(a\)](#). Dòng điện xoay chiều ở tần số cao (~kHz) được đưa vào cuộn phát, tạo ra từ trường dao động theo định luật Ampe. Từ trường này truyền qua cuộn thu và tạo ra dòng điện xoay chiều trong cuộn thu. Đó là cách năng lượng truyền từ cuộn phát sang cuộn thu. Sơ đồ của hệ thống IC-WPT được chỉ ra trong [Hình 1.7\(b\)](#). Để quá trình truyền năng lượng hiệu quả hơn, hai bộ phối hợp trở kháng được đưa vào giữa nguồn và cuộn phát, giữa cuộn thu và tải. [Hình 1.7\(c\)](#) đưa ra mô hình mạch tương đương của hệ thống IC-WPT với điện thế đặt vào nguồn là V_S , điện trở nguồn và điện trở tải lần lượt là R_S và R_L . Độ tự cảm và điện dung của các cuộn phát/thu lần lượt là L_T , L_R và C_T , C_R . Vì hệ thống IC-WPT hoạt động ở vùng tần số dưới GHz nên tổn hao do bức xạ của mỗi cuộn có thể bỏ qua. Do đó, tổn hao nội tại của các cuộn phát/thu chủ yếu gây ra bởi tổn hao Ohmic, lần lượt được biểu thị bởi R_T và R_R . Như đã biết, có dòng điện I_i chạy trong các cuộn dây do ghép cặp cảm ứng giữa hai cuộn. Hai cuộn được ghép cặp với nhau thông qua hệ số hỗ cảm M , được xác định bởi $M = k\sqrt{L_T L_R}$, với k là hệ số ghép cặp. Ngày nay, hệ thống IC-WPT rất phổ biến trong các thiết bị điện tử hiện đại như sạc không dây cho điện thoại thông minh, khoan điện và các thiết bị tự vận hành như được chỉ ra trong [Hình 1.7\(d\)](#).

Để xác định hiệu suất IC-WPT, mô hình mạch tương đương của hệ thống IC-WPT đã được phân tích. Đầu tiên, xem xét hoạt động của một bộ cộng hưởng cô lập. Một bộ cộng hưởng có thể được mô tả bằng hai tham số cơ bản: tần số cộng hưởng riêng $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ và hệ số suy hao nội tại Γ . Mối quan hệ giữa hai tham số này giúp xác định hệ số phẩm chất Q của mỗi bộ cộng hưởng, được biểu thị như sau [12]:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Gamma} = \omega_0 \frac{L}{R} \quad (1.1)$$

Biểu thức hệ số phẩm chất Q ở phương trình (1.1) cho thấy rằng khi giảm tổn hao trong mạch (R) dẫn đến hệ số phẩm chất tăng. Hệ số phẩm chất là một tham số để xác định khả năng lưu trữ năng lượng của bộ cộng hưởng và hệ thống WPT cần các thành phần trong hệ thống có hệ số phẩm chất cao để truyền năng lượng hiệu quả hơn.



Hình 1.7. IC-WPT: (a) hệ thống IC-WPT [36], (b) sơ đồ hệ thống IC-WPT [37], (c) mô hình mạch điện tương đương [37], (d) các ứng dụng [38].

Phân tích mạch trong **Hình 1.7(c)** thu được tỉ số giữa năng lượng cung cấp cho điện trở tải và năng lượng cung cấp cho nguồn ở tần số cộng hưởng [37].

$$\frac{P_L}{P_s} = \frac{4k^2 Q_1 Q_2 \frac{R_s}{R_1} \frac{R_L}{R_2}}{\left[\left(1 + \frac{R_s}{R_1} \right) \left(1 + \frac{R_L}{R_2} \right) + k^2 Q_1 Q_2 \right]^2} \quad (1.2)$$

Trong đó: P_s, P_L lần lượt là công suất của cuộn nguồn và cuộn tải; Q_1, Q_2 lần lượt là hệ số phẩm chất của cuộn phát và cuộn thu; R_s, R_L, R_1, R_2 lần lượt là điện trở của cuộn nguồn, cuộn tải, cuộn phát và cuộn thu.

Từ phương trình (1.2), có thể thu được hiệu suất hệ thống tối ưu nếu có:

$$\frac{R_s}{R_1} = \frac{R_L}{R_2} = \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2} \quad (1.3)$$

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

$$\eta_{\text{opt}} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{\left(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2} \right)^2} \quad (1.4)$$

Trong hệ thống đối xứng, cuộn phát và cuộn thu giống hệt nhau nên $Q = Q_1 = Q_2$. Do đó, phương trình (1.4) có thể đơn giản hóa như sau:

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

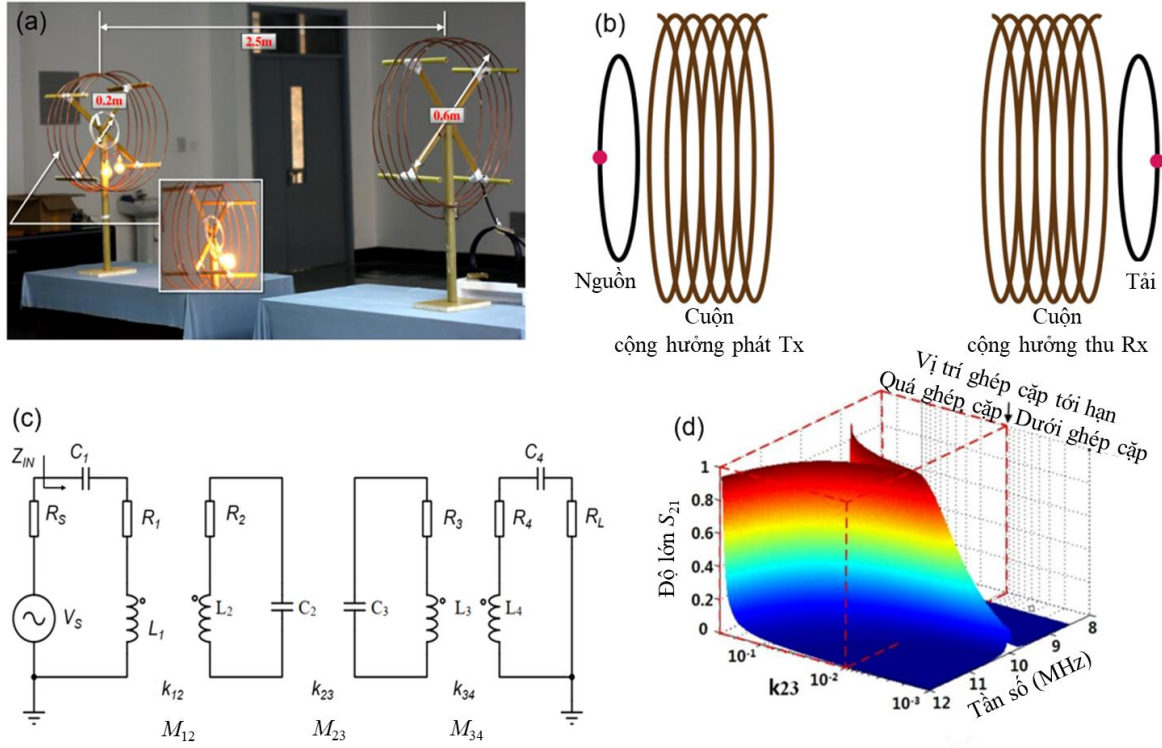
Có thể suy ra từ phương trình (1.5), tích kQ là hệ số quan trọng của hệ thống IC-WPT. Trong đó, Q phụ thuộc vào hình dạng và chất liệu của cuộn dây; k đặc trưng cho sự ghép cặp giữa hai cuộn dây, phụ thuộc vào khoảng cách giữa cuộn phát và cuộn thu của hệ thống WPT hay khoảng cách truyền dẫn hiệu quả.

* MR-WPT

Hệ thống IC-WPT cung cấp nhiều giải pháp cho hệ thống sạc không dây, tuy nhiên do bị giới hạn bởi khoảng cách truyền dẫn ngắn nên đã hạn chế phạm vi ứng dụng của hệ thống này. Do đó, nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để mở rộng khoảng cách truyền dẫn của hệ thống WPT trường gần [39]. Kurs và cộng sự tại Học viện Công nghệ Massachusetts đã đề xuất một cách tiếp cận với hệ thống WPT gồm bốn cuộn dây, sử dụng hai cấu trúc cộng hưởng ở cùng tần số để tăng cường hiệu suất của hệ thống [28]. Hệ thống này được gọi là hệ thống MR-WPT hay hệ thống WPT bốn cuộn.

Hình 1.8(a) cho thấy bố trí thí nghiệm cho phép truyền năng lượng không dây qua không khí với khoảng cách 2,5 m để thắp sáng hai bóng đèn 60 W. Hình 1.8(b) minh họa sơ đồ của hệ thống MR-WPT sử dụng hai bộ cộng hưởng ghép cặp, bao gồm bốn cuộn: cuộn nguồn, cuộn cộng hưởng phát (Tx), cuộn cộng hưởng thu (Rx) và cuộn tải. Trong đó, khoảng cách giữa cuộn nguồn và cuộn cộng hưởng phát Tx, giữa cuộn tải và cuộn cộng hưởng thu Rx là nhỏ để chúng có thể tương tác với nhau thông qua ghép cặp cảm ứng từ. Khoảng cách giữa Tx và Rx xác định khoảng cách truyền dẫn hiệu quả của hệ thống MR-WPT. Tx và Rx thường có cấu trúc cuộn xoắn ốc nhiều vòng, làm bằng đồng để thu được hệ số phẩm chất cao giúp truyền năng lượng hiệu quả. Như đã thảo luận trong phần trước, hiệu suất truyền dẫn của hệ thống WPT phụ thuộc mạnh vào tích kQ . Trong hệ thống MR-WPT, các bộ cộng hưởng thiết kế thường có hệ số phẩm chất Q rất cao nên ngay cả khi sự ghép cặp (hệ số ghép cặp k) giữa các cuộn rất nhỏ thì hiệu suất truyền dẫn vẫn có thể đạt được một giá trị tốt, nghĩa là khoảng cách truyền dẫn có thể được mở rộng. Hệ thống MR-WPT có thể được biểu diễn bằng mạch tương đương như chỉ ra ở Hình 1.8(c). Ở phần phát, vòng dây nguồn được kích thích bởi điện thế V_S với trở kháng đầu ra R_S . Vòng nguồn có

thể được mô hình hóa như một mạch tương đương gồm cuộn cảm (L_1), tụ điện (C_1) và điện trở (R_1). Cuộn cộng hưởng phát Tx cũng được mô hình hóa bằng một mạch tương đương gồm một cuộn cảm xoắn ốc lõi không khí nhiều vòng (L_2), tụ điện (C_2) và điện trở (R_2). Hai cuộn cảm L_1 và L_2 được liên kết với nhau bởi hệ số ghép cặp k_{12} . Phần thu được xác định tương tự và liên kết với phần phát bởi hệ số ghép cặp k_{23} .



Hình 1.8. Hệ thống MR-WPT: (a) MR-WPT qua khoảng cách 2,5 m [40], (b) sơ đồ của hệ thống [41], (c) mô hình mạch tương đương của hệ thống [42] và (d) hiệu suất của hệ thống [43].

Để phân tích mạch trong **Hình 1.8(c)**, định luật điện áp của Kirchhoff và hiện tượng hồ cảm đã được áp dụng để xác định dòng điện trong mỗi mạch cộng hưởng:

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

Trong đó: I_i ($i = 1 - 4$) là dòng điện trong các cuộn dây, hệ số hỗ cảm $M_{ij} = k_{ij}\sqrt{L_i L_j}$ biểu thị sự ghép cặp giữa các cuộn dây, ω là tần số hoạt động của hệ thống MR-WPT.

Đối với bộ cộng hưởng có hệ số phẩm chất rất cao và điều kiện trở kháng nguồn/tải thực tế dẫn đến có $R_1 \ll R_S$ và $R_4 \ll R_L$, do đó $R_1 + R_S \approx R_S$ và $R_4 + R_L \approx R_L$. Giải hệ phương trình (1.6) ta thu được:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3 + k_{34}^2 Q_3 Q_4}{(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)(1 + k_{34}^2 Q_3 Q_4) + k_{23}^2 Q_2 Q_3} \frac{V_S}{R_S} \\ I_4 &= \frac{k_{12} k_{23} k_{34} \sqrt{Q_1 Q_2} \sqrt{Q_2 Q_3} \sqrt{Q_3 Q_4}}{(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)(1 + k_{34}^2 Q_3 Q_4) + k_{23}^2 Q_2 Q_3} \frac{jV_S}{\sqrt{R_S R_L}} \end{aligned} \quad (1.7)$$

Khi hệ thống MR-WPT đối xứng thì cuộn nguồn và cuộn tải giống hệt nhau, cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu cũng giống hệt nhau. Khi đó hệ thống có $Q_1 = Q_4$; $Q_2 = Q_3$ và $k_{12} = k_{34}$ và tỷ lệ điện áp giữa cuộn tải và cuộn nguồn để xác định hiệu suất của hệ thống bằng:

$$\left| \frac{V_L}{V_S} \right| = \left| \frac{I_4 R_L}{I_1 R_S} \right| = \frac{k_{23} k_{12}^2 Q_1 Q_2^2}{(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2) + k_{23}^2 Q_2^2} \sqrt{\frac{R_L}{R_S}} \quad (1.8)$$

Hiệu suất truyền dẫn η được định nghĩa như sau:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_L^2 / R_L}{V_S^2 / 4R_S} = |S_{21}|^2 \quad (1.9)$$

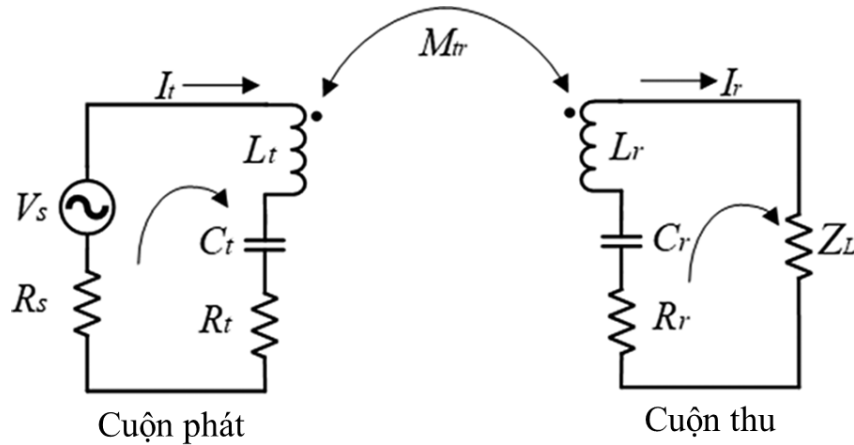
Trong đó, P_{out} và P_{in} là công suất ra và công suất vào, S_{21} là hệ số truyền qua của hệ thống MR-WPT.

Một hệ thống MR-WPT hoạt động ở hai chế độ: chế độ quá ghép cặp (over-coupled) và chế độ dưới ghép cặp (under-coupled), như thể hiện trong **Hình 1.8(d)**. Khi sự ghép cặp giữa Tx và Rx vượt quá giá trị tới hạn, hệ thống MR-WPT hoạt động ở chế độ quá ghép cặp, ngược lại nó hoạt động ở chế độ dưới ghép cặp. Ở chế độ quá ghép cặp, sự phân tách tần số có thể quan sát rõ ràng ở khoảng cách ngắn hơn điểm tới hạn. Khi khoảng cách giữa Tx và Rx tăng lên, sự phân tách tần số giảm xuống cho đến khi hai chế độ hội tụ tại điểm tới hạn.

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

a) Nguyên lý của IC-WPT

Sơ đồ khối đơn giản hóa của hệ thống IC-WPT được minh họa trong [Hình 1.9](#).



[Hình 1.9](#). Sơ đồ khối của hệ thống IC-WPT [44].

Công nghệ IC-WPT dựa trên sự truyền năng lượng thông qua từ trường giữa cuộn phát và cuộn thu được ghép cặp với nhau ở khoảng cách ngắn. Nguyên lý của IC-WPT tương tự nguyên lý hoạt động của máy biến áp không khí mà đã được đề cập trong tài liệu [45]. Dải tần hoạt động của IC-WPT là vùng kHz và khoảng cách điển hình giữa cuộn phát và cuộn thu trong các sản phẩm thương mại thường không vượt quá 40 mm. Công nghệ này thường cho phép truyền năng lượng từ vài W đến kW. [Hình 1.10](#) [33], [46] cho thấy nguyên lý WPT thông qua từ trường trong IC-WPT.

Khi đưa nguồn điện áp xoay chiều U_p có biên độ U_0 và tần số f vào hai đầu cuộn sơ cấp thì có dòng điện chạy qua cuộn sơ cấp N_{v1} . Kết quả là sẽ tạo ra từ thông biến thiên theo thời gian gửi qua cuộn thứ cấp N_{v2} . Do hiện tượng cảm ứng điện từ, kết quả hình thành suất điện động trong cuộn dây thứ cấp và có dòng điện chạy trong nó. Trong trường hợp các đường sức của từ trường có cảm ứng từ B vuông góc với bề mặt S mà từ thông đi qua và xét từ trường là đồng nhất thì biểu thức của từ thông được xác định là [33]:

$$\phi = BS \quad (1.10)$$

Theo định luật Faraday, giá trị của suất điện động cảm ứng bằng tích của số vòng dây N_{v2} của cuộn thứ cấp và đạo hàm theo thời gian của từ thông. Xét đến sự phụ thuộc theo phương trình (1.10), suất điện động được xác định bằng [33]:

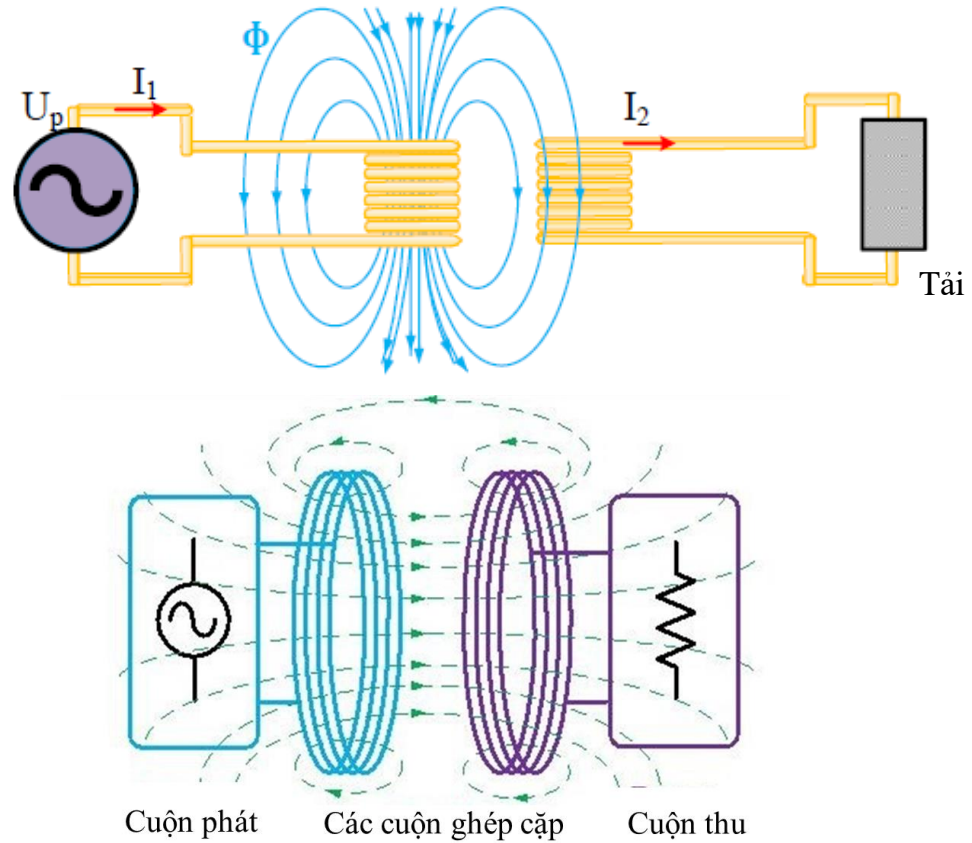
$$\xi = -N_{v2}S \frac{dB}{dt} \quad (1.11)$$

Giả sử tổn thất trong cuộn dây là không đáng kể, có thể xem rằng điện áp trên cuộn dây sơ cấp N_{v1} và cuộn dây thứ cấp N_{v2} sẽ bằng các suất điện động trên các cuộn

đó. Khi đó, giá trị điện áp hiệu dụng ở cuộn dây thứ n của hệ thống IC-WPT có thể được xác định bởi [33]:

$$U_n = k\pi\sqrt{2}fN_{vn}B_mS \quad (1.12)$$

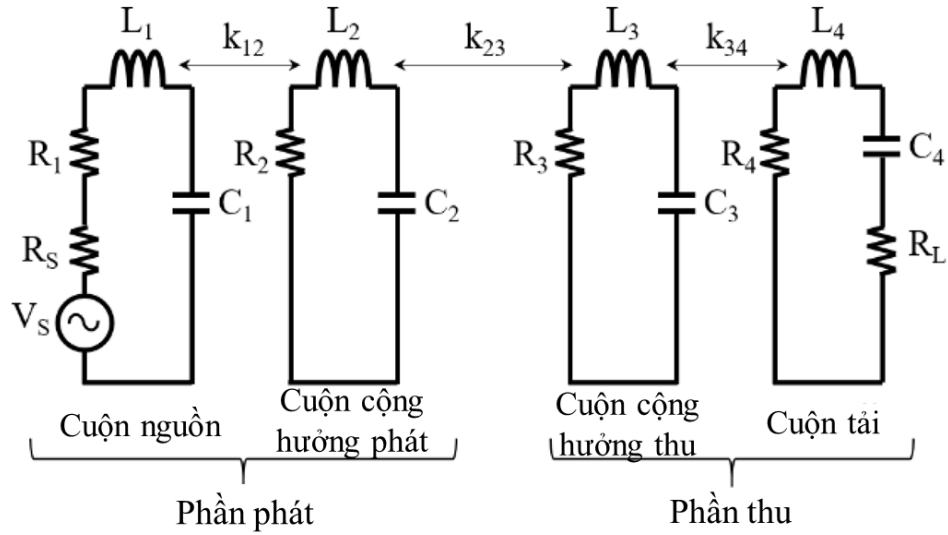
Trong đó: N_{vn} biểu thị số vòng dây của cuộn dây thứ n , k là hệ số ghép cặp giữa cuộn sơ cấp và cuộn thứ cấp, B_m là biên độ của mật độ từ thông.



Hình 1.10. Nguyên lý của IC-WPT [33], [46].

b) Nguyên lý của MR-WPT

Sơ đồ khối đơn giản hóa của hệ thống MR-WPT được chỉ ra như trong [Hình 1.11](#) [47]. Nguyên lý hoạt động của hệ thống MR-WPT tương tự nguyên lý hoạt động của hệ thống IC-WPT, cơ bản đều dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ. Tuy nhiên, sự khác biệt cơ bản của IC-WPT và MR-WPT là trong hệ thống MR-WPT, hai cuộn dây cộng hưởng từ ở tần số cao, đồng thời hai cuộn cộng hưởng này không nối với nguồn và tải nên có hệ số phẩm chất cực cao, do đó năng lượng truyền đi được xa hơn. Tần số hoạt động của hệ thống MR-WPT thường là vài trăm kHz hoặc vài MHz và năng lượng có thể được truyền ở khoảng cách lên tới m.



Hình 1.11. Sơ đồ khối của hệ thống MR-WPT [47].

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

Trong những năm gần đây, sự quan tâm đến sạc không dây đã và đang tăng lên đáng kể. Công nghệ WPT đang bắt đầu được sử dụng rộng rãi trong các ngành và các lĩnh vực khác nhau, chẳng hạn như ô tô, thiết bị điện tử, y học, quân sự và vũ trụ. Trong mỗi lĩnh vực, hệ thống WPT được ứng dụng trên cơ sở xác định một số các tham số cần được điều chỉnh để phù hợp với yêu cầu của thiết bị về nguồn điện không dây, ví dụ như: kích thước, khoảng cách giữa thiết bị chứa bộ thu và bộ phát cũng như công suất định mức [33].

Theo Báo cáo kỹ thuật của Viện Tiêu chuẩn Viễn thông châu Âu [6], hiện nay nhiều tập đoàn công nghệ đang nghiên cứu các dải tần số khác nhau để triển khai hệ thống WPT theo một số tiêu chuẩn. Bốn tiêu chuẩn được phân biệt bởi Liên minh năng lượng không dây (The Wireless Power Consortium - WPC) gồm: tiêu chuẩn Qi, tiêu chuẩn bếp điện không dây Ki, tiêu chuẩn xe điện hạng nhẹ và tiêu chuẩn Công nghiệp [29]. Cũng theo Báo cáo kỹ thuật của Viện Tiêu chuẩn Viễn thông châu Âu, các hiệp hội liên minh công nghiệp, tập đoàn và viện nghiên cứu đã đưa ra một số dải tần cho phép sử dụng công nghệ WPT, một số dải tần hứa hẹn có tiềm năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực. Trong số đó, vùng tần số MHz có các dải tần được quan tâm và đề xuất gồm: dải tần 2,050 – 2,150 MHz, dải tần 6,765 – 6,795 MHz và dải tần 13,553 – 13,567 MHz. Với dải tần 2,050 – 2,150 MHz, hệ thống WPT ứng dụng cho các thiết bị dân dụng với công suất truyền thường nhỏ hơn 5 W, có thể sử dụng cho các thiết bị nhỏ; với dải tần số 13,553 – 13,567 MHz hệ thống WPT ứng dụng cho các thiết bị dân dụng với công suất thường nhỏ hơn 5 W và có thể sử dụng cho nhiều loại thiết bị khác nhau. Cũng theo báo cáo này, vùng tần số MHz chỉ phù hợp với mức

công suất nhỏ hơn 31,5 W và được ứng dụng trong một số lĩnh vực cụ thể tùy thuộc vào từng mức công suất.

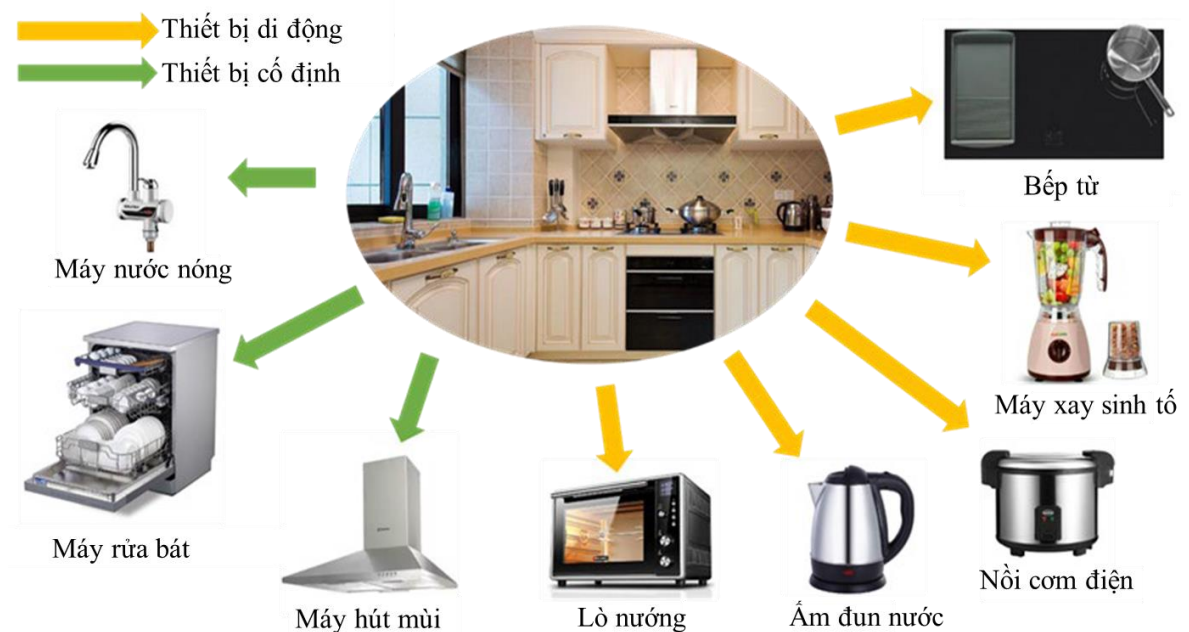
- Với công suất $P < 1$ W, WPT sử dụng để sạc các cảm biến IoT nhỏ, hiện được sử dụng trong vùng 13,553 – 13,567 MHz.

- Với $1 \text{ W} < P < 5$ W, WPT sử dụng để sạc cho một số thiết bị như điện thoại di động, đồng hồ thông minh, máy tính bảng, máy ảnh, thiết bị chiếu sáng, bộ sạc pin, đồ nội thất, thiết bị y tế và các hệ thống WPT hiện được sử dụng hoạt động trong các dải tần 85 – 205 kHz, 300 – 500 kHz, 900 – 1000 kHz, 2,050 – 2,150 MHz, 6,765 – 6,795 MHz và 13,553 – 13,567 MHz.

- Với $5 \text{ W} < P < 31,5$ W, WPT sử dụng cho máy tính bảng, máy ảnh, chiếu sáng, bộ sạc pin, đồ nội thất, thiết bị y tế và các hệ thống WPT trong các ứng dụng này hoạt động trong dải tần 85 – 205 kHz, 6,765 – 6,795 MHz và 13,553 – 13,567 MHz.

Vì vậy, trong phần này, chúng tôi tập trung trình bày ba ứng dụng điển hình của WPT ở dải tần số MHz là WPT ứng dụng trong các thiết bị điện tử dân dụng, WPT ứng dụng trong các thiết bị điện tử đeo và WPT ứng dụng trong các thiết bị y tế cấy ghép.

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



Hình 1.12. Khái niệm nhà bếp không dây: trang bị WPT cho các thiết bị nhà bếp không dây khác nhau [46].

Theo báo cáo năm 2020 của Hiệp hội Tòa nhà Tự động Lục địa (The Continental Automated Buildings Association – CABA) – một tổ chức công nghiệp quốc tế, phi lợi nhuận nhằm thúc đẩy công nghệ xây dựng nhà thông minh và xây dựng thông minh về “Ứng dụng WPT trong ngôi nhà và tòa nhà thông minh” đã cho thấy tiềm năng to lớn của WPT đối với các thiết bị điện tử dân dụng [46]. Báo cáo đã chỉ ra rằng thị trường WPT đang phát triển nhanh chóng hàng năm và các ứng dụng của nó đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều thiết bị dân dụng như máy pha cà phê, robot hút bụi, ấm đun nước điện, WPT có thể được sử dụng rộng rãi trong nhà bếp và phòng tắm – nơi có điện và nước cùng tồn tại – bởi WPT cho phép các thiết bị này có cấu trúc khép kín, giúp chúng chống nước, chống bụi tốt hơn và loại bỏ nguy cơ bị điện giật. **Hình 1.12** cho thấy một số ứng dụng WPT tiềm năng trong các thiết bị nhà bếp, bao gồm máy nước nóng, máy rửa bát, lò nướng, ấm đun nước, máy xay sinh tố, bếp từ, Những thiết bị này có thể được sạc bằng cách chỉ cần đặt chúng trên một bộ phát được lắp bên dưới mặt bàn bếp, giúp cải thiện sự tiện lợi và an toàn cho người dùng.

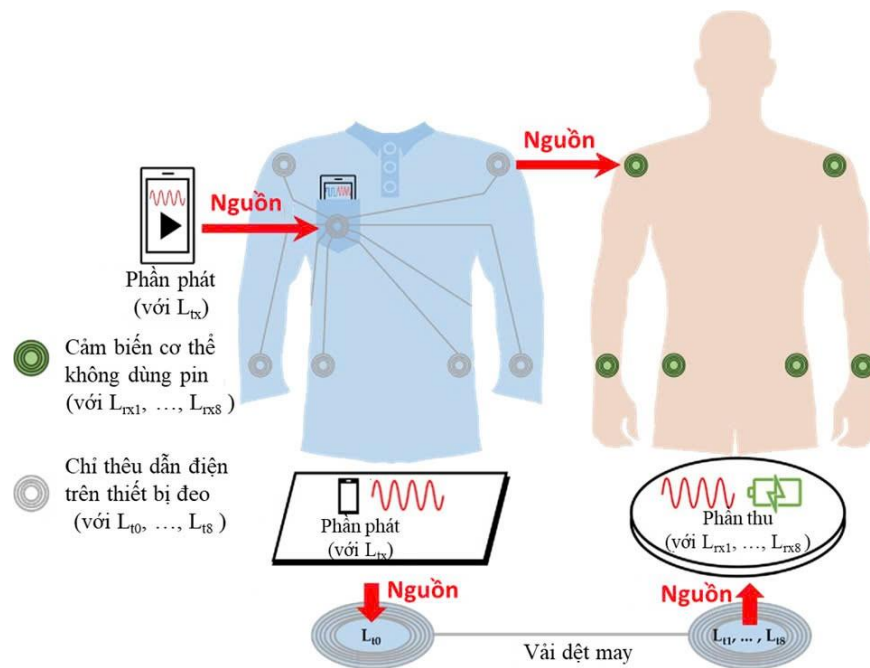


Hình 1.13. Một số thiết bị không dây của Haier: (a) đèn bàn thông minh WZDT502L-B, (b) robot hút bụi không dây 690RS, (c) nồi cơm điện không dây WFD-30A, (d) máy xay không dây WJD-380A [46].

Vào năm 2019, Liên minh năng lượng không dây đã công bố tiêu chuẩn bếp không dây Ki liên quan đến cấp nguồn không dây cho các thiết bị nhà bếp, từ thiết bị đơn giản, công suất thấp đến các thiết bị yêu cầu công suất cao lên tới 2,2 kW. Tiêu chuẩn này cho phép thiết bị phát sóng không dây và các thiết bị nhà bếp Ki có thể hoạt động cùng nhau bất kể của thương hiệu nào. Ngoài các cơ quan tiêu chuẩn như Tập đoàn công nghệ không dây, nhiều công ty hàng đầu cũng tỏ ra rất quan tâm đến WPT và đầu tư mạnh vào việc phát triển các sản phẩm WPT của riêng mình, Haier là một ví dụ. Theo thông tin trên website của hãng, Haier đã cho ra mắt nhiều thiết bị gia dụng có chức năng WPT. **Hình 1.13** cho thấy một số sản phẩm của họ: đèn bàn thông minh WZDT502L-B được trang bị bộ sạc không dây Qi cho điện thoại di động, robot hút bụi không dây 690RS, nồi cơm điện không dây WFD-30A và máy xay không dây WJD-380A.

Ngoài những ví dụ trên, WPT còn có nhiều ứng dụng tiềm năng đối với thiết bị điện tử dân dụng cần được khám phá. Ti vi và các thiết bị viễn thông khác cũng như máy nước nóng trong phòng tắm đều là những ví dụ điển hình có thể sử dụng công nghệ WPT để tạo ra cuộc sống gọn gàng hơn, an toàn hơn và thuận tiện hơn. Mặc dù WPT có nhiều ưu điểm so với phương pháp sạc cắm thông thường nhưng vẫn tồn tại một số trở ngại cản trở việc ứng dụng rộng rãi của nó như người tiêu dùng cần thời gian để thích ứng với các công nghệ mới, chi phí của hệ thống WPT. Tuy nhiên, bất chấp những trở ngại này, theo dự đoán trong mười năm tới, ứng dụng của WPT trong các ngôi nhà, tòa nhà thông minh dự kiến sẽ tăng theo cấp số nhân.

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

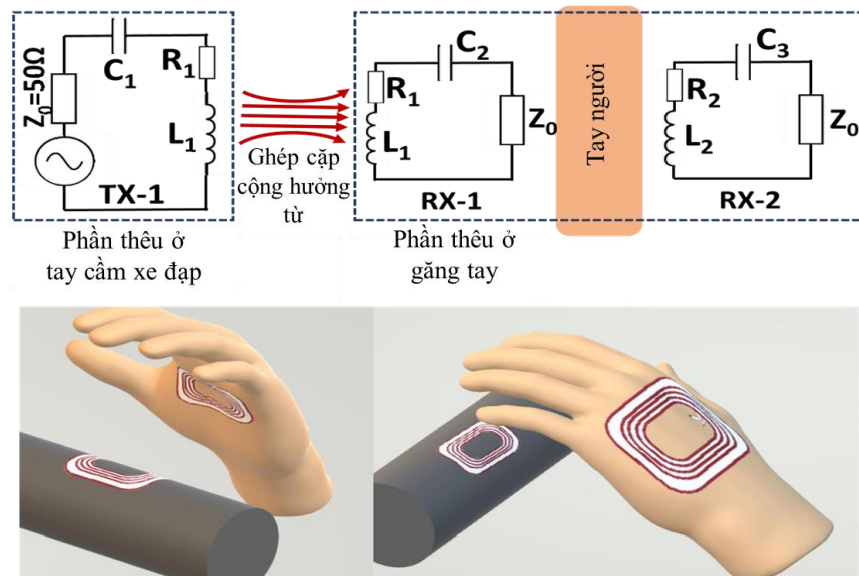


Hình 1.14. Một hệ thống cung cấp năng lượng không dây bao gồm Tx, vải thêu hoa văn cảm ứng làm bằng dây dẫn điện và Rx (cảm biến) [48].

Các thiết bị điện tử đeo có khả năng thu thập nhiều thông tin sinh lý khác nhau của cơ thể con người đã và đang được sử dụng trong nhiều lĩnh vực, chẳng hạn như thiết bị y tế, thể thao, nghiên cứu giao diện người máy, ... Trong các lĩnh vực đó, nhu cầu đặt nhiều cảm biến dưới dạng máy thu trên các bộ phận khác nhau của cơ thể con người là rất lớn để thu thập đồng thời nhiều tín hiệu hoạt động trong cơ thể con người. Tất cả các cảm biến này cần phải được cấp nguồn để hoạt động nên có thể sử dụng một nguồn năng lượng riêng từ pin. Tuy nhiên, để tránh ảnh hưởng của các cảm biến đến các hoạt động bình thường của cơ thể con người, thiết bị cấp nguồn cần có độ linh hoạt và độ bền cơ học cao. Các cảm biến rời rạc chạy bằng pin hiện đang được sử dụng rộng rãi nhất, chúng cần phải thay pin hoặc sạc lại sau một thời gian nhất

định và khi đó sẽ làm tăng trọng lượng và thể tích của pin. Vấn đề này có thể được giải quyết bằng cách sử dụng một máy thu năng lượng để xây dựng hệ thống điện tự sạc, cung cấp năng lượng liên tục. Việc sử dụng quần áo thêu với mạch cảm ứng làm phương tiện để cấp nguồn không dây cho nhiều cảm biến được chứng minh có khả năng giải quyết hiệu quả vấn đề giá pin cao và cần thay thế thường xuyên mà không yêu cầu công nghệ phức tạp. Gần đây, một hệ thống WPT phân tán hiệu quả cho nhiều cảm biến thông qua mảng cuộn dây dệt đã được đề xuất bởi Zuolin Li và cộng sự, như được minh họa trong [Hình 1.14](#).

Trong nghiên cứu này, một hệ thống cộng hưởng song song được tối ưu hóa có khả năng cấp nguồn đồng thời cho nhiều cảm biến cấy ghép trong cơ thể người đã được đề xuất. Cấu trúc đề xuất có thể truyền năng lượng không dây đến nhiều cảm biến một cách hiệu quả mà không cần sửa đổi cấu trúc cuộn dây dệt trong khi số lượng cảm biến được ghép nối thay đổi đột ngột. Nhờ kỹ thuật cộng hưởng tự động và sử dụng cấu trúc song song, hiệu suất cao hơn của toàn bộ hệ thống được duy trì so với hệ thống cộng hưởng nối tiếp thông thường. Trong hệ thống đề xuất, tối đa tám cảm biến được cấp nguồn không dây thông qua cuộn dây dệt đã được minh họa và kỹ thuật được đề xuất có thể được mở rộng cho một số lượng lớn cảm biến.

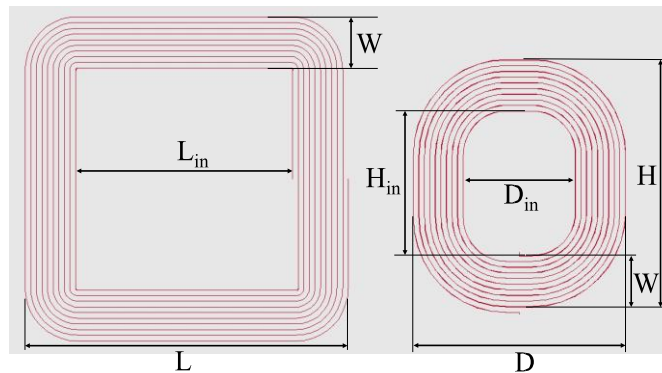


Hình 1.15. Cấu trúc của hệ thống WPT được đề xuất: Sơ đồ (ở trên) thể hiện cấu trúc bộ thu kép và bố cục 3D (ở dưới) hiển thị cách sắp xếp các cuộn dây [49].

Trong các thiết bị điện tử đeo, găng tay là một trong số các thiết bị đã thu hút được sự quan tâm nghiên cứu. Găng tay MR-WPT hoạt động ở tần số 6,78 MHz với bộ thu kép sử dụng cuộn dây thêu dành cho các ứng dụng xe đạp thông minh đã được triển khai nghiên cứu bởi Mahmoud Wagih và cộng sự [49]. Găng tay này đóng vai

trò là bộ thu trong hệ thống WPT có cấu trúc như được trình bày trong [Hình 1.15](#). Hệ thống WPT này được đề xuất nhằm mục đích truyền năng lượng được tạo ra từ máy thu năng lượng cơ học trên xe đạp sang các cảm biến dựa trên vật liệu dệt may trên cơ thể thông qua găng tay của người đi xe đạp bằng cách sử dụng mối ghép nối cộng hưởng từ giữa cuộn dây thêu trên tay cầm của xe đạp và cuộn dây thêu trên tay của người sử dụng.

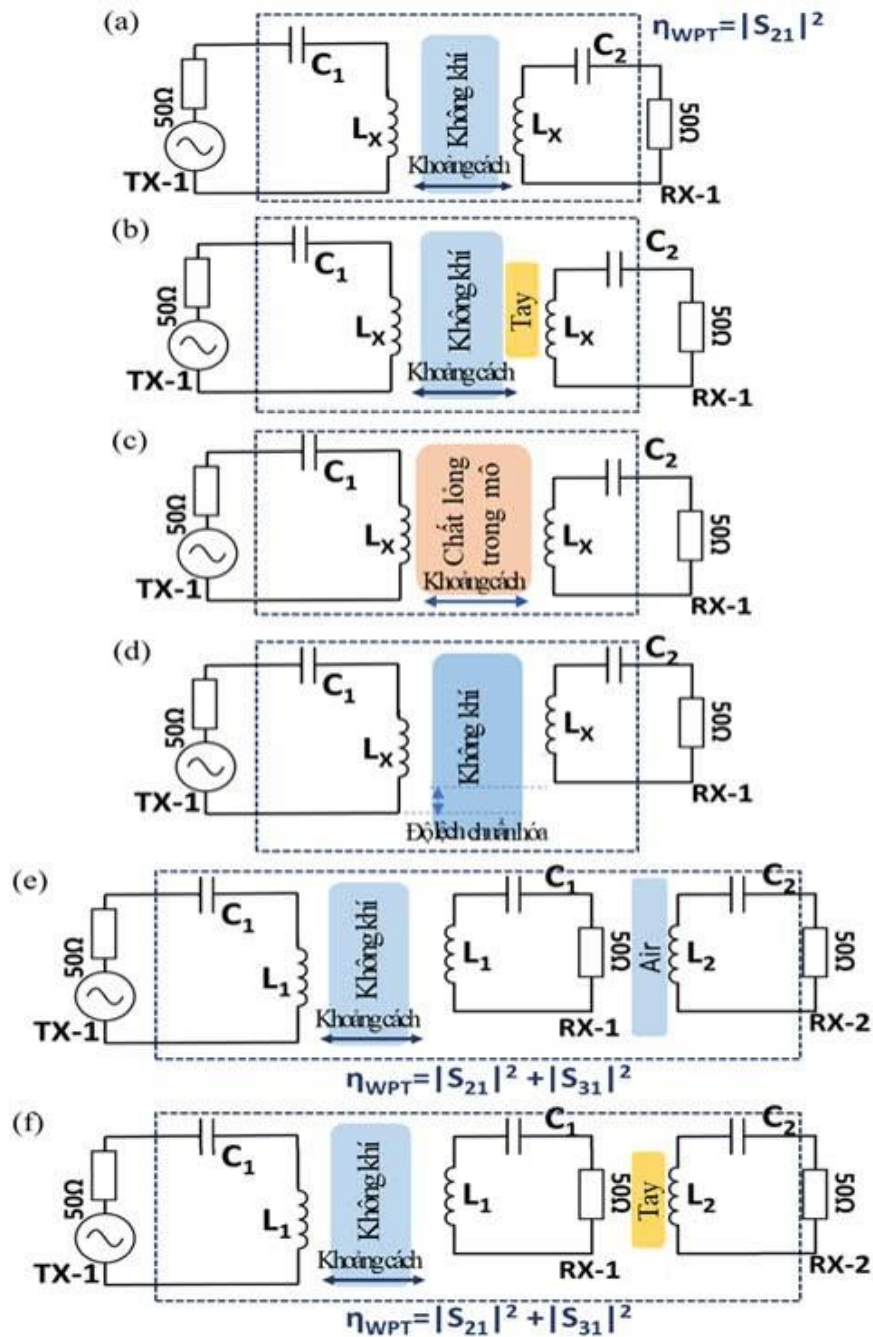
Trong đó, găng tay với cấu trúc bộ thu kép bao gồm hai cuộn dây được đặt trên hai mặt của bàn tay người dùng, cuộn dây ở phía mu bàn tay có kích thước lớn hơn kích thước của cuộn dây ở lòng bàn tay nhằm cải thiện hiệu suất của hệ thống WPT trên khoảng cách xa hơn hoặc khi bị sai lệch. Trong nghiên cứu này, các cuộn dây được làm từ dây đồng phủ lụa dày 40 μm trên nền vải dệt may nhằm giảm điện trở tần số cao do hiệu ứng bề mặt và chúng được thêu bằng máy may tự động lên nền bông-polyester dày 0,266 mm (độ dẫn điện 1,6 và hằng số điện môi 0,027). Các dây đồng có độ rộng 0,04 mm và khoảng cách giữa các vòng dây cạnh nhau trong mỗi cuộn dây là 1 mm. Bên cạnh đó, các thông số của hai cuộn dây trong bộ thu kép được minh họa và chỉ ra trong [Hình 1.16](#).



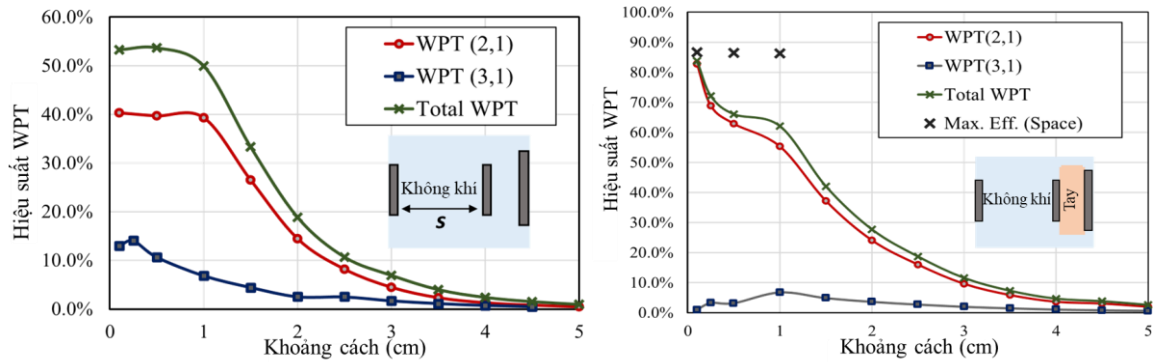
Hình 1.16. Cấu trúc các cuộn dây trong bộ thu kép (10 vòng): cuộn dây ở lòng bàn tay L_1 (bên phải), cuộn dây ở mu bàn tay L_2 (bên trái). Kích thước (mm): $L = 60$, $L_{in} = 40$, $W = 10$, $H = 46$, $H_{in} = 26$, $D = 40$, $D_{in} = 20$ [49].

Sau khi thiết kế, các thử nghiệm đã được thiết lập để xác định hiệu suất WPT trong các trường hợp như minh họa ở [Hình 1.17](#) và kết quả thu được như được thể hiện ở [Hình 18](#). Kết quả cho thấy, bằng cách sử dụng găng tay dựa trên vật liệu dệt may với cấu trúc bộ thu kép trong hệ thống WPT cho các ứng dụng xe đạp thông minh được đề xuất đã giúp WPT hiệu quả từ xe đạp thông minh sang người sử dụng, hệ thống đạt được hiệu suất cao nhất khi đặt trong không khí và khi đeo trên tay lần lượt là 90% và 82%, tăng đáng kể so với hiệu suất của hệ thống chỉ gồm 2 cuộn dây

L_1 đối xứng (cuộn phát đặt trên tay cầm của xe đạp thông minh và cuộn thu đặt ở lòng bàn tay của găng tay) là 40% .



Hình 1.17. Các thiết lập thử nghiệm: (a) Tx/Rx đối xứng trong môi trường không khí, (b) Tx/Rx đối xứng qua mu bàn tay, (c) Tx/Rx đối xứng thông qua chất lỏng mô phỏng cơ thể, (d) độ lệch chuẩn hóa của cuộn dây đối xứng, (e) hệ thống WPT với bộ thu kép đặt trong môi trường không khí, (f) hệ thống WPT với bộ thu kép đặt trên tay [49].



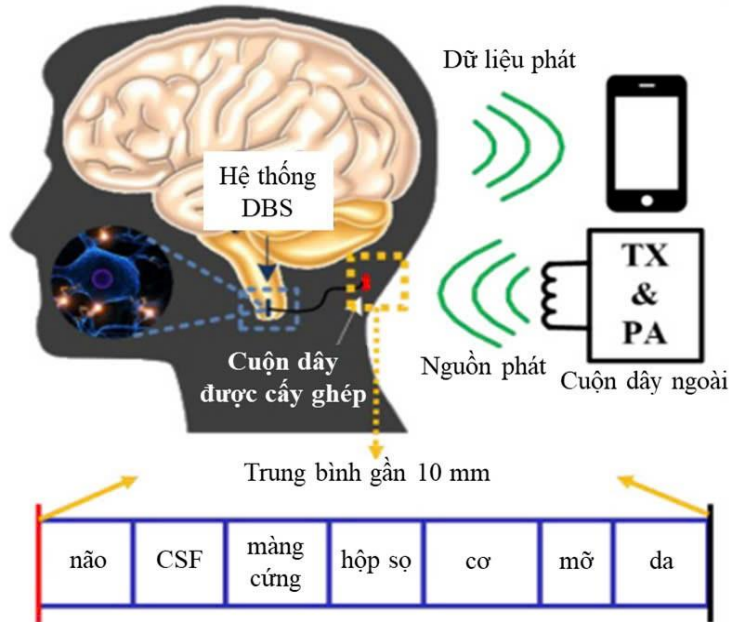
Hình 1.18. Hiệu suất của hệ thống WPT với bộ thu kép trong lần lượt khi đặt trong không gian và đeo trên tay [49].

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

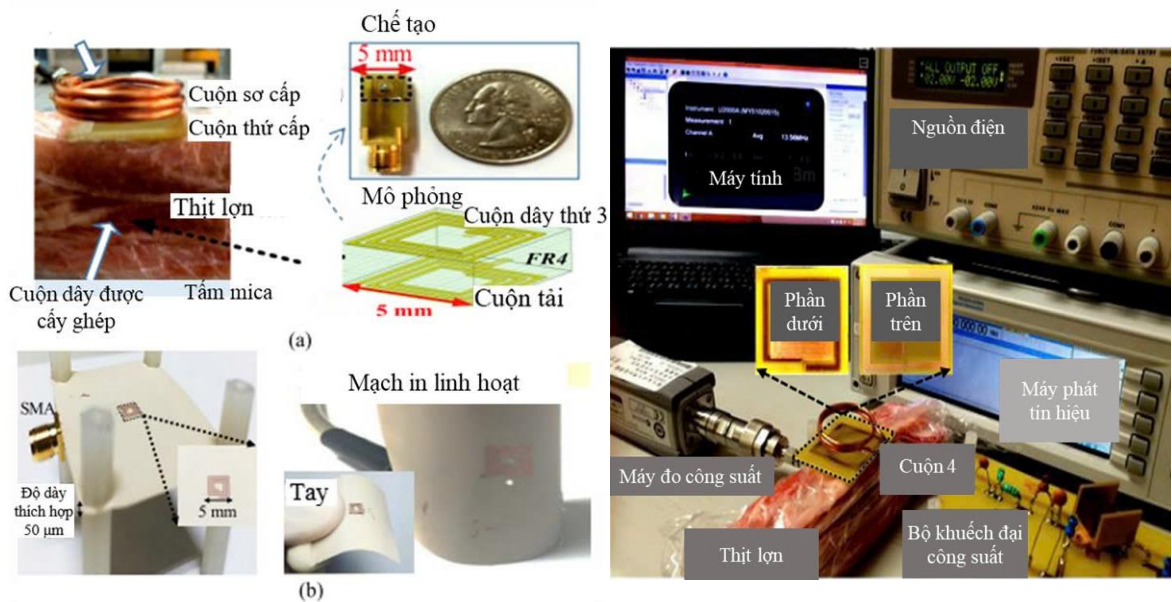
Ngày nay, tiến bộ y học ngày càng phát triển với sự quan tâm ngày càng tăng đối với các thiết bị theo dõi và kiểm soát các chức năng trong cơ thể người [50]. Các thiết bị y tế cấy ghép (Medical Implanted Devices - MIDs) đã được đưa vào sử dụng, làm giảm đáng kể tỷ lệ mắc bệnh và cải thiện mức sống cho bệnh nhân. Hầu hết MIDs đều sử dụng pin, mặc dù có một số bất cập là khối lượng của pin lớn, hạn chế về tuổi thọ và tác dụng phụ của hóa chất, cũng như sự bất tiện của cáp sạc và thời gian dài cần thiết cho quá trình sạc. Vì vậy, việc cung cấp năng lượng cho MIDs vẫn là một thách thức lớn. Câu trả lời cho vấn đề này là sử dụng công nghệ WPT cho MIDs. WPT là nguồn cung cấp năng lượng an toàn và phù hợp để sạc lại cảm biến sinh học và MIDs, cũng như để truyền dữ liệu trong các ứng dụng cụ thể này do các hệ thống WPT trong MIDs cho phép tăng khả năng mô phỏng các cơ quan nội tạng và truyền các tín hiệu sinh tồn bên trong đến các trạm thu bên ngoài [51]. MIDs sử dụng WPT có một số ưu điểm: nhẹ, nhỏ và thoải mái hơn khi cấy trực tiếp vào các mô hoặc cơ quan của bệnh nhân. Đồng thời, hiệu quả chuẩn đoán và điều trị cũng rõ ràng hơn. Hầu hết MIDs được cung cấp năng lượng bằng cách sử dụng các liên kết ghép cặp cảm ứng, được sử dụng để mô phỏng các tín hiệu sinh học và cho phép quan sát liên tục. Nói chung, MIDs sử dụng WPT chứa một phần bên ngoài và một phần bên trong. Phần bên ngoài được cố định bên ngoài bệnh nhân và truyền năng lượng theo cách tự cảm đến phần bên trong, đặt trong người bệnh nhân và nhận dữ liệu từ bệnh nhân. Tiêu thụ ít năng lượng hơn, tốc độ dữ liệu cao, khả năng hiển thị tốt và kích thước nhỏ là những yếu tố chính có thể ảnh hưởng đến hiệu quả của MIDs hoàn chỉnh và cho phép bệnh nhân cảm thấy thư giãn.

Thiết bị kích thích não sâu (Deep Brain Stimulation – DBS) là một trong các thiết bị cấy ghép y tế được quan tâm nghiên cứu. Một hệ thống WPT bốn cuộn hiệu

quả cho thiết bị DBS như được trình bày trong [Hình 1.19](#), [Hình 1.20](#) đã được nghiên cứu bởi Chin-Lung Yang và cộng sự [52].



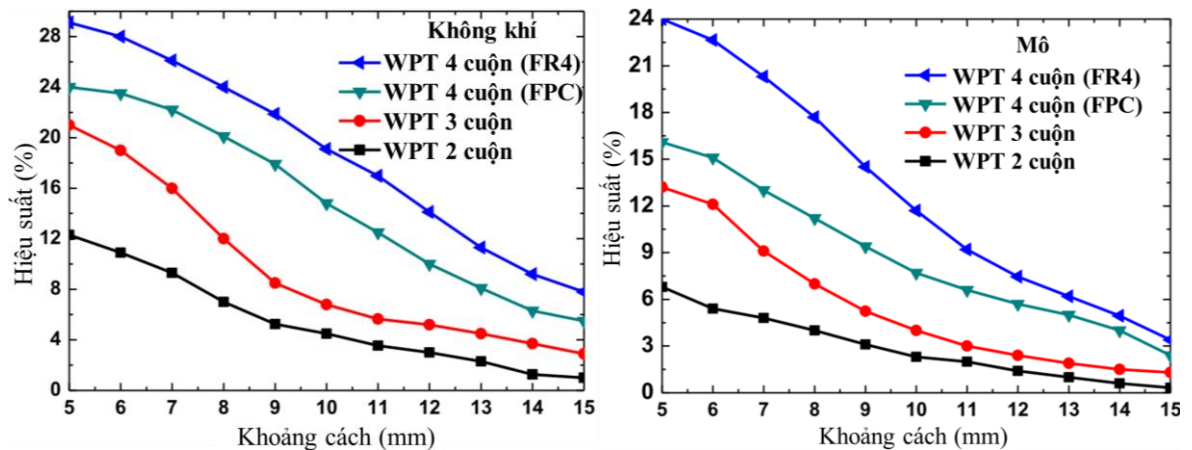
Hình 1.19. Khái niệm về thiết bị kích thích não sâu, trong đó năng lượng và dữ liệu được truyền không dây [52].



Hình 1.20. Thiết lập và triển khai thực nghiệm cuộn dây cấy ghép với (a) đế FR-4 và (b) đế mạch in linh hoạt. Thiết lập đo đặc hệ thống WPT dưới mô (thịt lợn) [52].

Hệ thống WPT bốn cuộn hiệu quả cho DBS này bao gồm một cuộn bên ngoài và một cuộn được cấy ghép trong não như được trình bày trong [Hình 1.20](#). Một thiết kế cuộn PCB FR-4 hai lớp mới được đề xuất làm cuộn thứ hai (gồm cuộn thu và tải) để tăng hiệu suất WPT. Công nghệ WPT cấy ghép hiệu suất cao đã đạt được bằng

cách áp dụng một cuộn xoắn ốc in hai lớp bên trong và cuộn xoắn ốc bên ngoài với mạng phối hợp trở kháng loại T . Để giảm hiệu ứng tải, nguyên nhân làm giảm hệ số phẩm chất Q trong các thiết bị cấy ghép, hệ thống WPT bốn cuộn được khuyến nghị so với hệ thống WPT hai hoặc ba cuộn. Một hệ thống bốn cuộn thực tế đã được triển khai để xác minh, trong đó một bảng mạch in hai lớp bao gồm một cuộn xoắn ốc được in và cuộn tải ở phía bên kia của đế FR-4, đã được thiết kế và triển khai xung quanh hệ thống trên một con chip. Các cuộn xoắn ốc được in dùng cho cấy ghép y sinh có thể được tối ưu hóa bằng cách thiết kế các tham số hình học. Cuộn cấy ghép chiếm một diện tích có kích thước $5 \times 5 \text{ mm}^2$ và được triển khai trên cả đế FR-4 và đế mạch in linh hoạt có thể cấy ghép với các thông số hình học được tối ưu hóa.



Hình 1.21. Hiệu suất truyền năng lượng không dây theo khoảng cách khi sử dụng đế FR-4 và đế mạch in linh hoạt lần lượt qua không khí và qua mô [52].

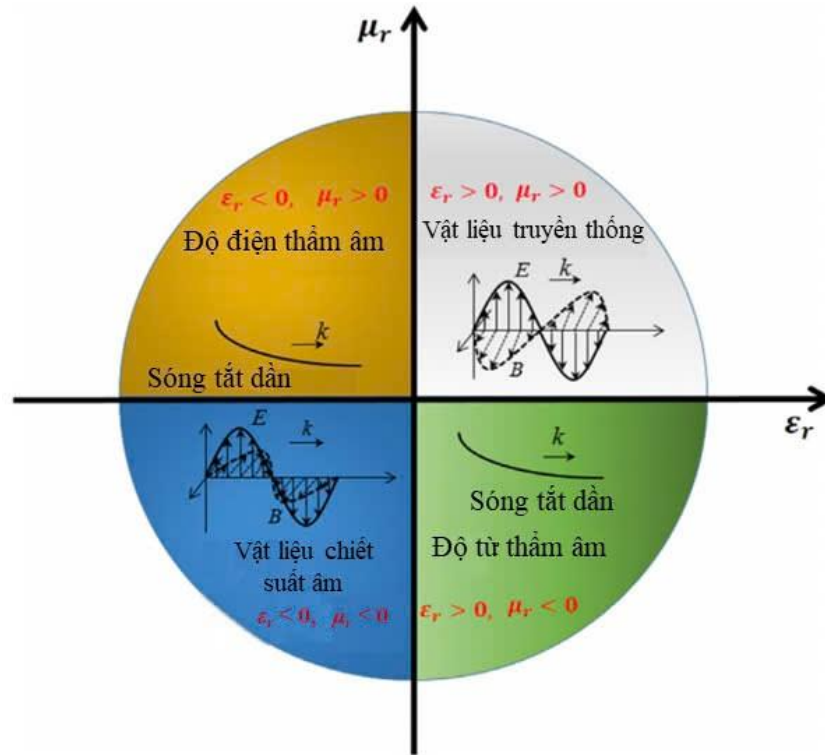
Hệ thống WPT bốn cuộn hiệu quả cho DBS này hoạt động ở tần số 13,56 MHz. Các kết quả thực nghiệm cho thấy hiệu suất khi sử dụng đế FR-4 và đế mạch in linh hoạt, ở khoảng cách 10 mm, lần lượt là 19,1% và 14,8% qua không khí; và là 11,7% và 7,7% qua mô (Hình 1.21). Hệ thống này cho phép cung cấp năng lượng cỡ mW cho các mạch kích thích.

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

1.3.1. Vật liệu biến hoá

Vật liệu biến hoá là vật liệu nhân tạo có đặc tính điện từ độc đáo, vượt trội mà các vật liệu thông thường không có [1], [7]. Khái niệm vật liệu biến hoá được đề xuất lần đầu tiên bởi Victor Veselago vào năm 1968 dựa trên một phân tích lý thuyết về vật liệu có đồng thời độ điện thẩm (ϵ) và độ từ thẩm (μ) cùng âm [8]. Tuy nhiên, có quan điểm cho rằng vật liệu biến hoá bắt nguồn từ 1898 với nghiên cứu của Jagadish C. Bose về vật liệu vi sóng nhân tạo bất đối xứng cấu tạo từ các thành phần điện môi

bất đối xứng [9]. Sau 30 năm kể từ ngày mô hình lý thuyết về vật liệu biến hóa được đề xuất bởi Victor Veselago, lần lượt vào năm 1996 và năm 1999 John Pendry đã lần đầu tiên chế tạo thành công vật liệu biến hóa trong thực tế với cấu trúc lưới dây kim loại cho độ điện thẩm âm [10] và cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh cho độ từ thẩm âm [11]. Do có các đặc tính điện từ độc đáo khác nhau, vật liệu biến hóa có thể tìm thấy ở nhiều ứng dụng trong các lĩnh vực như thu năng lượng, vật liệu hấp thụ hoàn hảo, tăng cường hiệu suất ăng-ten, WPT, cảm biến, ...



Hình 1.22. Phân loại vật liệu dựa trên độ điện thẩm (ϵ) và độ từ thẩm (μ) [3].

Căn cứ vào giá trị của độ điện thẩm (ϵ) và độ từ thẩm (μ), vật liệu được phân loại thành bốn nhóm: vật liệu có độ điện thẩm và độ từ thẩm cùng dương, vật liệu có độ điện thẩm âm, vật liệu có độ điện thẩm và độ từ thẩm cùng âm (vật liệu chiết suất âm), vật liệu có độ từ thẩm âm như minh họa trong **Hình 1.22** [3]. Trong đó, đối với vật liệu có độ từ thẩm âm, chỉ có thành phần từ được xem xét, do đó nó còn được gọi là vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm – vật liệu MM. Hầu hết các cấu trúc vật liệu biến hóa hoạt động ở dải tần GHz và THz đều có phản ứng với cả điện và từ. Tuy nhiên, vật liệu MM thường hoạt động ở tần số MHz thấp và hoạt động chủ yếu với từ trường hay khi đặt vật liệu MM trong hệ thống, chủ yếu chỉ xảy ra tương tác giữa vật liệu với thành phần từ trường của hệ thống [53]. Nhờ tính chất độ từ thẩm âm, vật liệu MM có khả năng khuếch đại trường H tắt dần trong vùng trường gần, do đó, chúng có thể cải thiện hiệu quả hiệu suất của hệ thống WPT [1], [3].

a) Độ điện thẩm và độ từ thẩm

Các thông số điện từ đại diện cho các đặc tính của vật liệu biến hóa (độ điện thẩm, độ từ thẩm) có thể thu được từ lý thuyết môi trường hiệu dụng. Khi ô cơ sở của cấu trúc vật liệu nhỏ hơn rất nhiều so với bước sóng hoạt động của sóng điện từ, vật liệu có thể được xem như một môi trường đồng nhất. Do đó, các thông số điện từ của vật liệu có thể được tính toán bằng cách sử dụng lý thuyết môi trường hiệu dụng. Thông thường, kích thước của ô cơ sở của vật liệu biến hóa nhỏ hơn khoảng 50 lần bước sóng hoạt động. Độ điện thẩm hiệu dụng và độ từ thẩm hiệu dụng của cấu trúc vật liệu biến hóa có thể thu được bằng phương pháp truy xuất thông số S , được đề xuất trong tài liệu [54]. Từ năm 1970, phương pháp Nicolson-Ross-Weir [55] thường được sử dụng để tính toán các thông số vật liệu thông qua hệ số truyền qua và hệ số phản xạ. Trên cơ sở đó, năm 2004, nhóm nghiên cứu của X. D. Chen's [56] đã đề xuất một phương pháp chính xác hơn để tính toán các thông số hiệu dụng của vật liệu biến hóa. Mỗi quan hệ của các tham số S , chiết suất (N) và trở kháng (Z) có thể biểu thị như sau:

$$S_{11} = \frac{R_{01}(1 - e^{i2nk_0d})}{1 - R_{01}^2 e^{i2nk_0d}} \quad (1.13)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - R_{01}^2)e^{ink_0d}}{1 - R_{01}^2 e^{i2nk_0d}} \quad (1.14)$$

Trong đó: $R_{01} = (Z-1)/(Z+1)$, $X = 1/2S_{21}(1 - S_{11}^2 + S_{21}^2)$

nên có $e^{ink_0d} = X \pm i\sqrt{1 - X^2}$.

Chiết suất n và trở kháng Z có thể biểu thị như sau:

$$n = \frac{1}{k_0d} \left\{ \left[\left[\ln(e^{ink_0d}) \right]'' + 2m\pi \right] - i \left[\ln(e^{ink_0d}) \right]' \right\} \quad (1.15)$$

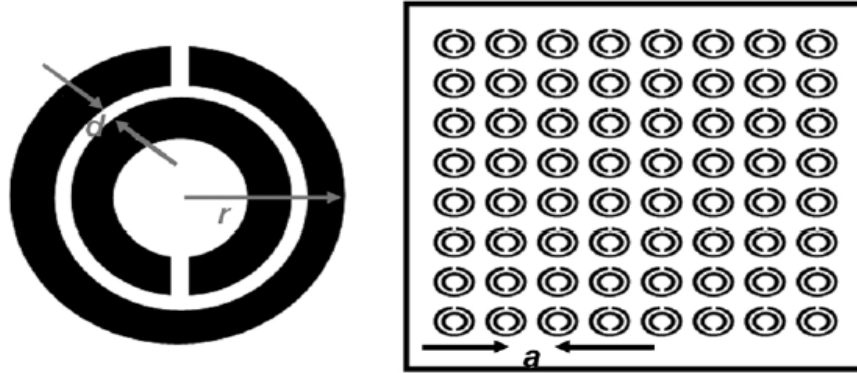
$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (1.16)$$

Độ điện thẩm hiệu dụng và độ từ thẩm hiệu dụng của vật liệu biến hóa có thể tính toán từ chiết suất n và trở kháng Z theo công thức sau:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{n}{Z}; \mu_{\text{eff}} = nZ \quad (1.17)$$

Nói chung, cách tiếp cận trên rất hữu ích để tính toán độ điện thẩm hiệu dụng và độ từ thẩm hiệu dụng của cấu trúc vật liệu biến hóa.

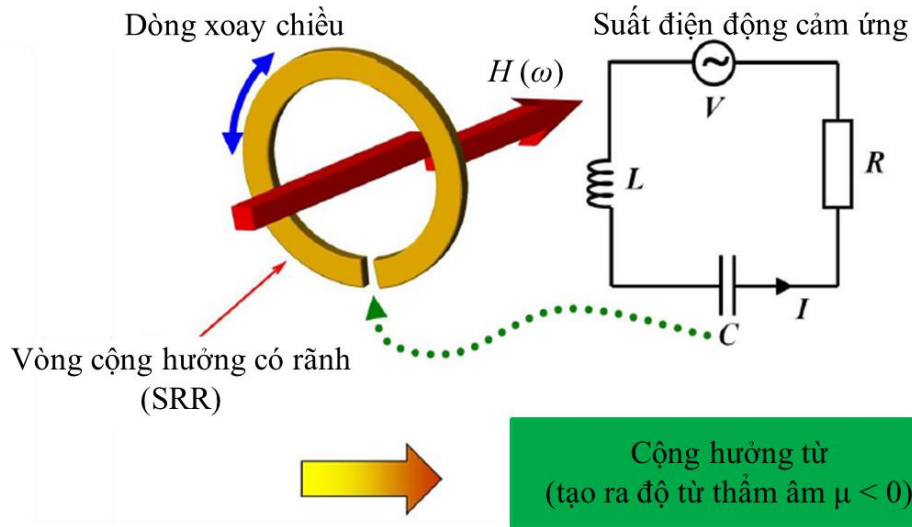
b) Vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm



Hình 1.23. Sơ đồ cấu trúc của SRR và các SRRs trong dãy tuần hoàn [11].

Năm 1999, Pendry đã đề xuất mô hình đầu tiên tạo ra vật liệu MM [11]. Mô hình Pendry đề xuất có độ từ thẩm âm ở vùng tần số GHz, dựa trên nguyên lý: hiện tượng từ có thể thu được từ các vật liệu phi từ bằng cách kích thích các dòng điện tròn nhằm tạo ra một momen lưỡng cực (Hình 1.24). Mô hình này gồm một dãy tuần hoàn của hai vòng cộng hưởng có rãnh (Split-ring Resonator – SRR) lồng vào nhau, trong đó mỗi SRR có thể tạo ra cộng hưởng ở bước sóng lớn hơn rất nhiều so với đường kính của vòng dây (Hình 1.23).

Hình 1.24 trình bày nguyên lý hoạt động của SRR để tạo ra độ từ thẩm âm. Khi đặt một từ trường biến thiên hướng theo trục của SRR, vòng cộng hưởng sẽ sinh ra một dòng điện. Đồng thời bản thân dòng điện này lại cảm ứng ra một lưỡng cực từ. Dưới tần số cộng hưởng ω_0 , cường độ của lưỡng cực từ tăng dần theo tần số và cùng pha với trường kích thích, khi đó cấu trúc SRR biểu hiện đặc trưng thuận từ. Khi tần số tiệm cận ω_0 , dòng điện sinh ra trong vòng không thể theo kịp trường ngoài và bắt đầu bị trễ. Trên tần số cộng hưởng, lưỡng cực từ càng trễ hơn cho đến khi nó hoàn toàn ngược pha so với trường kích thích, lúc này cấu trúc SRR mang tính chất nghịch từ. Trường hợp sau được sử dụng để tạo ra độ từ thẩm âm, do tại lân cận tần số cộng hưởng, tính nghịch từ được tăng cường một cách đáng kể đủ để tạo ra được độ từ thẩm âm ($\mu < 0$). Lưu ý rằng, do kích thước của SRR cũng như độ tuần hoàn của chúng nhỏ hơn rất nhiều lần bước sóng của vùng tần số hoạt động và do đó cho phép miêu tả mô hình này bằng tham số hiệu dụng.



Hình 1.24. Nguyên lý hoạt động của SRR để tạo ra độ từ thẩm âm [11].

Độ từ thẩm hiệu dụng μ_{eff} của mô hình SRR được tính như sau [11]:

$$\mu_{\text{eff}} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega\mu_0} - \frac{3}{\pi^2\mu_0\omega^2 Cr^3}} \quad (1.18)$$

Trong đó

$$F = \frac{\pi r^2}{a^2} \quad (1.19)$$

$$C = \frac{\varepsilon_0}{d} = \frac{1}{dc_0^2\mu_0} \quad (1.20)$$

Ở đây, F là hệ số lấp đầy, r là bán kính của vòng ngoài, a là khoảng cách giữa hai SRR liên tiếp (hằng số mạng), d là khoảng cách giữa hai vòng đơn, c_0 là vận tốc ánh sáng trong chân không, ω là tần số biến thiên của từ trường, μ_0 là độ từ thẩm của chân không.

Vì cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh SRR theo thiết kế ở trên (Hình 1.23) sẽ tạo ra dung kháng, do đó xảy ra cộng hưởng từ và giá trị độ từ thẩm hiệu dụng sẽ có giá trị âm ($\mu_{\text{eff}} < 0$). Hình 1.25 minh họa dạng tổng quát của độ từ thẩm hiệu dụng cho mô hình SRR với giả thiết là vật liệu không có tổn hao [11].

Mô hình cấu trúc SRR do Pendry đề xuất khác biệt ở chỗ tính chất từ không hề dựa trên các momen từ vĩnh cửu như các vật liệu thông thường. Không những thế, mô hình này còn tạo ra được tần số "plasma từ" tương tự như thành phần điện mà

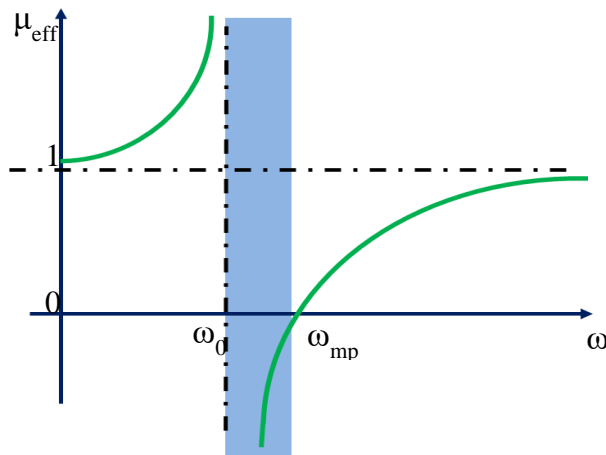
không cần đến các đơn cực từ. Vùng tần số có $\mu < 0$ sẽ nằm giữa tần số cộng hưởng ω_0 (tần số mà tại đó độ từ thẩm hiệu dụng phân kỳ hay tần số cộng hưởng của mạch LC) và tần số plasma từ ω_{mp} như được biểu diễn trên **Hình 1.25**, ở đó:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3}{\pi^2 \mu_0 C r^3}} = \sqrt{\frac{3 d c_0^2}{\pi^2 r^3}} \quad (1.21)$$

Với tần số lớn hơn ω_0 , cảm ứng từ lúc này bắt đầu ngược pha so với trường kích thích và độ từ thẩm hiệu dụng có giá trị âm từ tần số cộng hưởng cho tới tần số “plasma từ”. Tần số plasma từ có dạng:

$$\omega_{mp} = \sqrt{\frac{3}{\pi^2 \mu_0 C r^3 (1-F)}} = \sqrt{\frac{3 d c_0^2}{\pi^2 r^3 \left(1 - \frac{\pi r^2}{a^2}\right)}} \quad (1.22)$$

Từ công thức ω_0 và ω_{mp} cho thấy độ từ thẩm âm phụ thuộc rất mạnh vào các tham số hình học của cấu trúc SRR. Do đó, có thể tùy biến các tham số này để thu được tần số cộng hưởng và tần số plasma từ như mong muốn. Vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm vì vậy rất linh hoạt trong thiết kế và tần số hoạt động. Hiện nay vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm đã và đang thu hút được sự quan tâm của nhiều tập thể nghiên cứu trên thế giới nhằm tối ưu hóa cấu trúc để đơn giản trong thiết kế, thu được dải tần hoạt động rộng, từ đó hướng tới các ứng dụng của vật liệu MM trong truyền dẫn năng lượng, quân sự, y học,



Hình 1.25. Dạng tổng quát của độ từ thẩm hiệu dụng cho mô hình SRR với giả sử vật liệu không có tổn hao [11].

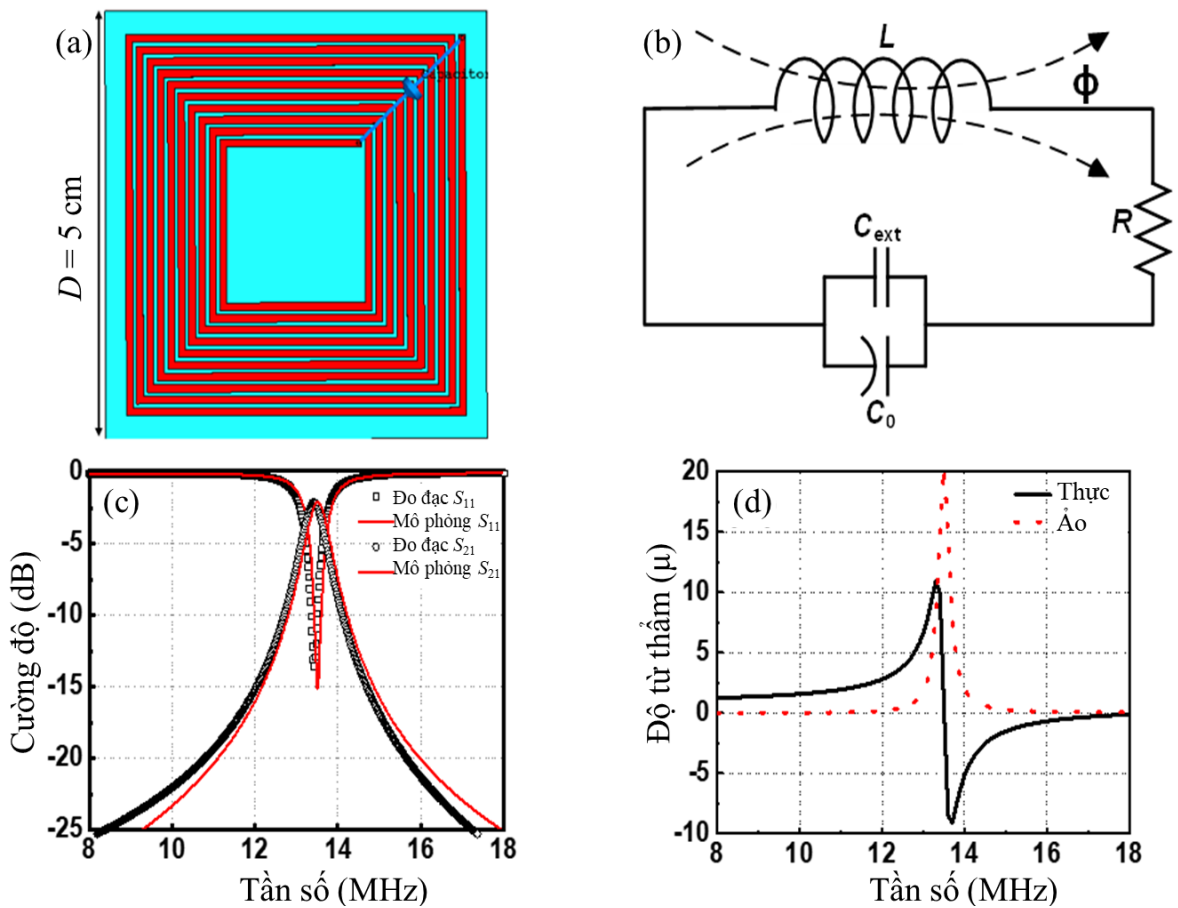
Để thuận lợi trong việc nghiên cứu, tính toán độ từ thẩm hiệu dụng của vật liệu MM, cộng hưởng kiểu Lorentzian đã được sử dụng, trong đó độ từ thẩm hiệu dụng thu được xác định theo phương trình sau [12].

$$\mu_{\text{eff}} = F \left(\omega_0^2 - \omega^2 - \frac{i\omega\omega_0}{Q} \right) \quad (1.23)$$

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \quad (1.24)$$

$$F = \frac{\mu_0 A}{V_0 L_{\text{avg}}} \quad (1.25)$$

Trong đó: Q là hệ số phẩm chất của ô cơ sở; A là diện tích của ô cơ sở; V_0 là thể tích bị chiếm bởi ô cơ sở; L_{avg} là độ tự cảm trung bình.



Hình 1.26. (a) Ô cơ sở của MM, (b) mô hình mạch điện tương đương của ô cơ sở, (c) hệ số phản xạ và truyền qua, (d) độ từ thẩm [57].

Hình 1.26 trình bày một ví dụ về vật liệu MM [57]. **Hình 1.26(a)** minh họa sơ đồ của một ô cơ sở MM bao gồm một bộ cộng hưởng xoắn ốc nhiều vòng gắn tụ điện ngoài. Mô hình mạch điện tương đương của ô cơ sở MM được chỉ ra trong **Hình 1.26(b)** với độ tự cảm $L = 0,95 \mu\text{H}$, điện dung riêng của xoắn ốc $C_0 = 5,05 \text{ pF}$, điện dung của tụ điện gắn ngoài có giá trị $C_{\text{ext}} = 15 \text{ pF}$, R đại diện cho tổn hao Ohmic trong cuộn xoắn ốc. Tần số cộng hưởng của ô cơ sở MM có thể tính toán thông qua các tham số L , C_0 , C_{ext} của mạch điện tương đương. Hệ số phản xạ và hệ số truyền qua của ô cơ sở vật liệu MM được chỉ ra trong **Hình 1.26(c)** cho thấy tần số cộng hưởng của ô cơ sở MM là 13,56 MHz. Các phần thực và phần ảo của độ từ thẩm có thể thu được từ tham số S bằng phương pháp truy xuất tiêu chuẩn [58] và được thể hiện trong **Hình 1.26(d)**. Phần thực của độ từ thẩm có dải giá trị âm hẹp xung quanh 13,56 MHz và giá trị độ từ thẩm âm đáng kể nhất bằng - 9,5 tại 13,68 MHz.

Như đã đề cập, MM thường hoạt động ở tần số MHz thấp và hoạt động chủ yếu với từ trường [53]. Nhờ tính chất độ từ thẩm âm, MM có khả năng khuếch đại từ trường tắt dần trong vùng trường gần, do đó, chúng có thể cải thiện hiệu quả hiệu suất của hệ thống WPT [59]. Nhiều nghiên cứu sử dụng MM cho WPT trường gần thông qua từ trường đã được thực hiện và các sản phẩm thương mại sử dụng công nghệ IC-WPT đã ra đời. Tuy nhiên, do hạn chế về hiệu suất cũng như khoảng cách truyền dẫn, độ an toàn, các nghiên cứu MR-WPT sử dụng MM vẫn đang được quan tâm nghiên cứu để mở rộng khả năng ứng dụng.

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

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

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng vật liệu MM có khả năng tăng cường hiệu suất truyền dẫn cũng như khoảng cách truyền dẫn của hệ thống WPT. Để có thể tối ưu việc sử dụng vật liệu MM trong hệ thống MR-WPT, vấn đề quan trọng là cần làm rõ cơ chế của hệ thống đó khi sử dụng vật liệu MM hoạt động ở dải tần số MHz hay chính là làm rõ vai trò của vật liệu MM trong hệ thống MR-WPT. Vấn đề này đã thu hút được sự quan tâm của nhiều nhà khoa học trên thế giới và được thể hiện trong nhiều công bố từ năm 2010 trở lại đây.

Khởi đầu cho những nghiên cứu về vật liệu MM ứng dụng trong WPT là những nghiên cứu về vật liệu biến hóa có chiết suất âm (Negative-index Metamaterials – NIM) – vật liệu có đồng thời độ điện thẩm ϵ và độ từ thẩm μ cùng âm – ứng dụng trong WPT. Trong đó, một số nghiên cứu bằng lý thuyết và mô phỏng đã chỉ ra rằng: vật liệu NIM

có khả năng ứng dụng trong hệ thống WPT để tăng hiệu suất và khoảng cách truyền dẫn của hệ thống WPT.

Năm 2000, Pendry và cộng sự bằng phân tích lý thuyết và kết quả mô phỏng đã chỉ ra rằng sóng điện từ có thể lan truyền trong môi trường có cả ε và μ đều âm [60]. Khúc xạ âm sẽ xảy ra tại mặt phân cách giữa môi trường thông thường (môi trường có ε và μ đều dương) và vật liệu NIM. Với một tấm NIM phẳng, khúc xạ âm xuất hiện ở cả hai mặt phân cách giữa môi trường và vật liệu (hai phía của tấm NIM). Vì vậy, các sóng lan truyền của một đối tượng có thể được tập trung bên trong tấm NIM và được tập trung lại bên ngoài. Bên cạnh đó, Pendry cũng chỉ ra rằng môi trường vật liệu NIM khuếch đại các trường tắt dần hay với tấm NIM, trường tắt dần của một đối tượng cũng có thể được khôi phục. Nói cách khác, một tấm NIM thu cả sóng lan truyền và các trường tắt dần của một đối tượng, tạo thành một “thấu kính hoàn hảo”.

Năm 2010, Wang và cộng sự cũng đã chứng minh bằng phân tích lý thuyết và mô phỏng số, chỉ ra rằng: hiệu suất của hệ thống WPT có thể được cải thiện bằng cách sử dụng vật liệu NIM do vật liệu này có thể tăng cường hệ số ghép cặp k giữa cuộn phát và cuộn thu [61]. Đề xuất này xuất phát từ nguyên tắc cơ bản đã được chỉ ra trong nhiều nghiên cứu nhằm tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT, đó là: chìa khóa của ghép cặp cộng hưởng từ là giữ cho sự ghép cặp k giữa cuộn phát và cuộn thu lớn hơn độ suy hao hoặc giữ cho $k^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2$ càng lớn càng tốt, trong đó $k = M / \sqrt{L_1 L_2}$ là hệ số ghép cặp giữa cuộn phát và cuộn thu, với L_1, L_2 lần lượt là độ tự cảm của cuộn phát, cuộn thu và M là hồ cảm giữa chúng; Q_1 và Q_2 là hệ số phẩm chất của cuộn phát và cuộn thu. Như đã biết, hệ số ghép cặp giữa hai cuộn dây đồng trục tỉ lệ với lập phương khoảng cách giữa các cuộn dây ($k \sim 1/r^3$) [62]. Vì vậy, ở một khoảng cách nhất định, khi các hệ số phẩm chất được cố định, cần cải thiện hệ số ghép cặp để cải thiện hiệu suất của hệ thống WPT. Các tính chất của vật liệu NIM, đặc biệt là khuếch đại từ trường tắt dần, được Wang quan tâm vì ghép cặp cộng hưởng từ về cơ bản là ghép cặp thông qua từ trường tắt dần. Với vật liệu NIM, biên độ của từ trường tắt dần có thể được tăng cường do khoảng cách ảo giữa hai bộ cộng hưởng nhỏ hơn. Wang cũng đã chỉ ra rằng: nghiên cứu này được thực hiện cho hệ thống MR-WPT nhưng đây cũng là cách tiếp cận chung cho các hệ thống ghép cặp bằng các trường tắt dần và cũng có thể được sử dụng cho các hệ thống ghép cặp cộng hưởng điện.

Các nghiên cứu về vật liệu NIM cho thấy rằng chúng có tác động tới cả sóng lan truyền và các trường tắt dần của một đối tượng và tạo thành một “thấu kính hoàn hảo”, đồng thời vật liệu NIM có khả năng khuếch đại các trường tắt dần. Như vậy, vật liệu NIM có khả năng ứng dụng trong hệ thống WPT. Tuy nhiên, các nghiên cứu

về vấn đề này mới chỉ dừng lại ở phân tích lý thuyết và mô phỏng, chưa có nghiên cứu thực nghiệm nào về việc sử dụng vật liệu NIM cho hệ thống WPT. Đồng thời, trên cơ sở các nghiên cứu đó, khi phân tích, xem xét trong giới hạn nhỏ hơn rất nhiều so với bước sóng hoạt động, ở đó từ trường và điện trường tách ra, một nhận định quan trọng đã được các nhà nghiên cứu rút ra: chỉ cần một tham số âm (độ điện thẩm âm hoặc độ từ thẩm âm) để đạt được sự khuếch đại các trường tắt dần [1], [63]. Điều này sẽ giúp đơn giản hóa quá trình thiết kế, chế tạo vật liệu biến hóa khi khái niệm tương tự được điều chỉnh cho hệ thống WPT dựa trên ghép cặp trường gần tắt dần (vật liệu MM có thể khuếch đại trường H tắt dần và vật liệu có độ điện thẩm âm có thể khuếch đại trường E tắt dần) vì trong hầu hết các hệ thống WPT cộng hưởng, kích thước của hệ thống nhỏ hơn rất nhiều so với bước sóng hoạt động. Hơn nữa, các nghiên cứu về WPT chỉ ra rằng hầu hết các hệ thống WPT cộng hưởng sử dụng ghép cặp từ tính để đảm bảo an toàn. Như vậy, sử dụng vật liệu MM, thay vì vật liệu NIM, là phương án tối ưu để khuếch đại sóng tắt dần, từ đó cải thiện hiệu suất và khoảng cách truyền dẫn của hệ thống WPT, cũng như đảm bảo các yêu cầu an toàn. Nhận định “chỉ cần sử dụng vật liệu MM là đủ để có thể tăng cường hiệu suất truyền dẫn của hệ thống WPT một cách hiệu quả thay vì sử dụng vật liệu NIM” lần đầu tiên được thể hiện trong nghiên cứu của Urzhumov và Smith [64].

Năm 2011, Urzhumov và Smith đã thực hiện nghiên cứu lý thuyết về việc sử dụng vật liệu biến hóa để tăng cường sự ghép cặp giữa hai lưỡng cực từ giúp truyền năng lượng không dây hiệu quả [64]. Hai ông đã xuất phát từ cơ sở lý thuyết: trong trường gần của ăng-ten lưỡng cực từ, có thể tách riêng thành phần điện trường và từ trường. Tuy nhiên thành phần từ trường được chứng minh ít tương tác với các đối tượng sinh học và các đối tượng khác trong môi trường. Vì vậy sự ghép cặp cảm ứng không bức xạ giữa các mạch tần số cao trong vùng trường gần của các ăng-ten lưỡng cực từ là một lựa chọn hấp dẫn cho các ứng dụng WPT. Trên cơ sở lý thuyết đó, hai ông đã đề xuất một hệ thống WPT có cấu trúc gồm hai lưỡng cực từ, phân tích mô hình mạch của mỗi ghép lưỡng cực từ và các yếu tố ảnh hưởng đến mỗi ghép đó, cũng như tính toán ảnh hưởng của chúng đến hiệu suất của hệ thống WPT khi sử dụng tấm vật liệu biến hóa. Các kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng: hệ thống WPT gồm hai cuộn có trục vuông góc với bề mặt tấm vật liệu biến hóa sẽ cho hiệu suất của hệ thống cao hơn; đồng thời với hệ thống WPT này, trường hợp tấm vật liệu MM cho hiệu suất cao hơn trường hợp tấm vật liệu biến hóa có độ điện thẩm âm.

Kế thừa nghiên cứu của Urzhumov và Smith, năm 2012, Huang và cộng sự đã khảo sát bằng phương pháp số việc sử dụng vật liệu MM để tăng cường WPT giữa

hai cuộn dây mang dòng điện [65]. Do khoảng cách giữa cuộn phát và cuộn thu rất nhỏ so với bước sóng nên sự phân bố trường liên quan là bán tĩnh và sự ghép cặp cảm ứng giữa hai cuộn dây chủ yếu liên quan đến lượng từ thông sinh ra từ cuộn phát và truyền qua cuộn thu. Nâng cao hiệu suất ghép cặp giữa hai cuộn tương đương với việc điều chỉnh sự phân bố trường này, có nghĩa là tập trung hoặc kiểm soát các trường gần. Tấm vật liệu MM được chứng minh có khả năng tập trung từ thông vào cuộn thu, do đó làm tăng sự ghép cặp cảm ứng lẫn nhau giữa các cuộn thu/phát. Mô hình số của Huang đã được so sánh với phân tích lý thuyết của Urzhumov và Smith (2011) mà coi các cuộn dây là các lưỡng cực điểm được phân tách bằng một lớp vật liệu từ tính phẳng vô hạn. Kết quả so sánh chỉ ra rằng: trong giới hạn bán kính cuộn dây cực kỳ nhỏ và chiều rộng của tấm vật liệu biến hóa lớn, các mô phỏng số của Huang hoàn toàn phù hợp với mô hình phân tích của Urzhumov và Smith. Cả mô hình phân tích lý tưởng hóa và mô hình mô phỏng thực tế đều dự đoán các xu hướng tương tự đối với tổn thất của vật liệu biến hóa và tính dị hướng. Sau khi xác nhận sự phù hợp giữa mô phỏng và lý thuyết, áp dụng các mô hình số, Huang đã xem xét các dạng hình học thực tế hơn, nghiên cứu thêm ảnh hưởng của kích thước cuộn dây hữu hạn, chiều rộng tấm hữu hạn, tổn thất và tính dị hướng của vật liệu. Các kết quả mô phỏng số chỉ ra rằng: ngay cả đối với những hình học ít lý tưởng này (kích thước cuộn dây và chiều rộng tấm đều hữu hạn) thì tấm vật liệu biến hóa từ tính vẫn giúp tăng cường đáng kể sự ghép cặp giữa hai cuộn dây, bao gồm cả các trường hợp có tổn hao đáng kể trong tấm. Do đó, Huang kết luận rằng việc tích hợp một tấm vật liệu MM vào hệ thống WPT hứa hẹn sẽ tăng hiệu suất tổng thể của hệ thống [69].

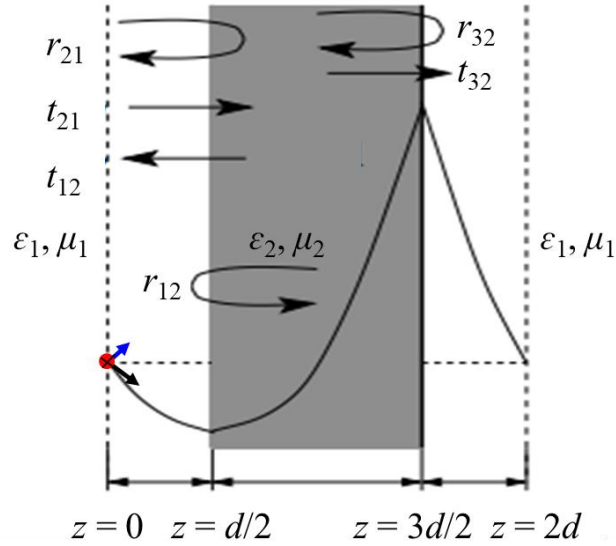
Như vậy, MR-WPT hoạt động dựa trên sự ghép cặp giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu thông qua từ trường tắt dần. Qua các nghiên cứu có thể hiểu, cơ chế tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM ở dải tần số MHz là dựa trên tương tác của từ trường tạo ra bởi các cuộn cộng hưởng với vật liệu MM. Cụ thể, vật liệu MM có khả năng khuếch đại từ trường tắt dần sẽ được chúng tôi phân tích làm rõ ở phần sau.

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

Xét một tấm vật liệu MM có độ dày d , độ điện thẩm và độ từ thẩm tương đối lần lượt là $\epsilon_2 = 1$ và $\mu_2 = -1$. Tấm MM được bao quanh bởi môi trường không khí với độ điện thẩm và độ từ thẩm tương đối là $\epsilon_1 = \mu_1 = 1$ (Hình 1.27). Coi rằng cần tính toán các trường tại $z = 2d$ (mặt phẳng ảnh) khi một nguồn được đặt tại $z = 0$ (mặt phẳng vật) trong môi trường không khí và hệ số truyền qua của tấm. Độ truyền qua và độ phản xạ của tấm MM được xác định [66]:

$$T = \frac{4\eta_1\eta_2 \exp(ik_{z2}d)}{(\eta_1 + \eta_2)^2 - (\eta_1 - \eta_2)^2 \exp(2ik_{z2}d)} \quad (1.26)$$

$$R = \frac{(\eta_1 - \eta_2)^2 \exp(2ik_{z2}d)}{(\eta_1 + \eta_2)^2 - (\eta_1 - \eta_2)^2 \exp(2ik_{z2}d)} \quad (1.27)$$



Hình 1.27. Sự khuếch đại từ trường tắt dần của vật liệu MM [70].

Xem xét hệ gồm vật liệu MM và môi trường trong hệ thống MR-WPT. Như đã biết, trong vùng trường gần, có thể coi điện trường và từ trường tách ra. Khi đó, môi trường hoạt động của hệ thống MR-WPT là thông qua từ trường, nên các thông số của môi trường có thể được tính toán tương tự với ánh sáng tới phân cực S. Khi đó η_1 và η_2 được xác định: $\eta_1 = k_{z1}/\mu_1$ và $\eta_2 = k_{z2}/\mu_2$ và $k_{z1} = \sqrt{\varepsilon_1\mu_1 k_0^2 - k_x^2}$ và $k_{z2} = -\sqrt{\varepsilon_2\mu_2 k_0^2 - k_x^2}$ với k_x, k_z lần lượt là các thành phần của vectơ sóng của ánh sáng theo phương x, z [66].

Xét trường hợp sóng tới là sóng lan truyền. Sóng tới này lan truyền từ môi trường không khí tới tấm MM ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$ và $\mu_2 = -\mu_1 = -1$). Khi đó, ta có $k_{z2} = -k_{z1}$, dẫn tới $\eta_1 = \eta_2$ và dựa vào biểu thức (1.26), (1.27) thu được độ truyền qua và phản xạ của tấm MM là:

$$T = \exp(-ik_{z1}d), \quad R = 0 \quad (1.28)$$

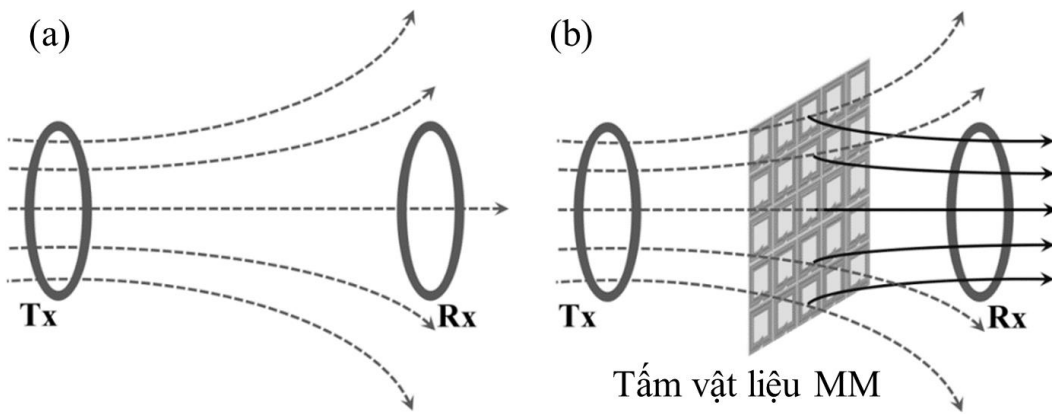
Do đó thu được:

$$E(z = 2d) = e^{ik_{z1}d/2} e^{-ik_{z1}d} e^{ik_{z1}d/2} E(z = 0) = E(z = 0)$$

Điều này cho thấy rõ ràng rằng tổng sự thay đổi pha khi truyền từ mặt phẳng vật (tại $z = 0$) tới mặt phẳng ảnh (tại $z = 2d$) bằng không, do đó thu được kết quả tương tự như kết quả thu được thông qua phân tích tia cơ bản.

Xét trường hợp sóng tới là từ trường tắt dần. Từ trường tắt dần này truyền từ môi trường không khí (ϵ_1, μ_1) có $k_{z1} = i\sqrt{k_x^2 - \epsilon_1\mu_1k_0^2} = i\kappa_z$. Khi đó, ta có $k_{z2} = k_{z1}$, dẫn tới $\eta_1 = -\eta_2$ và dựa vào biểu thức (1.26), (1.27) thu được hệ số truyền qua và phản xạ của tấm MM là:

$$T = \exp(+\kappa_z d), \quad R = 0 \quad (1.29)$$



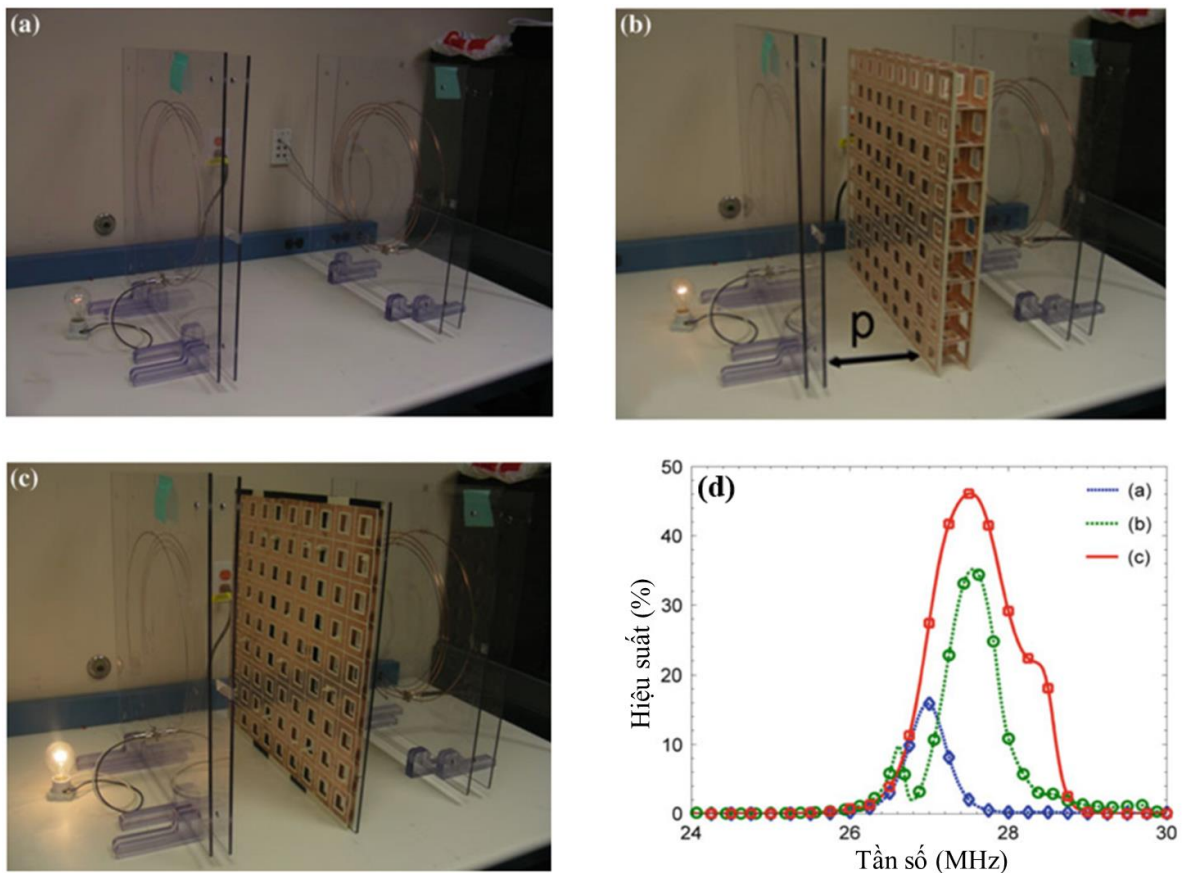
Hình 1.28. Sơ đồ nguyên lý cải thiện hiệu suất của hệ thống MR-WPT dựa trên vật liệu MM: (a) không sử dụng tấm vật liệu MM, (b) sử dụng tấm vật liệu MM [67].

Kết quả thu được có nghĩa tấm vật liệu MM làm tăng theo cấp số nhân biên độ của từ trường tắt dần với cùng tốc độ mà chúng phân rã trong không gian. **Hình 1.28** minh họa sự giải thích bằng sơ đồ cho nguyên lý cải thiện hiệu suất của hệ thống MR-WPT dựa trên vật liệu MM [1], [68]. **Hình 1.28(a)** minh họa một hệ thống WPT cơ bản với cuộn cộng hưởng phát Tx và cuộn cộng hưởng thu Rx. Từ trường tạo ra bởi cuộn Tx được thể hiện bởi các đường sức từ thông của nó đối xứng quanh trục của cuộn Tx. Một vấn đề là Rx không thể thu được tất cả từ thông do Tx tạo ra, dẫn tới hiệu suất của hệ thống này giảm đáng kể khi Rx di chuyển ra xa Tx. Trong **Hình 1.28(b)**, một tấm vật liệu MM có khả năng khuếch đại từ trường tắt dần hay có thể tập trung hiệu quả các đường sức từ thông về phía Rx, do đó cải thiện hiệu suất của hệ thống MR-WPT.

Như vậy, thông thường, trong không khí, từ trường tắt dần khi khoảng cách truyền dẫn tăng. Tuy nhiên, trong hệ thống thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM, hệ thống hoạt động dựa trên sự ghép cặp từ trường tắt dần giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu. Ở phạm vi kích thước hệ thống nhỏ hơn nhiều lần so với bước sóng hoạt động, từ trường tắt dần này được khuếch đại khi đi qua môi trường vật liệu MM. Do đó, đặc tính khuếch đại từ trường tắt dần của vật liệu MM chính là cơ chế giúp tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM hoạt động ở dải tần số MHz.

c) Vai trò của vật liệu MM đối với hệ thống MR-WPT ở dải tần số MHz

* Tăng cường hiệu suất truyền dẫn



Hình 1.29. Thí nghiệm WPT với bóng đèn công suất 40 W: (a) hệ thống ban đầu, (b) hệ thống với vật liệu biến hóa 3-D, (c) hệ thống với vật liệu biến hóa dị hướng và (d) so sánh hiệu suất truyền tải đối với ba cấu hình [13].

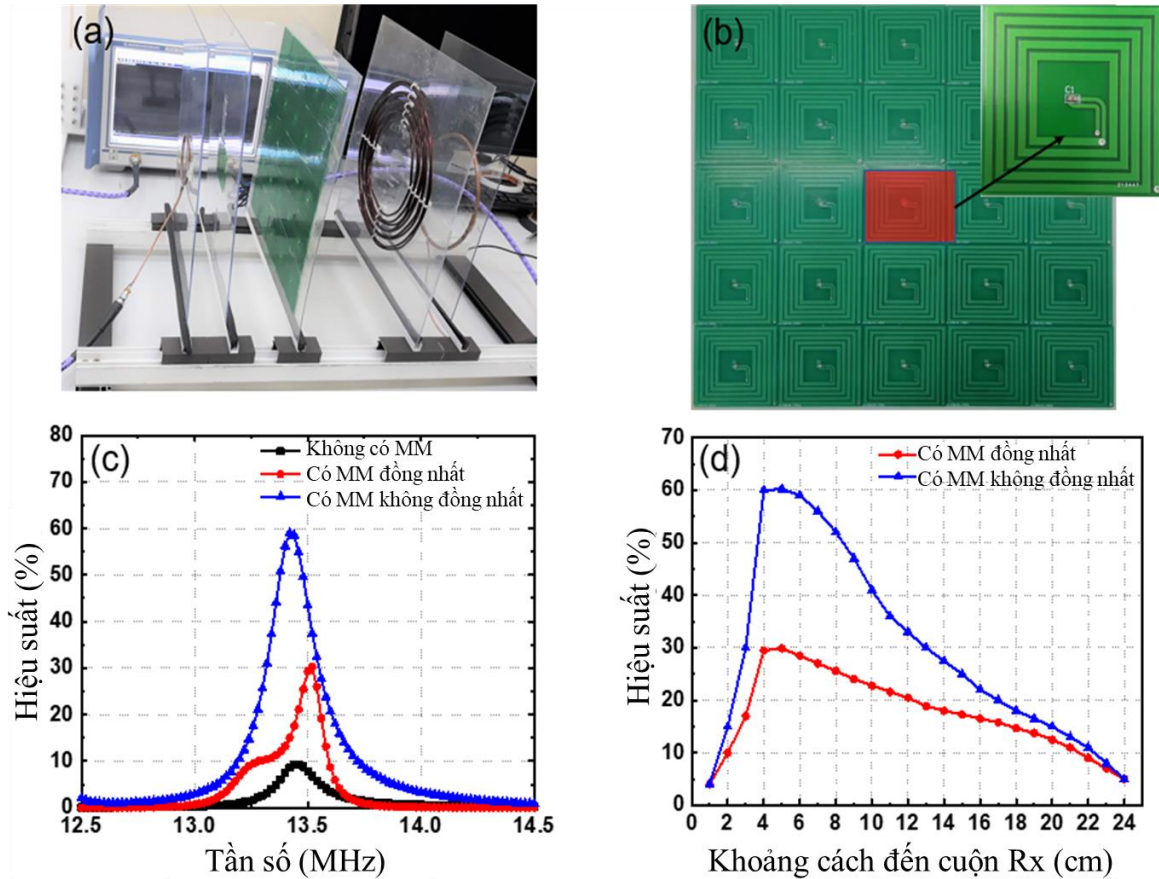
Hiệu suất truyền dẫn là một trong những thông số quan trọng của hệ thống MR-WPT. Nhiều nghiên cứu sử dụng vật liệu biến hóa để tăng hiệu suất của hệ thống MR-WPT đã được thực hiện. Wang và cộng sự đã tiến hành thí nghiệm đầu tiên sử dụng vật liệu biến hóa trong hệ thống MR-WPT [69].

Trong nghiên cứu của Wang, tấm vật liệu biến hóa được đề xuất gồm 9×9 ô cơ sở trong một mặt phẳng và có tổng kích thước là $58,5 \times 58,5 \text{ cm}^2$ [13]. Hình 1.29(a) cho thấy hệ thống MR-WPT ban đầu ở khoảng cách 50 cm. Hiệu suất tối đa cho cấu hình này là khoảng 17%, như được thể hiện trong Hình 1.29(d). Hình 1.29(b) và Hình 1.29(c) lần lượt minh họa cấu trúc vật liệu biến hóa 3-D và tấm vật liệu biến hóa dị hướng được đặt vào giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu của hệ thống MR-WPT. Trong các cấu hình này, hiệu suất tối đa của hệ thống đạt 35% đối với cấu trúc vật liệu biến hóa 3-D và đạt 47% đối với tấm vật liệu biến hóa dị hướng. Trong thiết kế này, sự cải thiện hiệu suất truyền dẫn được giải thích là do sự khuếch đại từ trường tắt dần của cấu trúc vật liệu biến hóa đặt giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu. Từ trường tạo ra từ cuộn phát chủ yếu có hướng dọc theo trục của cuộn dây. Do đó, sử dụng tấm vật liệu biến hóa dị hướng có độ từ thẩm âm theo hướng này sẽ hiệu quả hơn so với cấu trúc vật liệu biến hóa 3-D.

Cấu trúc vật liệu biến hóa có thể áp dụng cho hệ thống WPT với nhiều cấu hình khác [1]. Trong [58], vị trí của tấm MM để đạt được hiệu suất truyền dẫn tối ưu đã được khảo sát. Các ô cơ sở MM được coi là các nguyên tử vật liệu biến hóa nhỏ hơn nhiều lần bước sóng. Một hệ thống WPT dựa trên vật liệu biến hóa đạt được hiệu suất truyền tải cao 85,2% ở vị trí ghép cặp tới hạn đã được đề xuất bởi Chen và cộng sự [70]. Một hệ thống WPT tầm trung không đối xứng với vật liệu biến hóa có cuộn phát và cuộn thu khác nhau đã được phát triển bởi Zeng và cộng sự [71]. Nhiều cách tiếp cận khác để sử dụng cấu trúc MM đã được thực hiện để mở rộng khả năng ứng dụng của hệ thống WPT.

Một hệ thống WPT không đối xứng với tấm vật liệu biến hóa không đồng nhất đã được thiết kế bởi Pham và cộng sự [72]. Hình 1.30(a),(b) cho thấy hệ thống WPT không đối xứng và tấm vật liệu biến hóa được xây dựng bởi 5×5 ô cơ sở. Tổng kích thước của tấm MM là $25 \times 25 \text{ cm}^2$ và khoảng cách giữa cuộn phát và cuộn thu là 20 cm. Các hiệu suất đo được của WPT ở ba cấu hình khác nhau (không có tấm MM, với tấm MM đồng nhất và với tấm MM không đồng nhất) được thể hiện trong Hình 1.30(c). Hiệu suất lớn nhất của ba cấu hình này lần lượt là 9,8%, 29% và 60,2%. Các kết quả chứng minh rằng tấm MM không đồng nhất có khả năng tăng cường hiệu suất của hệ thống WPT không đối xứng lên gấp hai lần so với tấm MM đồng nhất. Sự phụ thuộc của hiệu suất truyền tải vào vị trí của tấm MM được khảo sát và minh họa trong Hình 1.30(d). Với vị trí cách cuộn thu 4 cm cho phép thu được hiệu suất tối đa đối với cả hệ thống sử dụng tấm MM đồng nhất và hệ thống sử dụng tấm MM không

đồng nhất. Sự ghép cặp bị giảm khi khoảng cách giữa cuộn thu và tấm MM lớn hơn 4 cm và trở nên quá ghép cặp ở những khoảng cách ngắn hơn.

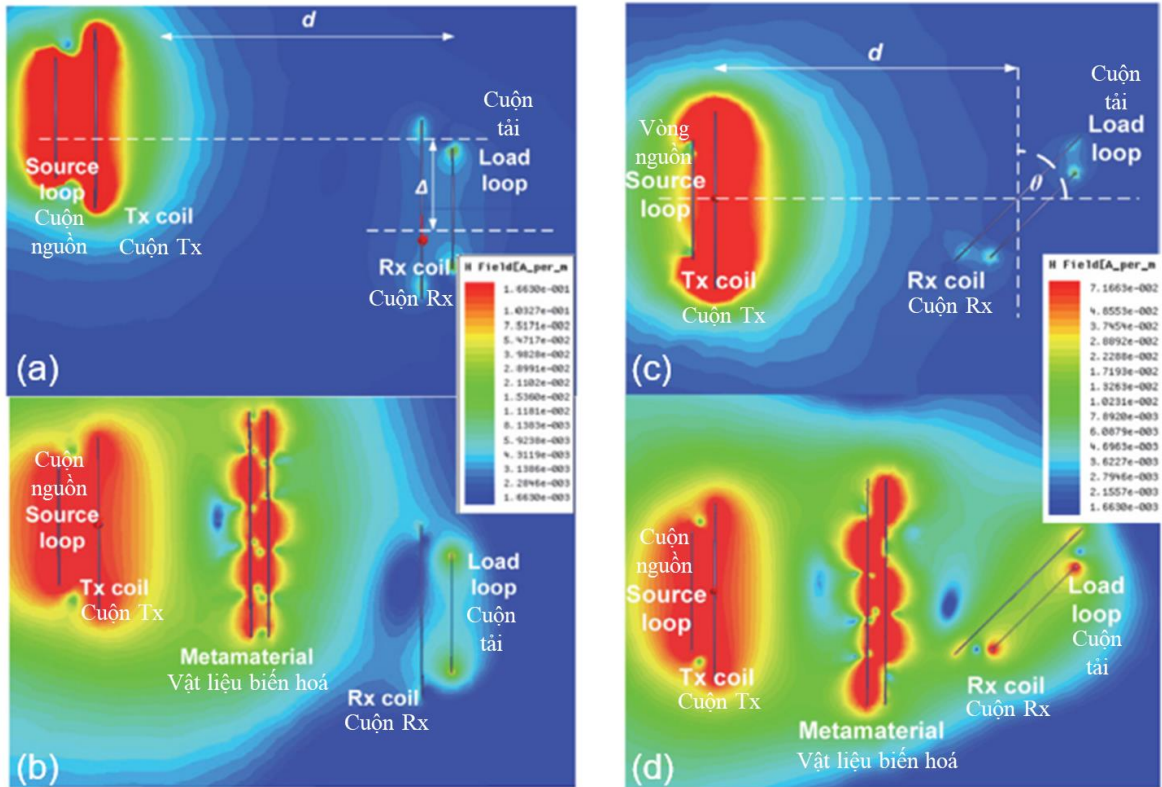


Hình 1.30. (a) Hệ thống MR-WPT không đối xứng, (b) tấm vật liệu MM gồm 5×5 ô cơ sở, (c) hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT không đối xứng với các cấu hình khác nhau, (d) hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM đồng nhất và tấm vật liệu MM không đồng nhất theo khoảng cách từ tấm vật liệu MM đến cuộn cộng hưởng thu Rx [72].

* Bù đắp sự sai lệch

Sự sai lệch giữa cuộn Tx và cuộn Rx là một yếu tố quan trọng quyết định hiệu suất của một hệ thống WPT. Sự sai lệch bên hoặc sai lệch góc làm giảm đáng kể hiệu suất truyền dẫn của hệ thống [73]. Vật liệu biến hóa là một ứng cử viên tiềm năng để bù đắp cho sự suy giảm do sai lệch trong hệ thống WPT [71]. *Hình 1.31* cho thấy sự phân bố trường H ở tần số hoạt động 6,6 MHz của hệ thống WPT khi không có và khi có tấm MM đối với sai lệch bên 30 cm và sai lệch góc 45° với khoảng cách truyền dẫn $d = 100$ cm. Các kết quả chỉ ra rằng tấm MM cho phép sự ghép cặp của sóng tắt dần, dẫn đến sự gia tăng trong ghép cặp từ tính giữa cuộn Tx và cuộn Rx của hệ thống WPT. Các mô phỏng và thực nghiệm trong [74] cho thấy tấm MM có thể bù đắp cho

ảnh hưởng của sự sai lệch tới hiệu suất truyền dẫn. Đối với sai lệch bên 30 cm, hiệu suất truyền dẫn khi không có và khi có tấm MM lần lượt là 19% và 50%, tương ứng với sự tăng hiệu suất 31%. Đối với sai lệch góc 45° , hiệu suất truyền dẫn tăng thêm 30,9% khi sử dụng tấm MM.

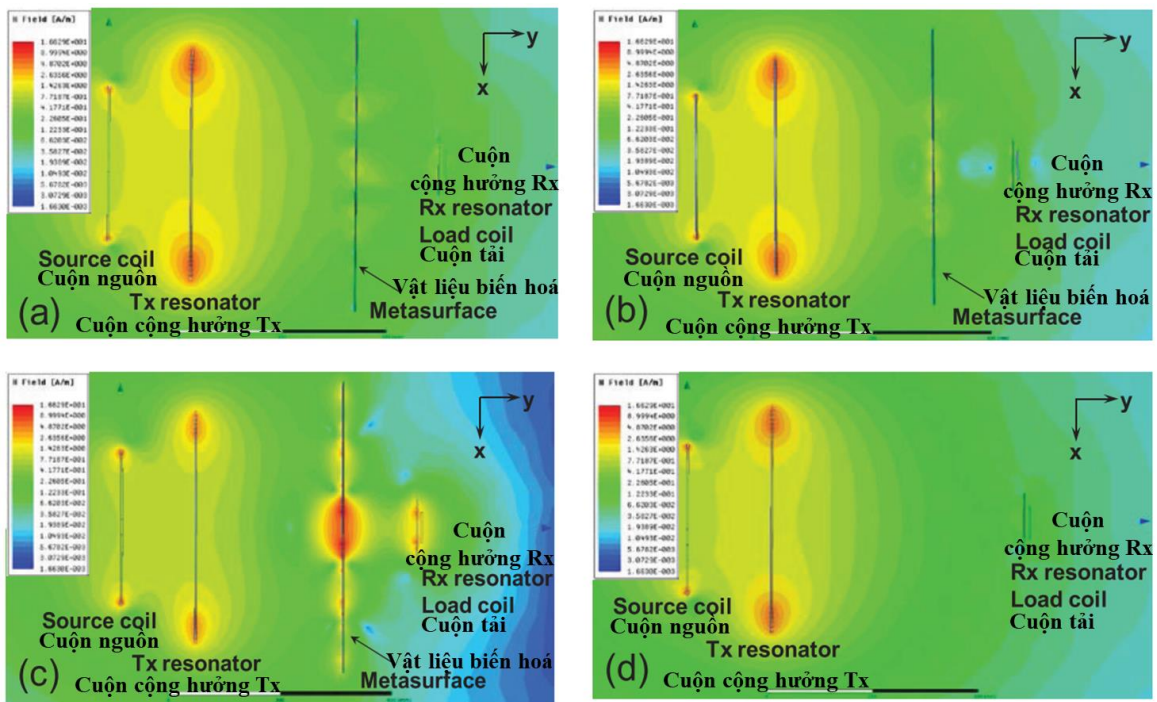


Hình 1.31. Phân bố trường H trong hệ thống WPT khi cuộn Tx và cuộn Rx bị lệch: (a) hệ thống WPT ban đầu với sự lệch bên, (b) hệ thống WPT khi có tấm MM với sự lệch bên, (c) hệ thống WPT ban đầu với sự lệch góc, (d) hệ thống WPT khi có tấm MM với sự lệch góc [74].

Wang và cộng sự cũng đã nghiên cứu cải thiện độ ổn định của hệ thống WPT có sai lệch bằng các tấm MM [75]. Hiệu suất của hệ thống WPT có thể được duy trì trên 45% khi xảy ra sai lệch. Trong khi đó, trong cùng điều kiện, hiệu suất truyền dẫn của hệ thống WPT giảm tới 30% khi lệch bên và nhỏ hơn 25% khi thay đổi góc. Tấm MM có thể điều khiển được giúp tăng cường hiệu suất truyền dẫn của hệ thống WPT bị sai lệch đã được đề xuất trong [76]. Những công trình này đã chứng minh rằng tấm MM có thể được ứng dụng để bù đắp ảnh hưởng của sự sai lệch đối với hệ thống WPT, do đó giúp tăng phạm vi ứng dụng của nó.

* Giảm rò rỉ từ trường – tăng độ an toàn

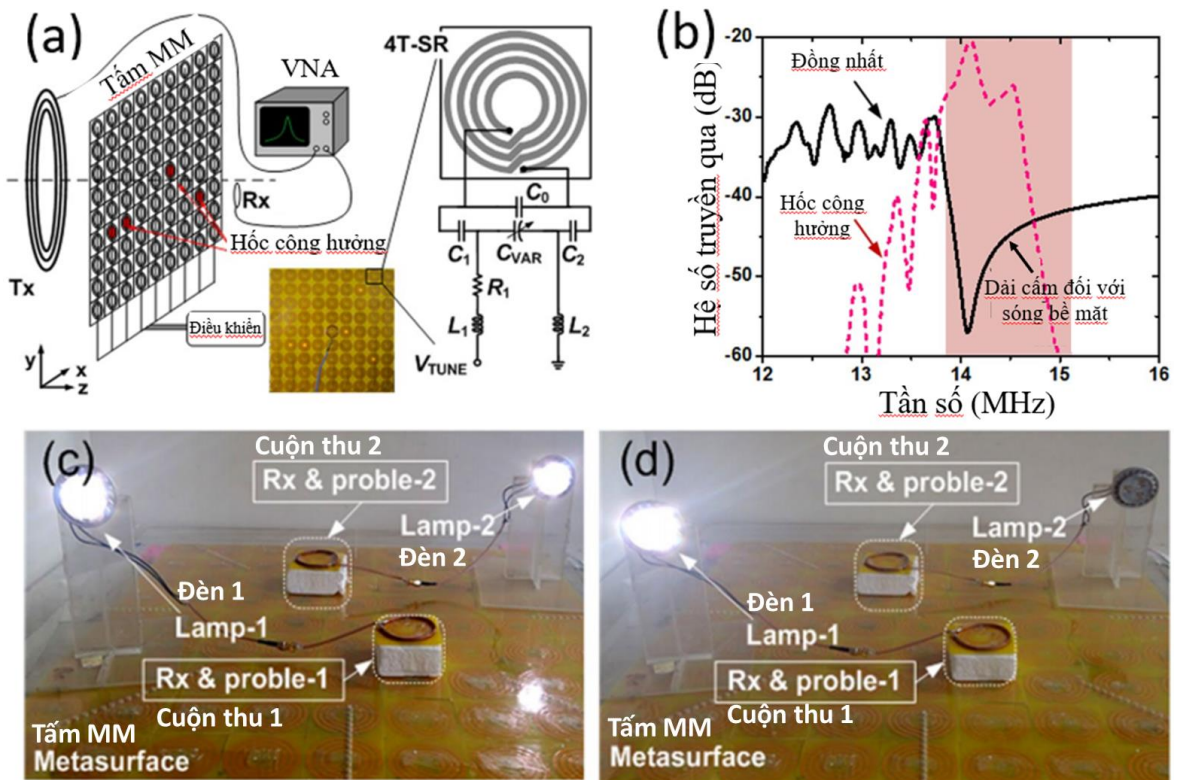
Hiệu suất truyền dẫn của hệ thống WPT phụ thuộc vào cường độ từ trường. Trường điện từ lớn tạo ra bởi hệ thống sạc không dây có thể ảnh hưởng đến các linh kiện điện tử và gây hại cho con người. Do đó, ô nhiễm trường điện từ cần được xem xét trong WPT. Một phương pháp hiệu quả là sử dụng vật liệu che chắn, chẳng hạn như các tấm kim loại. Tuy nhiên, việc che chắn với cấu trúc công kênh sẽ làm hệ thống trở nên nặng và không có tính thẩm mỹ. Để khắc phục nhược điểm này, cấu trúc MM đã được áp dụng cho hệ thống WPT để giảm trường rò rỉ với các cấu hình khác nhau. Lu và cộng sự đã sử dụng vật liệu biến hóa có độ từ thẩm gần bằng không để che chắn từ trường ở dải tần số 13,56 MHz [77].



Hình 1.32. Phân bố từ trường trong hệ thống WPT: (a) với tấm MM đồng nhất cộng hưởng ở $\omega_0 = 6,5$ MHz, (b) với tấm MM không đồng nhất cộng hưởng ở $1,1\omega_0$ ngoại trừ ô trung tâm, (c) với tấm MM không đồng nhất cộng hưởng ở $0,9\omega_0$ ngoại trừ ô trung tâm, (d) thông qua không khí [23].

Tấm MM đồng nhất với các hốc có thể định xứ từ trường trong một vùng nhỏ và triệt tiêu từ trường ở phần còn lại của tấm, do đó cải thiện hiệu suất WPT và giảm trường rò rỉ [23]. Hình 1.32 so sánh phân bố trường H ở tần số 6,5 MHz trong một hệ thống WPT với bốn cấu hình: Hình 1.32(a) với tấm MM đồng nhất cộng hưởng ở $\omega_0 = 6,5$ MHz, Hình 1.32(b) với tấm MM không đồng nhất cộng hưởng ở $1,1\omega_0$ ngoại trừ ô trung tâm, Hình 1.32(c) với tấm MM không đồng nhất cộng hưởng ở $0,9\omega_0$ ngoại trừ ô trung tâm, Hình 1.32(d) đối với hệ thống WPT ban đầu thông qua không

khí. Khi một tấm MM đồng nhất được đặt vào, các sóng bề mặt xuất hiện trên tấm MM do sự lan truyền ống dẫn sóng cảm ứng từ, chỉ ra rằng tấm MM làm tăng cường độ trường H xung quanh cuộn thu. Khi một tấm MM không đồng nhất được đặt vào, một hốc cộng hưởng được hình thành, do đó trường H bị dập tắt hoặc tăng cường ở tần số cộng hưởng ban đầu tùy thuộc vào tần số cộng hưởng của ô cơ sở MM trong tấm, ngoại trừ ô trung tâm luôn cộng hưởng ở 6,5 MHz. Trong trường hợp hốc cộng hưởng được thiết kế, chúng tôi quan sát thấy cường độ trường H rất mạnh tại vị trí hốc. Trường H được giới hạn trong một khu vực nhỏ xung quanh khu vực hốc cộng hưởng, dẫn đến cải thiện đáng kể hiệu suất truyền năng lượng không dây.

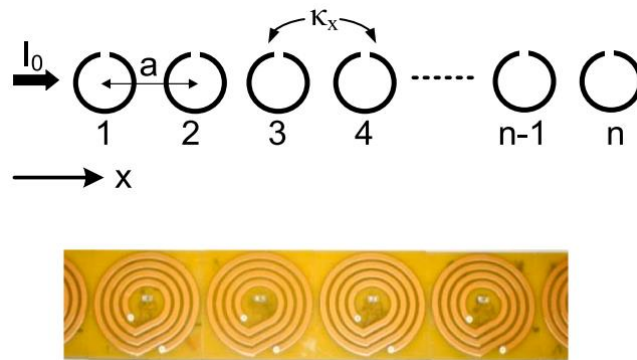


Hình 1.33. (a) Sơ đồ và ảnh của bề mặt vật liệu biến hóa với ô cơ sở điều khiển được, (b) sự truyền trong hai trường hợp: bề mặt vật liệu biến hóa đồng nhất và không đồng nhất, (c) hai bộ thu đèn led trên bề mặt vật liệu biến hóa, (d) bộ thu được lựa chọn duy nhất [78].

Một bề mặt vật liệu biến hóa hoạt động được xây dựng từ các ô cơ sở có thể điều khiển tần số cộng hưởng đã được thiết kế bởi Ranaweera và cộng sự, như thể hiện trong Hình 1.33 [78]. Bề mặt vật liệu biến hóa có khả năng điều khiển này có thể được áp dụng cho WPT để điều khiển sự định xứ từ trường trong các khu vực lựa chọn và triệt tiêu từ trường ở phần còn lại của bề mặt vật liệu biến hóa. Bề mặt vật liệu biến hóa gồm 9×9 dãy các ô cơ sở mà được điều khiển riêng bằng một mạch

điều khiển được nhúng ở mặt sau, như được thể hiện trong [Hình 1.33\(a\)](#). Sự truyền dẫn của các bề mặt biến hóa đồng nhất và không đồng nhất được minh họa trong [Hình 1.33\(b\)](#), giải thích cơ chế hoạt động của hốc cộng hưởng. Hốc cộng hưởng là một ô cơ sở có tần số cộng hưởng nằm trong dải băng tần lai hóa của bề mặt vật liệu biến hóa. [Hình 1.33\(c\),\(d\)](#) cho thấy các kết quả thí nghiệm với việc sử dụng bề mặt biến hóa hoạt động và hai đèn LED. Sử dụng mạch điều khiển, vị trí hốc cộng hưởng có thể được chọn để điều khiển liên kết nguồn không dây.

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



[Hình 1.34](#). Sơ đồ và ảnh của dây các phân tử ghép nối cộng hưởng từ [79].

Vật liệu MM có thể hỗ trợ quá trình lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc của nó, mà sự lan truyền năng lượng từ trường đó được tạo ra do sự ghép cặp giữa các ô cơ sở sắp xếp theo một trật tự nhất định [80], [81]. Các hiện tượng vật lý khác nhau liên quan đến sự lan truyền năng lượng từ trường chẳng hạn như khúc xạ âm, lan truyền ngược đã được nghiên cứu bởi Syms và cộng sự [82]. Minh họa đơn giản nhất cho sự lan truyền năng lượng từ trường là thiết kế của một dây hữu hạn các vòng dây gắn tụ điện, như thể hiện trong [Hình 1.34](#) [79].

Bằng cách áp dụng định luật điện áp của Kirchhoff cho các vòng dây cộng hưởng ghép cặp từ tính với giả thiết chỉ xét sự ghép cặp giữa các vòng dây lân cận gần nhất, khi đó thu được phương trình tán sắc đối với sự lan truyền năng lượng từ trường có dạng [83]:

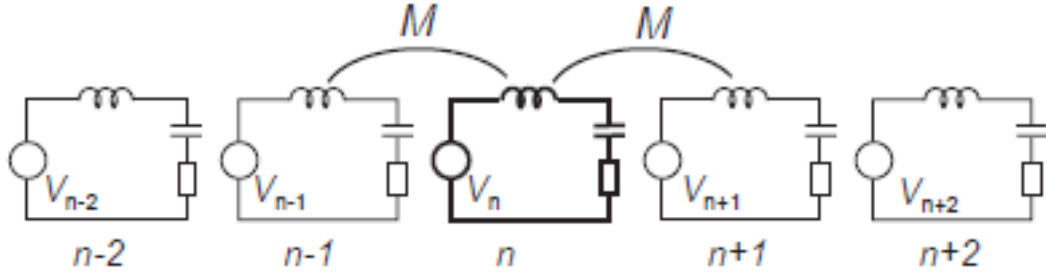
$$\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + \frac{2M}{L} \cos(\gamma a)}} \quad (1.30)$$

trong đó: ω_0 là tần số cộng hưởng, L là độ tự cảm, M là hệ số hỗ cảm, γ là vectơ lan truyền năng lượng từ trường.

Đồng thời cũng xác định được mối quan hệ giữa các dòng điện trong các vòng dây trên đường lan truyền năng lượng từ trường có dạng:

$$Z_0 I_n + i\omega M (I_{n-1} + I_{n+1}) = 0 \quad (1.31)$$

trong đó Z_0 là trở kháng riêng của mỗi vòng dây và I_n là dòng điện trong vòng dây thứ n như chỉ ra trong [Hình 1.35](#).



[Hình 1.35](#). Mạch tương đương của chuỗi các vòng dây gắn tụ điện.

Xét trường hợp tổng quát [84], các vòng dây đều có tổn hao Ohmic (đặc trưng bởi điện trở R), khi đó trở kháng riêng của mạch LC tương đương có dạng:

$$Z_0 = i\omega L + \frac{1}{i\omega C} + R \quad (1.32)$$

Dòng điện I_n của phần tử thứ n trong chuỗi được xác định theo công thức:

$$I_n = I_1 e^{-i\gamma n a} \quad (1.33)$$

γ là hằng số truyền dẫn phức và được xác định bởi:

$$\gamma = \beta - i\alpha \quad (1.34)$$

trong đó β và α lần lượt là hằng số truyền dẫn và hệ số suy hao trên mỗi đơn vị chiều dài. Khi đó, phương trình tán sắc (1.30) có thể được tách thành phần thực và phần ảo như sau:

$$1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} + k \cos(\beta a) \cosh(\alpha a) = 0 \quad (1.35)$$

$$\frac{1}{Q} - k \sin(\beta a) \sinh(\alpha a) = 0 \quad (1.36)$$

trong đó k là hệ số ghép cặp giữa hai phần tử lân cận của chuỗi và bằng $2M/L$; Q là hệ số phẩm chất của các phần tử trong chuỗi và bằng $\omega L/R$.

Do tổn hao thấp trong ô cơ sở MM, mỗi phần tử đạt được hệ số phẩm chất rất cao. Nếu hệ số suy hao α đủ nhỏ hay hệ số phẩm chất Q đủ lớn thì:

$$\cosh(\alpha a) = 1, \sinh(\alpha a) = \alpha a \quad (1.37)$$

Hằng số lan truyền β có thể được tính dựa trên tần số góc ω như sau:

$$\beta = \frac{1}{a} \arccos \frac{(\omega_0^2 / \omega^2 - 1)}{k} \quad (1.38)$$

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:

$$\alpha = \frac{1}{a} \frac{1}{kQ \sin(\beta a)} \quad (1.39)$$

Thực sự có thể mong đợi rằng: hệ số suy hao α giảm khi hệ số ghép cặp k giữa các phần tử trên đường truyền dẫn và hệ số phẩm chất Q của các phần tử tăng lên. Sự phụ thuộc vào βa cũng có thể được dự đoán trước, hệ số suy hao sẽ nhỏ nhất ở tần số cộng hưởng và sẽ tăng ở biên dải – vị trí mà $\beta a = 0$ hoặc $\beta a = \pi$. Tuy nhiên, phép tính gần đúng bị phá vỡ ngay tại biên dải, kết quả chính xác có thể thu được bằng cách giải phương trình (1.35) và (1.36).

1.4. Kết luận chương 1

Qua nghiên cứu tổng quan về quá trình hình thành và phát triển của hệ thống WPT cũng như nghiên cứu vật liệu biến hóa có khả năng ứng dụng trong WPT ở dải tần số MHz, chúng tôi rút ra một số kết luận sau:

WPT có lịch sử hình thành hơn một thế kỷ, tuy nhiên mới chỉ phát triển trong khoảng 20 năm trở lại đây. Trong các loại hệ thống WPT, WPT trường gần, đặc biệt là MR-WPT được chứng minh có tiềm năng ứng dụng to lớn trong nhiều lĩnh vực như thiết bị dân dụng, thiết bị điện tử đeo, thiết bị y tế cấy ghép. Tuy nhiên, hiện nay các hệ thống MR-WPT vẫn tồn tại một số hạn chế về khoảng cách, hiệu suất truyền dẫn và khả năng điều chỉnh linh hoạt.

Hệ thống MR-WPT hoạt động dựa trên nguyên lý cơ bản là sự ghép cặp từ trường giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu. Vật liệu biến hóa, đặc

biệt vật liệu MM được chứng minh có khả năng ứng dụng trong hệ thống WPT trường gần nói chung và hệ thống MR-WPT nói riêng do đặc tính khuếch đại từ trường tắt dần phát ra từ cuộn cộng hưởng phát. Trên cơ sở đó, vật liệu MM sử dụng trong MR-WPT có thể giúp khắc phục các vấn đề còn tồn tại trong hệ thống này. Tuy nhiên, các vật liệu MM đã và đang được nghiên cứu ứng dụng trong hệ thống MR-WPT hầu hết có cấu hình phẳng, làm từ chất nền cứng và có tính chất đồng nhất nên hạn chế trong các ứng dụng đòi hỏi khả năng điều chỉnh linh hoạt như cuộn, gấp, uốn cong hay dẫn hướng năng lượng.

Từ các kết luận trên, trước tiên chúng tôi nghiên cứu khảo sát các tham số của hệ thống MR-WPT cơ bản, tiếp theo tập trung nghiên cứu chế tạo vật liệu MM ứng dụng trong truyền dẫn năng lượng không dây ở dải tần số MHz. Cụ thể, nghiên cứu chế tạo cấu trúc vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp ứng dụng trong tăng cường hiệu suất hệ thống MR-WPT và nghiên cứu chế tạo các cấu trúc vật liệu MM linh hoạt có từ trường định xứ do thiết kế hốc cộng hưởng nhằm tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT và tăng cường lan truyền năng lượng trong cấu trúc vật liệu.

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Qua nghiên cứu tổng quan ở chương 1, chúng tôi xác định đề nghiên cứu vật liệu biến hoá ứng dụng trong WPT ở dải tần số MHz, chúng tôi tập trung nghiên cứu vật liệu MM do vật liệu này được chứng minh có khả năng sử dụng để tăng cường hiệu suất, khoảng cách truyền dẫn và tiềm năng ứng dụng của hệ thống MR-WPT. Để nghiên cứu vật liệu MM ứng dụng trong hệ thống MR-WPT ở dải tần số MHz, chúng tôi sử dụng các phương pháp nghiên cứu bao gồm: tính toán lý thuyết và mô hình hóa, mô phỏng, thực nghiệm. Các phương pháp này là những phương pháp đã được cộng đồng các nhà khoa học trong nước và quốc tế sử dụng rộng rãi, đồng thời đã được nhóm nghiên cứu tại Viện Khoa học vật liệu kế thừa và phát triển thành những kỹ thuật độc đáo, có độ tin cậy cao. Như trình bày trong **Hình 2.1**, các phương pháp nghiên cứu này được thực hiện độc lập nhưng cũng có sự phối hợp, so sánh đối chiếu để khẳng định kết quả nghiên cứu thu được là chính xác.



Hình 2.1. Phương pháp nghiên cứu vật liệu MM ứng dụng trong WPT ở dải tần số MHz.

Cụ thể, xuất phát từ trung tâm là các ý tưởng vật lý, tương tác của sóng điện từ với cấu trúc vật liệu MM được mô hình hóa dưới dạng các mạch cộng hưởng LC nhằm xác định tần số cộng hưởng từ. Trên cơ sở mô hình hóa vật liệu MM, các thành phần và toàn bộ hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM lần lượt được mô hình hóa bằng các mạch LC tương đương và một hệ gồm các phần tử là các mạch LC tương đương, từ đó giúp tính toán được tần số hoạt động và hiệu suất của hệ thống. Độc lập với quá trình tính toán lý thuyết và mô hình hóa là quá trình mô phỏng để thu được các đặc tính của sóng điện từ khi đi qua vật liệu MM như phổ truyền qua, phổ phản xạ, pha; đồng thời cũng cho phép xác định tần số hoạt động và hiệu suất của hệ thống MR-WPT. Để kiểm

nghiệm được các kết quả tính toán lý thuyết, kết quả mô phỏng, chúng tôi tiến hành thực nghiệm chế tạo và đo đạc các đặc trưng của các thành phần trong hệ thống cũng như toàn bộ hệ thống MR-WPT. Các kết quả thực nghiệm thu được được so sánh đối chiếu với kết quả tính toán lý thuyết và kết quả mô phỏng để khẳng định tính đúng đắn của quá trình nghiên cứu. Quy trình nghiên cứu này giúp kết quả thu được có độ chính xác và tin cậy, được cộng đồng nghiên cứu quốc tế đánh giá cao.

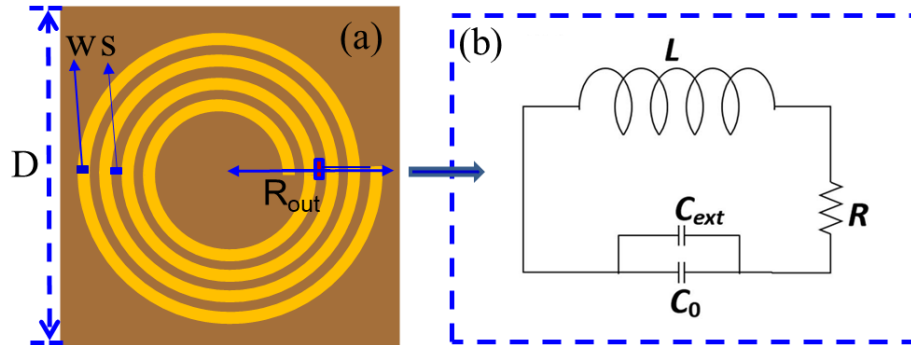
2.1. Phương pháp tính toán lý thuyết và mô hình hóa

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

Trong nghiên cứu vật liệu biến hoá ứng dụng trong WPT, chúng tôi tập trung nghiên cứu vật liệu MM ứng dụng cho hệ thống MR-WPT ở dải tần số MHz. Hệ thống MR-WPT bao gồm 4 cuộn: cuộn nguồn, cuộn cộng hưởng phát/thu và cuộn tải. Trong hệ thống này, cuộn cộng hưởng phát/thu là hai cấu trúc cộng hưởng ở cùng tần số được sử dụng nhằm tăng cường hiệu suất truyền dẫn. Để cải thiện hơn nữa hiệu suất cũng như khoảng cách truyền dẫn của hệ thống, vật liệu MM với cấu trúc cộng hưởng tương tự các cuộn cộng hưởng phát/thu được đưa vào hệ thống. Như vậy, hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM về cơ bản là một hệ thống gồm các thành phần có cấu trúc dạng cấu trúc ô cơ sở của vật liệu MM với các tham số có thể lựa chọn tùy ý, hoạt động ở cùng một tần số (ở dải tần số MHz thấp).

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng: dưới tác dụng của sóng điện từ, các cấu trúc ô cơ sở của vật liệu biến hoá nói chung và vật liệu MM nói riêng hoạt động như một bộ cộng hưởng. Để xác định được tính chất điện từ của vật liệu biến hoá một cách nhanh chóng, đơn giản và trực quan, trong nhiều trường hợp, phương pháp mô hình hóa cấu trúc của vật liệu biến hoá bằng một mạch điện LC tương đương được sử dụng và cho hiệu quả cao. Các thành phần điện từ trong cấu trúc của vật liệu biến hoá được mô hình hóa bằng các cuộn cảm (đặc trưng bởi độ tự cảm L) và tụ điện (đặc trưng bởi điện dung C). Trong thực tế, phần lớn các cấu trúc vật liệu biến hoá và vật liệu MM đều sử dụng các kim loại dẫn điện tốt như Cu, Ag, Au nên có điện trở nhỏ không đáng kể và thường được bỏ qua. Các giá trị độ tự cảm L và điện dung C tương ứng của các cuộn cảm và tụ điện phụ thuộc vào các tham số hình học của cấu trúc cũng như các tính chất điện từ của các vật liệu cấu thành. Khi đó, vật liệu biến hoá hoạt động tương ứng với mạch điện LC tại tần số cộng hưởng $\omega = 1/\sqrt{LC}$. Do đó, dựa vào mô hình mạch điện LC tương đương có thể xác định được gần như chính xác tần số cộng hưởng của vật liệu biến hoá nói chung và vật liệu MM nói riêng, đồng thời có thể dự đoán được tính chất điện từ và sự ảnh hưởng của các tham số hình học cấu trúc, tham số vật liệu của vật liệu biến hoá và vật liệu MM.

Để thu được vật liệu MM, xoắn ốc hình π là một trong những hình dạng độ cong đã được sử dụng để chế tạo MM trong các vùng quang phổ khác nhau. Tuy nhiên, cấu trúc này thường hoạt động ở tần số cộng hưởng cao nên để phù hợp trong ứng dụng WPT ở dải tần số MHz thấp, cấu trúc kết hợp gồm một cuộn xoắn ốc và một tụ điện gắn ngoài thường được sử dụng, cấu trúc kết hợp này hoạt động ở dải tần số MHz thấp và được chứng minh là có tiềm năng trong cải thiện hiệu suất cũng như khoảng cách truyền dẫn của hệ thống MR-WPT [58], [85].



Hình 2.2. Cấu trúc ô cơ sở vật liệu MM, mô hình mạch điện LC tương đương.

Các cấu trúc vật liệu MM được nghiên cứu, thiết kế, tính toán lý thuyết và mô hình hóa bằng phần mềm thiết kế hệ thống. Ô cơ sở của vật liệu MM được mô hình hóa bằng mạch điện LC tương đương như minh họa ở Hình 2.2. Từ đó, tần số cộng hưởng của các thành phần trong hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM (cuộn cộng hưởng phát/thu, ô cơ sở của vật liệu MM) có thể được tính theo biểu thức [86]:

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

Trong đó L và C_0 tương ứng là độ tự cảm hiệu dụng và điện dung hiệu dụng của mỗi cấu trúc thành phần, C_{ext} là tụ điện gắn ngoài để mỗi thành phần cũng như toàn bộ hệ thống MR-WPT hoạt động tại tần số mong muốn - dải tần số MHz thấp.

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

a) Hiệu suất của hệ thống MR-WPT

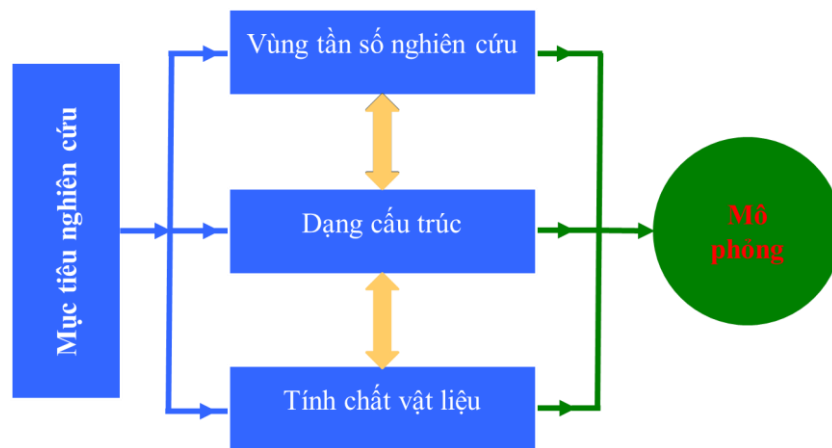
Hiệu suất truyền dẫn η của hệ thống MR-WPT được xác định và tính toán theo công thức (1.9) ở chương 1.

b) Độ từ thẩm của vật liệu MM

Như đã trình bày trong chương 1, độ điện thẩm và độ từ thẩm hiệu dụng của cấu trúc vật liệu biến hóa có thể thu được bằng phương pháp truy xuất thông số S . Tuy nhiên, trong trong nghiên cứu vật liệu MM, để đơn giản, độ từ thẩm hiệu dụng của vật liệu MM có thể tính toán theo kiểu cộng hưởng kiểu Lorentzian như đã được thể hiện bởi biểu thức (1.23) trong chương 1.

2.2. Phương pháp mô phỏng

Song song với phương pháp tính toán lý thuyết và mô hình hoá sử dụng mạch điện LC tương đương, phương pháp mô phỏng cũng được xem là một phương pháp hiệu quả trong nghiên cứu hệ thống WPT sử dụng vật liệu MM. Trong khi phương pháp tính toán lý thuyết và mô hình hoá cho phép xác định tần số cộng hưởng của vật liệu MM từ các thông số cấu trúc và vật liệu thành phần, xác định tần số hoạt động và hiệu suất của hệ thống WPT thì phương pháp mô phỏng cũng có tính định lượng rất cao. Phương pháp mô phỏng giúp xác định chính xác tần số hoạt động và giá trị của phổ truyền qua, phổ phản xạ cũng như phân bố dòng điện, phân bố điện từ trường trên miền tần số. Như vậy, kết quả của phương pháp mô phỏng có thể độc lập kiểm chứng với kết quả từ mô hình vật lý sử dụng mạch LC tương đương và đây là mảnh ghép quan trọng trong hệ thống các phương pháp nghiên cứu vật liệu MM ứng dụng trong MR-WPT ở dải tần số MHz.



Hình 2.3. Sơ đồ khối quá trình chuẩn bị các tham số đầu vào cho mô phỏng.

Các hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM được mô phỏng và tối ưu các tham số của hệ thống bằng phần mềm mô phỏng điện từ (Computer Simulation Technology Studio Suite – CST Studio Suite) được trang bị tại Học viện Khoa học và Công nghệ và Viện Khoa học vật liệu. Trong đó, các tính chất và tham số của cấu trúc vật liệu: (i) hệ số phẩm chất của ô cơ sở; (ii) hệ số ghép cặp của hai ô cơ sở phụ thuộc vào khoảng cách; (iii) đường cong tán sắc của năng lượng từ trường lan truyền trong cấu trúc đặc trưng cho khả năng lan truyền ngược; (iv) kích thước ô cơ sở tối

ưu để đạt được hiệu quả cao nhất cho sự giam giữ năng lượng từ trường trong hốc cộng hưởng sẽ được giải quyết. Quá trình mô phỏng vật liệu MM chính là giải bài toán tương tác của sóng điện từ với các cấu trúc MM vốn có thành phần vật liệu không đồng nhất (kim loại, điện môi) và có kích thước nhỏ hơn nhiều lần so với bước sóng hoạt động. Trong CST, kỹ thuật tích phân hữu hạn (Finite Integration Technique – FIT) là một trong những kỹ thuật tính toán hiệu quả đối với các đối tượng này. Bản chất của kỹ thuật FIT là biến đổi các phương trình Maxwell từ không gian liên tục thành không gian rời rạc. Hệ phương trình Maxwell có dạng như sau:

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

$$\oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \iiint_V \rho dV \quad (2.3)$$

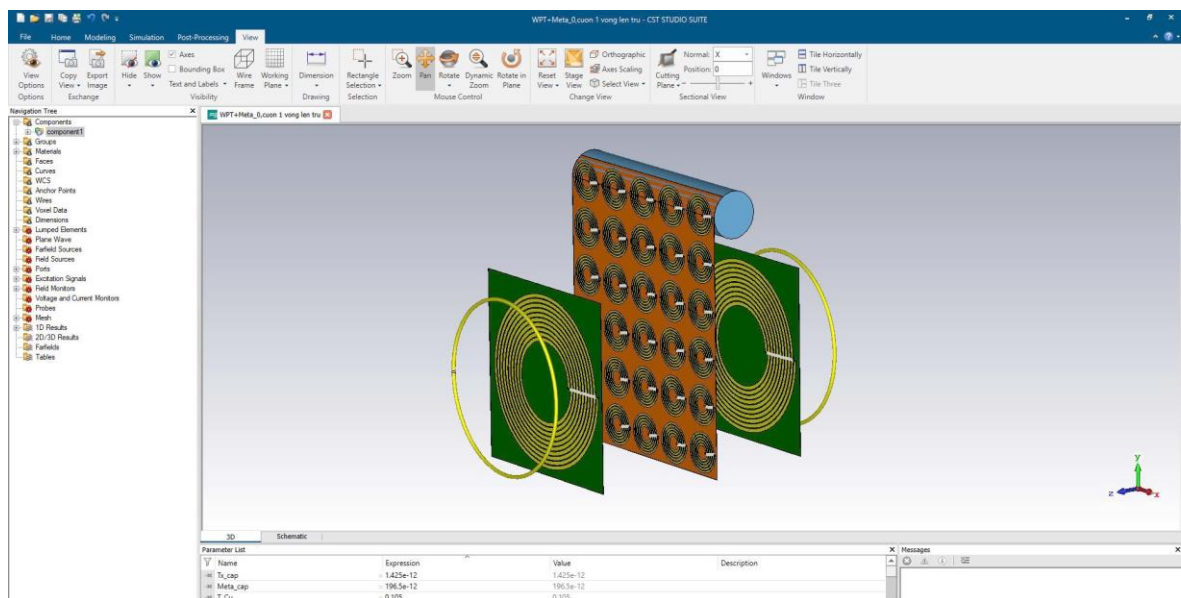
$$\oint_{(C)} \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) d\vec{S} \quad (2.4)$$

$$\oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (2.5)$$

Trong đó: $d\vec{l}$ là vi phân độ dài dọc theo đường cong (C), $d\vec{S}$ là vec tơ vi phân diện tích có hướng vuông góc mặt phẳng S và được giới hạn bởi đường cong kín (C), dV là vi phân của thể tích được bao bọc bởi mặt kín S .

Để giải các phương trình này, các cấu trúc không đồng nhất được chia nhỏ thành các vi phân cấu trúc đồng nhất. Điều này được thực hiện bằng cách tạo ra một hệ thống lưới phù hợp, từ đó chia tách miền lớn ra thành nhiều phần nhỏ (mesh point). Kỹ thuật tính toán này đã được đưa vào các phần mềm thương mại như CST, Ansys High-frequency Structure Simulator (HFSS), COMSOL Multiphysics, ... Trong đó, CST là một phần mềm được trang bị tại Học viện Khoa học và Công nghệ, và Viện Khoa học vật liệu, có thể mô phỏng và giải quyết tương đối trọn vẹn các bài toán tương tác điện từ ở tần số từ thấp đến cao. Để tối ưu hóa thời gian tính toán, CST cung cấp cho người sử dụng hai phương pháp chính là Transient Solver (T) và Frequency Domain Solver (F). Phương pháp (T) mô phỏng các đặc tính của cấu trúc đơn lập, không tuần hoàn bằng cách giải các phương trình Maxwell trong một vùng tần số rộng. Trong khi đó, sử dụng phương pháp (F) thích hợp hơn với bài toán cấu trúc nhỏ có tính tuần hoàn, ví dụ như vật liệu MM.

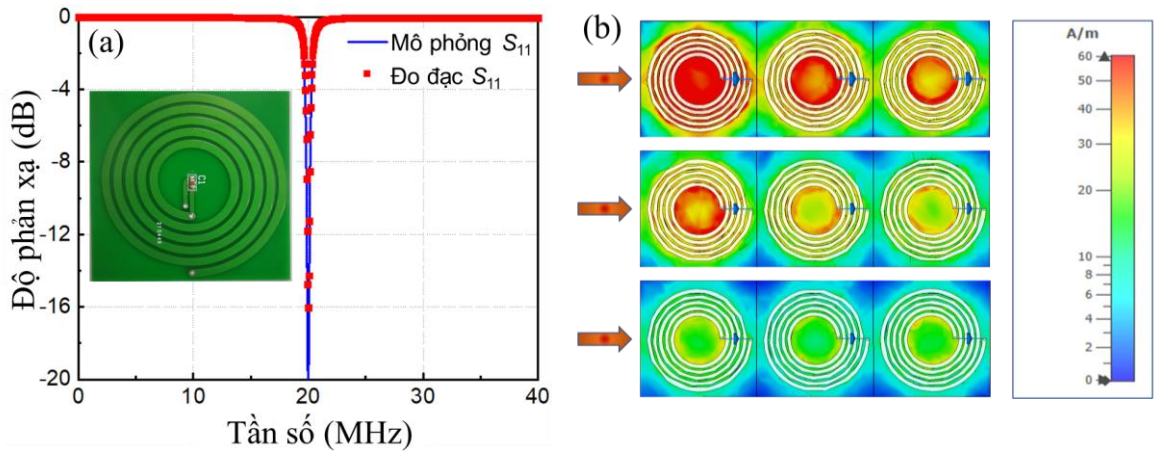
Một trong các bước quan trọng khi sử dụng phần mềm CST là thiết lập các tham số đầu vào cho mô phỏng và sơ đồ khối cho quá trình này được trình bày trong [Hình 2.3](#). Xuất phát từ mục tiêu là nghiên cứu vật liệu MM ứng dụng trong hệ thống MR-WPT ở dải tần số MHz, các yếu tố vùng tần số nghiên cứu, dạng cấu trúc, tính chất vật liệu cần được xem xét, xác định. Trong đó, yếu tố vùng tần số nghiên cứu sẽ quyết định đến dạng cấu trúc và tính chất vật liệu. Trong nghiên cứu này, vùng tần số MHz thấp (nhỏ hơn 30 MHz) được quan tâm, dẫn đến cấu trúc vật liệu MM được nghiên cứu là cấu trúc kết hợp bao gồm một cuộn xoắn ốc và một tụ điện gắn ngoài. Cuộn xoắn ốc ở vùng tần số MHz có thể dễ dàng chế tạo bằng phương pháp quang khắc, cấu trúc vật liệu dự kiến được chế tạo trên đế FR-4 hoặc đế đàn hồi như Polyimide thương mại được đặc trưng bởi độ điện thẩm ϵ và độ tổn hao δ . Điều này dẫn đến trong mô phỏng cần xác định được ảnh hưởng của đế FR-4 hoặc Polyimide đến tính chất điện từ của vật liệu MM. Trong các cấu trúc MM được nghiên cứu, kim loại được sử dụng là Cu với độ dẫn $5,96.10^7 \text{ S.m}^{-1}$. Bên cạnh các tham số tính chất vật liệu, từ dạng cấu trúc của MM được nghiên cứu, các tham số hình học của cấu trúc ô cơ sở được xác định phù hợp với vùng tần số MHz và đưa vào thiết kế trong mô phỏng CST. Sau khi cấu trúc MM cũng như toàn bộ hệ thống WPT được thiết kế trong mô phỏng CST, các điều kiện biên được thiết lập để phù hợp với hệ thống và vùng tần số khảo sát.



[Hình 2.4](#). Giao diện chương trình mô phỏng CST Studio Suite.

[Hình 2.4](#) trình bày giao diện mô phỏng hệ thống WPT trong chương trình mô phỏng CST. Trong đó, cuộn cộng hưởng phát Tx, cuộn cộng hưởng thu Rx và các ô cơ sở của vật liệu MM đều có cấu trúc dạng xoắn ốc với tụ điện gắn ngoài. Bên cạnh

các tham số vật liệu của cấu trúc đã trình bày ở trên, các tham số hình học của hệ thống WPT cũng được thể hiện đầy đủ trong mô phỏng CST. Sau khi thực hiện mô phỏng thu được kết quả như minh họa trong Hình 2.5. Các kết quả thu được gồm các tham số phản xạ, phân bố trường trên các ô cơ sở của vật liệu MM.



Hình 2.5. Kết quả mô phỏng bằng phần mềm CST: (a) các tham số phản xạ, (b) phân bố từ trường [87].

2.3. Phương pháp thực nghiệm

Mỗi vật liệu biến hoá hoạt động ở dải tần khác nhau thì công nghệ chế tạo và phương pháp đo đạc khảo sát tính chất của vật liệu là khác nhau. Để nghiên cứu, chế tạo vật liệu biến hoá, cụ thể là vật liệu MM ứng dụng trong MR-WPT ở dải tần số MHz, đầu tiên chúng tôi sử dụng phần mềm mô phỏng CST để thiết kế và tối ưu các tham số của vật liệu MM cũng như của hệ thống MR-WPT nhằm tăng cường hiệu suất của hệ thống. Sau đó, vật liệu MM với các tham số đã được tối ưu được chế tạo bằng phương pháp quang khắc kết hợp với phương pháp hàn. Tiếp theo, vật liệu MM và hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM với các tham số hệ thống đã được tối ưu được chế tạo và đo đạc thực nghiệm nhờ sử dụng máy phân tích mạng vectơ (Vector Network Analyzer – VNA) hiện có tại Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

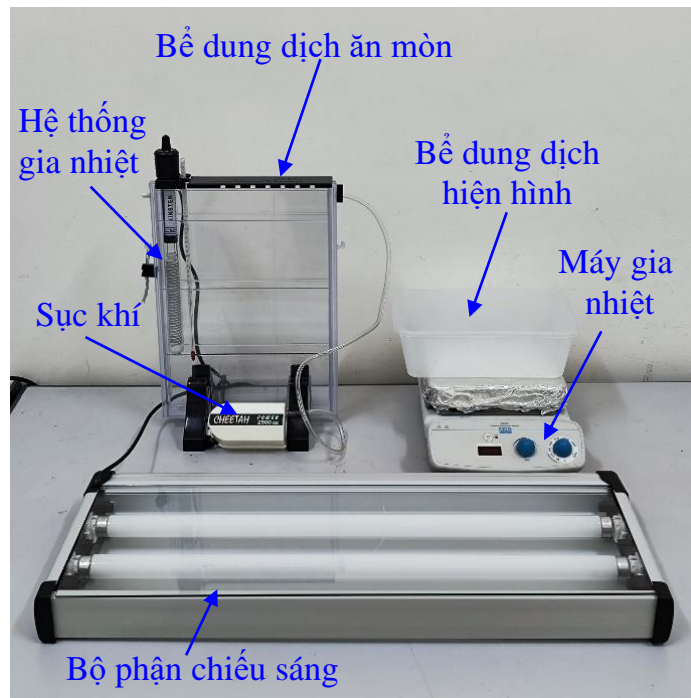
2.3.1. Chế tạo vật liệu MM và hệ thống MR-WPT ở dải tần số MHz

a) Phương pháp quang khắc và phương pháp hàn

Phương pháp quang khắc thường được dùng để chế tạo vật liệu biến hoá, tuy nhiên tùy thuộc vào kích thước ô cơ sở của vật liệu biến hoá cần chế tạo mà sử dụng các công nghệ quang khắc khác nhau. Với vật liệu biến hoá hoạt động ở vùng hồng ngoại và vùng khả kiến thường dùng các kỹ thuật như khắc bằng chùm điện tử, khắc laser hoặc phương pháp chùm ion hội tụ. Với vật liệu biến hoá hoạt động ở dải tần số

THz hoặc lớn hơn thì kích thước ô cơ sở nhỏ cỡ μm , khi đó phương pháp quang khắc dùng nguồn sáng laser đơn sắc thường được sử dụng. Với vật liệu biến hoá hoạt động ở dải tần số MHz, GHz, kích thước ô cơ sở của vật liệu tương ứng cỡ cm, mm; khi đó vật liệu biến hoá thường được chế tạo bằng phương pháp quang khắc sử dụng chùm sáng của đèn halogen.

Hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM có cấu trúc cơ bản gồm 5 thành phần: cuộn nguồn, cuộn cộng hưởng phát, cuộn cộng hưởng thu, cuộn thu và tấm vật liệu MM với nhiều ô cơ sở. Trong đó, cuộn cộng hưởng phát/thu và các ô cơ sở của tấm vật liệu MM có cấu trúc cộng hưởng là cuộn xoắn ốc gồm nhiều vòng. Tuy nhiên, trong hệ thống MR-WPT, để hệ thống được nhỏ gọn mà vẫn đạt được khoảng cách truyền dẫn mong muốn cỡ vài chục cm, cuộn cộng hưởng phát/thu, ô cơ sở chế tạo từ phương pháp quang khắc thường có tần số hoạt động cao, cỡ 100 MHz. Vì vậy, để thu được hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số MHz thấp, phương pháp hàn được sử dụng – các tụ điện dán được hàn vào từng cuộn cộng hưởng và từng ô cơ sở – để điều chỉnh tần số cộng hưởng của chúng cũng như của toàn hệ thống MR-WPT.



Hình 2.6. Hệ thiết bị quang khắc dùng trong chế tạo vật liệu biến hoá ở dải tần số MHz, GHz tại Viện Khoa học vật liệu.

Đối với vật liệu MM hoạt động ở dải tần số MHz, kích thước của các tham số cấu trúc là tương đối lớn, cỡ vài cm. Do đó để chế tạo mẫu MM hoạt động ở dải tần số MHz, phương pháp quang khắc bằng mạch in (Printed Circuit Board - PCB) và phương pháp hàn đã được sử dụng và chế tạo thành công nhiều mẫu vật liệu MM của

nhóm nghiên cứu tại Viện Khoa học vật liệu. Hình 2.6 trình bày hệ thiết bị quang khắc dùng trong chế tạo mẫu vật liệu biến hoá ở dải vùng MHz, GHz được lắp đặt tại phòng thí nghiệm trọng điểm, Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam và Hình 2.7 trình bày hệ thiết bị dùng để hàn linh kiện điện tử vào bản mạch in.



Hình 2.7. Hệ thiết bị dùng để hàn linh kiện điện tử vào bản mạch in.

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

Đối với hệ thống MR-WPT, đầu tiên chúng tôi chế tạo cuộn cộng hưởng phát/thu theo các bước trong quy trình công nghệ được trình bày ở Hình 2.8, cụ thể:

- Bước 1: Tạo mặt nạ cho cấu trúc.

Cấu trúc cuộn cộng hưởng được vẽ bằng phần mềm thiết kế mạch Altium, sau đó in tạo mặt nạ, kích thước đường mạch nhỏ nhất 0,5 mm.

- Bước 2: Phủ lớp cảm quang lên đế vật liệu

+ Làm sạch tấm mạch in (đã được phủ sẵn lớp kim loại đồng) bằng các dung dịch: nước khử ion, ethanol, acetone. Mục đích của quá trình là làm sạch các chất hữu cơ, bụi trên bề mặt. Sấy khô bằng khí N₂.

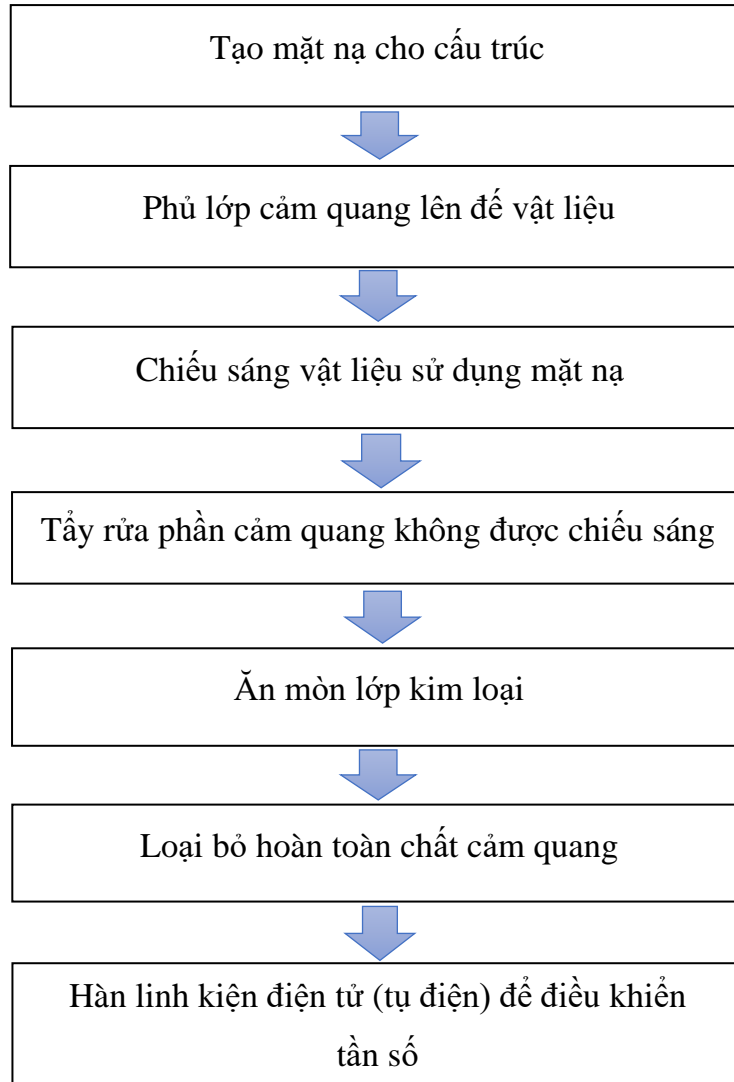
+ Dùng 10 ml dung dịch chứa chất cảm quang (Negative photoresist I – Sigma-Aldrich) được phủ lên tấm mạch in bằng phương pháp spin coating theo 2 bước: bước 1 quay với tốc độ thấp 500 vòng/phút trong 15 giây, bước 2 quay với tốc độ cao 1000 vòng/phút trong 30 giây.

+ Nung sơ bộ mẫu (pre-bake): để đạt được độ bám dính tối đa của lớp cảm quang, dung môi còn lại cần phải loại bỏ bằng quá trình pre-bake ở 80°C trong 20 phút.

- Bước 3: Chiếu sáng vật liệu sử dụng mặt nạ

+ Đặt mặt nạ lên bề mặt vật liệu, mặt nạ được ép sát vào bề mặt bằng cách sử dụng 1 tấm mica trong suốt đặt lên trên lớp mặt nạ.

+ Chiếu sáng vật liệu sử dụng mặt nạ bằng nguồn sáng đồng đều (đèn halogen hoặc ánh sáng trắng công suất 45 W) trong thời gian 10 giây. Khoảng cách từ nguồn chiếu sáng đến mặt nạ là 15 cm. Những vị trí chất cảm quang bị chiếu sáng sẽ biến tính và các vị trí bị che phủ bởi mặt nạ, chất cảm quang được giữ nguyên tính chất.



Hình 2.8. Quy trình công nghệ chế tạo cuộn cộng hưởng phát/thu và vật liệu MM cho hệ thống MR-WPT.

- Bước 4: Tẩy rửa phần cảm quang không được chiếu sáng

+ Nhấc mặt nạ ra khỏi tấm vật liệu.

+ Nhúng tấm vật liệu đã được chiếu sáng trong hóa chất chuyên dụng (Negative developer) trong thời gian 60 giây. Rửa sạch nhiều lần bằng cồn

Isopropanol và nước khử ion. Bề mặt được làm khô bằng thổi khí nén N₂. Quá trình này có hai tác dụng: loại bỏ phần cảm quang không được chiếu sáng và làm cứng hoá phần cảm quang đã được biến tính.

+ Nung lần 2 (post-bake): cần phải nung chất cảm quang để loại bỏ dung môi còn sót lại và các thành phần dễ bay hơi, đồng thời giúp tăng cường độ ổn định hóa học và độ bám dính của chất cảm quang ở 120°C trong 20 phút.

- Bước 5: Ăn mòn lớp kim loại

+ Sau quá trình post-bake, tấm vật liệu được đưa vào dung dịch Copper etchant – Sigma-Aldrich trong bể có dung tích 2 lít.

+ Các thành phần kim loại trên tấm mạch in không được che chắn bởi chất cảm quang sẽ bị ăn mòn. Các thành phần được che chắn sẽ được giữ lại, đây cũng chính là cấu trúc vật liệu cần chế tạo.

+ Trong quá trình này dung dịch ăn mòn sẽ bị nóng lên do phản ứng hóa học. Thời gian ngâm trong dung dịch ăn mòn trong khoảng 30 phút.

- Bước 6: Loại bỏ hoàn toàn chất cảm quang.

Rửa sạch lớp cảm quang bằng dung dịch chuyên dụng (Negative resist remover I – Sigma-Aldrich), dung dịch ethanol và acetone, sau đó thổi khô bằng khí N₂.

- Bước 7: Hàn linh kiện điện tử (tụ điện) để điều khiển tần số cộng hưởng.

Các tụ điện dán (dạng chip capacitor) được hàn vào từng cuộn cộng hưởng để điều khiển tần số cộng hưởng của cuộn.

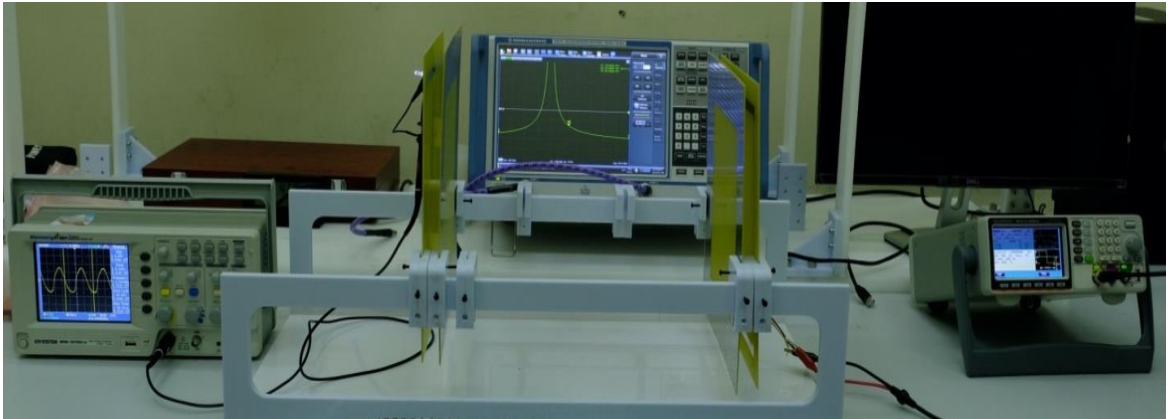
Sau khi chế tạo cuộn cộng hưởng phát/thu, vật liệu MM sử dụng cho hệ thống MR-WPT được chế tạo theo quy trình tương tự như trên, với hai cách tiếp cận: chế tạo, ăn mòn một lần cho cả tấm vật liệu hoặc chế tạo từng ô cơ sở của tấm vật liệu sau đó ghép lại bằng keo dán.

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

a) Máy phân tích mạng vector

Máy phân tích mạng vector (Rohde & Schwarz ZNB20 - R&S ZNB20) hiện có tại Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Đây là máy phân tích mạng vector tầm trung, hai cổng, có thể thực nghiệm đo đặc trong dải tần từ 100 kHz đến 20 GHz. Nó có dải động 140 dB, giúp có thể thực hiện các phép đo chính xác trên các thiết bị thử nghiệm băng thông rộng hoặc các thành phần hoạt

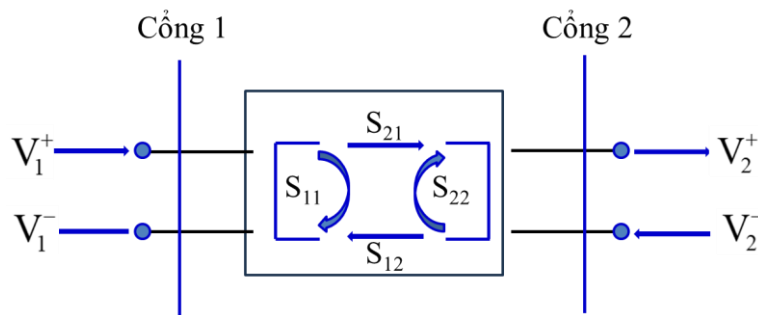
động ở tần số thấp. R&S ZNB20 cũng như các VNA khác, đưa năng lượng vào một cổng, xác định năng lượng nhận được trên cổng đó và ở các cổng khác, từ đó cho phép xác định các thông số quan tâm nghiên cứu.



Hình 2.9. Máy phân tích mạng vectơ tại Viện Khoa học vật liệu.

b) Các thông số cơ bản của máy phân tích mạng vectơ

Trong nghiên cứu vật liệu MM ứng dụng trong WPT ở dải tần số MHz, sử dụng máy phân tích mạng vectơ cho phép xác định các giá trị R , L , C ở vùng sóng cao tần và các thông số Z , S , $ABCD$. Trong đó, các thông số Z , S , $ABCD$ có thể chuyển đổi được cho nhau. Đối với hệ thống WPT sử dụng vật liệu MM, các thông số tán xạ S là các thông số chính được quan tâm nghiên cứu và đo đạc thực nghiệm. Các thông số S cũng là cách phổ biến nhất trong việc thể hiện những phép đo đạc của máy phân tích mạng vectơ và được kí hiệu là S_{xy} . Trong đó, x tương ứng với cổng nơi năng lượng ra (output port) và y tương ứng với cổng nơi năng lượng đi vào (input port). Các thông số S trong một máy phân tích mạng vectơ hai cổng được minh họa như ở [Hình 2.10](#).



Hình 2.10. Minh họa các thông số S của máy phân tích mạng vectơ hai cổng.

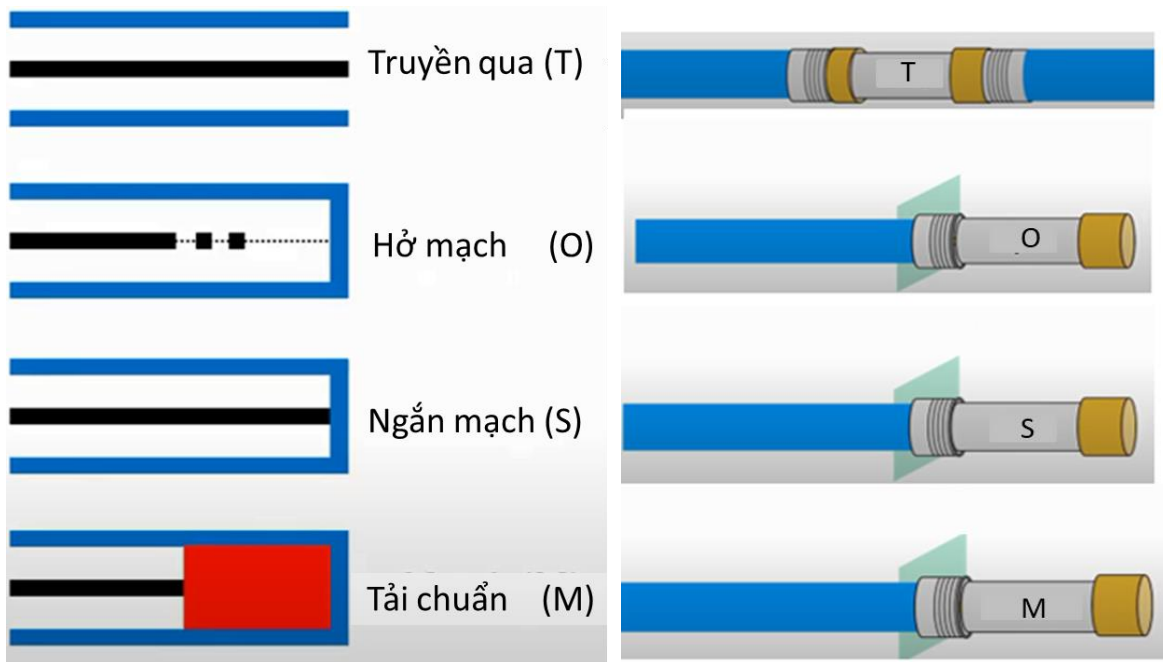
Các thông số S trong một máy phân tích mạng vectơ hai cổng được xác định như sau:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Trong đó: V_1^- , V_2^- là các sóng phản xạ và V_1^+ , V_2^+ là các sóng tới lần lượt ở cổng 1, cổng 2. Một cách tổng quát, các thông số S được xác định như sau:

$$S_{xy} = \left. \frac{V_x^-}{V_y^+} \right|_{V_{m \neq n}^+ = 0} \quad (2.7)$$

c) Chuẩn hóa máy phân tích mạng vectơ



Hình 2.11. Chuẩn hóa hệ đo theo phương pháp SOLT: chế độ truyền qua hoàn toàn (Through), chế độ hở mạch (Open), chế độ ngắn mạch (Short), chế độ tải chuẩn (Load - Match).

Việc chuẩn hóa được thực hiện để cải thiện độ chính xác của các phép đo của máy phân tích mạng vectơ. Để chuẩn hóa hệ đo cho VNA khi đo đạc các thông số của hệ thống WPT, phương pháp SOLT (Short-Open-Load-Through) được sử dụng. Điều này có nghĩa là trước khi đo, ta phải định nghĩa cho máy các chế độ: chế độ bị nối tắt (Short); chế độ không truyền qua hoàn toàn (Open); chế độ đang có tải (Load); chế độ truyền qua hoàn toàn (Through). Việc định nghĩa các chế độ đo nhờ vào sử dụng bốn cục chuẩn được cung cấp kèm theo máy. Ta lần lượt gắn các cục chuẩn vào các cổng thử nghiệm để chuẩn hóa các chế độ theo phương pháp SOLT như minh họa ở Hình 2.11.

- Chế độ ngắn mạch (Short): gắn cục chuẩn Short vào một cổng để nối tắt cổng đó, tương ứng với phép đo một cổng của mỗi cổng thử nghiệm sử dụng đầu cuối ngắn mạch.

- Chế độ hở mạch (Open): gắn cục chuẩn Open vào một cổng, có thể hiểu khi đó cả hai cổng đều được để mở, tương ứng với phép đo một cổng của mỗi cổng thử nghiệm sử dụng đầu cuối hở.

- Chế độ tải chuẩn (Load - Match): gắn cục chuẩn Load vào một cổng, tương ứng với phép đo một cổng của mỗi cổng thử nghiệm sử dụng đầu cuối tải.

- Chế độ truyền qua hoàn toàn (Through): thực hiện bằng cách kết nối hai cổng thử nghiệm với nhau thông qua hai đầu cục chuẩn Through.

d) Bố trí thực nghiệm đo đặc trưng của hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM ở dải tần số MHz

Dựa vào kết quả mô phỏng, các cuộn nguồn/tải, cuộn cộng hưởng phát/thu và tấm vật liệu MM với các tham số cấu trúc đã được tối ưu nhằm tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số MHz được chế tạo. Sử dụng máy phân tích mạng vectơ Rohde & Schwarz ZNB20, đặc trưng của ô cơ sở vật liệu MM (tần số cộng hưởng) và đặc trưng của hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM ở dải tần số MHz (hệ số truyền qua) lần lượt được xác định.

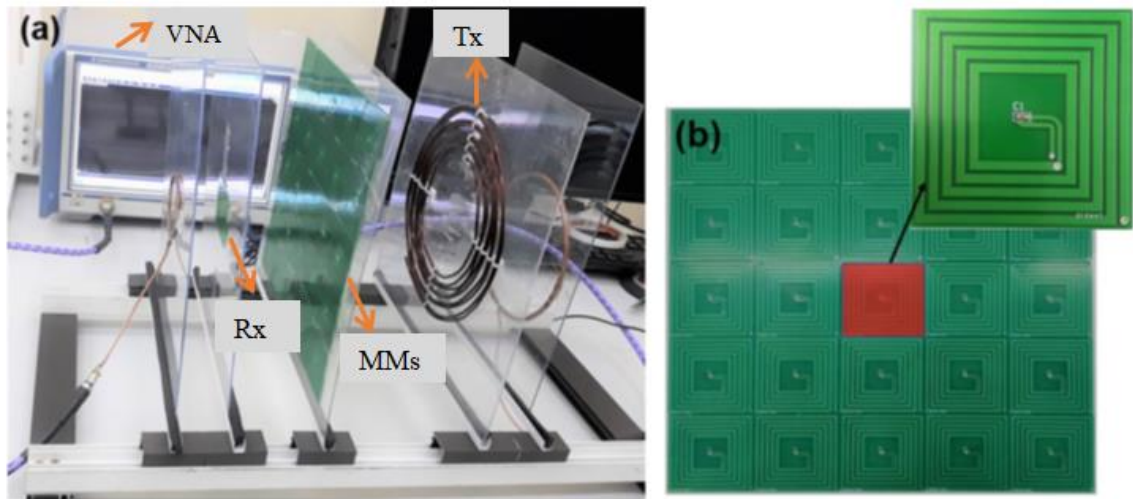
* Đo đặc trưng của ô cơ sở vật liệu MM (tần số cộng hưởng)

Để xác định đặc trưng tần số cộng hưởng của ô cơ sở vật liệu MM, ô cơ sở vật liệu MM được đặt giữa hai cuộn nguồn/tải (hai ăng ten vòng) kết nối với hai cổng của máy phân tích mạng vectơ. Khoảng cách giữa hai cuộn nguồn/tải và ô cơ sở vật liệu MM được điều chỉnh cho đến khi thu được tần số không đổi của sự suy giảm phản xạ để tối thiểu ảnh hưởng của các ăng ten vòng này lên các tham số ô cơ sở. Tần số thu được đó chính là tần số cộng hưởng của ô cơ sở vật liệu MM.

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

Để đo đặc xác định hiệu suất của hệ thống MR-WPT khi có sử dụng tấm vật liệu MM, hệ thống được bố trí thực nghiệm đo đặc nhờ sử dụng máy phân tích mạng vectơ Rohde & Schwarz ZNB20 như Hình 2.12. Trong đó, các cuộn nguồn/tải (phát/thu) được nối vào hai cổng của máy phân tích mạng đã được chuẩn hóa để đo tại dải tần số MHz và hiệu suất truyền qua có thể dễ dàng được xác định thông qua các thông số tán xạ S đo được. Tín hiệu cung cấp cho cuộn nguồn (phát) của hệ thống MR-WPT được lấy ra từ cổng 1 hoặc cổng 2 và tín hiệu mà cuộn tải (thu) nhận được

sau quá trình truyền năng lượng của hệ thống MR-WPT tương ứng được đưa vào cổng 2 hoặc cổng 1. Khoảng cách giữa các cuộn nguồn/tải tới các cuộn cộng hưởng phát/thu cũng được điều chỉnh để có thể đạt được điều kiện phối hợp trở kháng khi hệ số phản xạ tại hai cổng của máy phân tích mạng nhỏ hơn -10 dB. Khi đó, hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT có thể được tính gần đúng thông qua tham số truyền qua, cụ thể là $|S_{21}|^2$ hoặc $|S_{12}|^2$.



Hình 2.12. (a) Sơ đồ thiết lập thí nghiệm đo đặc hệ số truyền qua của hệ thống MR-WPT khi sử dụng tấm vật liệu MM, (b) tấm vật liệu MM được thiết kế gồm 5x5 ô cơ sở [88].

2.4. Kết luận chương 2

Trong chương này trình bày các phương pháp nghiên cứu được sử dụng trong luận án, bao gồm: tính toán lý thuyết và mô hình hóa, mô phỏng và thực nghiệm. Đây là các phương pháp hiệu quả trong nghiên cứu vật liệu biến hoá nói chung và vật liệu MM nói riêng. Các phương pháp nghiên cứu này đã được các nhà khoa học trong nước và quốc tế sử dụng rộng rãi, cho độ tin cậy cao. Trong quá trình thực hiện luận án, các phương pháp nghiên cứu này được sử dụng phối hợp, đối chiếu so sánh để khẳng định tính chính xác của các kết quả nghiên cứu thu được, cụ thể như sau:

Đầu tiên, phương pháp mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm mô phỏng điện từ CST Studio Suite. Phương pháp mô phỏng giúp thiết kế cấu trúc cuộn cộng hưởng phát/thu cũng như thiết kế cấu trúc vật liệu MM để thu được các tham số cấu trúc đảm bảo các thành phần này có hệ số phẩm chất cao và hoạt động tại tần số cộng hưởng mong muốn của hệ thống MR-WPT. Sau khi xác định được cấu trúc các thành phần của hệ thống MR-WPT, cũng nhờ phần mềm mô phỏng điện từ CST Studio

Suite, các đặc trưng của hệ thống MR-WPT được xác định gồm tần số hoạt động, hệ số truyền qua, phân bố dòng điện và trường tại các thành phần trong hệ thống.

Bên cạnh đó, phương pháp tính toán lý thuyết và mô hình hóa cũng được áp dụng giúp tính toán tần số cộng hưởng của cuộn cộng hưởng phát/thu, tần số cộng hưởng của vật liệu MM và hiệu suất của hệ thống MR-WPT để so sánh, đối chiếu với kết quả mô phỏng.

Dựa trên các kết quả từ phương pháp mô phỏng, phương pháp tính toán lý thuyết và mô hình hóa, các cuộn cộng hưởng phát/thu và vật liệu MM sẽ được chế tạo bằng phương pháp quang khắc kết hợp với hàn linh kiện, bao gồm các bước thí nghiệm cơ bản: tạo mặt nạ, phủ lớp cảm quang, chiếu sáng, tẩy rửa cảm quang, ăn mòn kim loại, loại bỏ chất cảm quang và hàn tụ điện. Đây là phương pháp hữu hiệu trong chế tạo cuộn cộng hưởng phát/thu và vật liệu MM.

Sau cùng, máy phân tích mạng vector được sử dụng để đo đặc trưng của vật liệu MM cũng đặc trưng của hệ thống MR-WPT. Từ kết quả đo đặc tần số cộng hưởng của vật liệu MM, tần số hoạt động và hệ số truyền qua của hệ thống MR-WPT đã chế tạo sẽ được xác định và được so sánh, đối chiếu với kết quả mô phỏng, kết quả tính toán lý thuyết để khẳng định tính chính xác của kết quả nghiên cứu.

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

Các nghiên cứu về hệ thống MR-WPT đã chỉ ra rằng hệ thống cho phép mở rộng khoảng cách truyền dẫn đến tầm trung (từ vài cm đến m); tuy nhiên, khi mở rộng khoảng cách truyền dẫn, sự ghép cặp từ tính giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu trong hệ thống bị suy giảm, dẫn tới giảm hiệu suất của hệ thống [3], [89]. Hiện nay, nhiều nghiên cứu đã và đang được thực hiện để giải quyết vấn đề này, trong đó hai giải pháp tiềm năng là tăng cường hệ số phẩm chất Q của các cuộn cộng hưởng để bù đắp cho sự suy giảm hệ số ghép cặp giữa chúng hoặc sử dụng vật liệu MM để khuếch đại từ trường tắt dần phát ra từ cuộn cộng hưởng phát [3], [90], [103], [72].

Đối với giải pháp tăng cường hệ số phẩm chất Q , nhiều nghiên cứu cho thấy tham số Q của các cuộn cộng hưởng có mối quan hệ mật thiết với các tham số: điện trở R và độ tự cảm L của các cuộn đó; các tham số này lại phụ thuộc vào độ dẫn điện và kích thước của môi trường, tần số cộng hưởng của các cuộn hay tần số hoạt động của hệ thống [90], [92], [93]. Tuy nhiên, các nghiên cứu về hệ thống WPT đã được thực hiện chủ yếu tập trung nghiên cứu các hệ thống này trong môi trường không khí – môi trường không dẫn điện [94], trong khi các hệ thống này cũng cho thấy tiềm năng ứng dụng trong các môi trường đặc biệt như dưới lòng đất, dưới nước hay truyền qua mô [95], [96]. Đồng thời các nghiên cứu đã thực hiện chủ yếu tập trung vào các hệ thống IC-WPT hoạt động ở dải tần số kHz cho khoảng cách truyền dẫn ngắn, trong khi nhu cầu mở rộng phạm vi truyền dẫn ngày càng tăng. Điều đó gắn liền với sự thay thế của hệ thống MR-WPT cho hệ thống IC-WPT, đồng nghĩa với sự mở rộng vùng tần số hoạt động của các hệ thống WPT từ vùng kHz sang vùng MHz – vùng tần số WPT được định hướng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực. Vì vậy, trong chương này, trước tiên chúng tôi khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống MR-WPT cơ bản, bao gồm: độ dẫn điện và kích thước của môi trường truyền dẫn, tần số hoạt động của hệ thống. Sự ảnh hưởng của các tham số này tới hiệu suất của hệ thống được khảo sát thông qua ảnh hưởng của các tham số của cuộn cộng hưởng tới hiệu suất của hệ thống khi các tham số này thay đổi.

Đối với giải pháp sử dụng vật liệu MM nhằm khuếch đại từ trường tắt dần để tăng cường hiệu suất của hệ thống, qua tổng quan về hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM chúng tôi nhận thấy: thứ nhất hầu hết các hệ thống đã được triển khai nghiên cứu là các hệ thống đối xứng hoặc các hệ thống không hoặc ít có sai lệch; thứ hai hầu

hết các cấu trúc vật liệu MM sử dụng trong hệ thống có cấu hình phẳng với chất nền cứng; thứ ba là hiện nay các hệ thống này vẫn tồn tại hạn chế về hiệu suất, khoảng cách truyền dẫn. Tuy nhiên, thực tế ngày càng nhiều các ứng dụng đòi hỏi các hệ thống MR-WPT phải có hiệu suất cao, khoảng cách truyền dẫn mở rộng, hệ thống có thể không đối xứng hoặc có sai lệch hoặc cấu trúc vật liệu MM có thể biến đổi linh hoạt để phù hợp với các yêu cầu của ứng dụng. Chính vì vậy, các hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM hiện nay vẫn còn hạn chế, chưa đáp ứng được nhu cầu thực tế. Để tăng cường hiệu suất, khoảng cách truyền dẫn, cũng như tăng khả năng ứng dụng của hệ thống MR-WPT, phần tiếp theo trong chương này chúng tôi đề xuất một số cấu trúc vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp cho hệ thống MR-WPT khi hệ thống không có/có sai lệch.

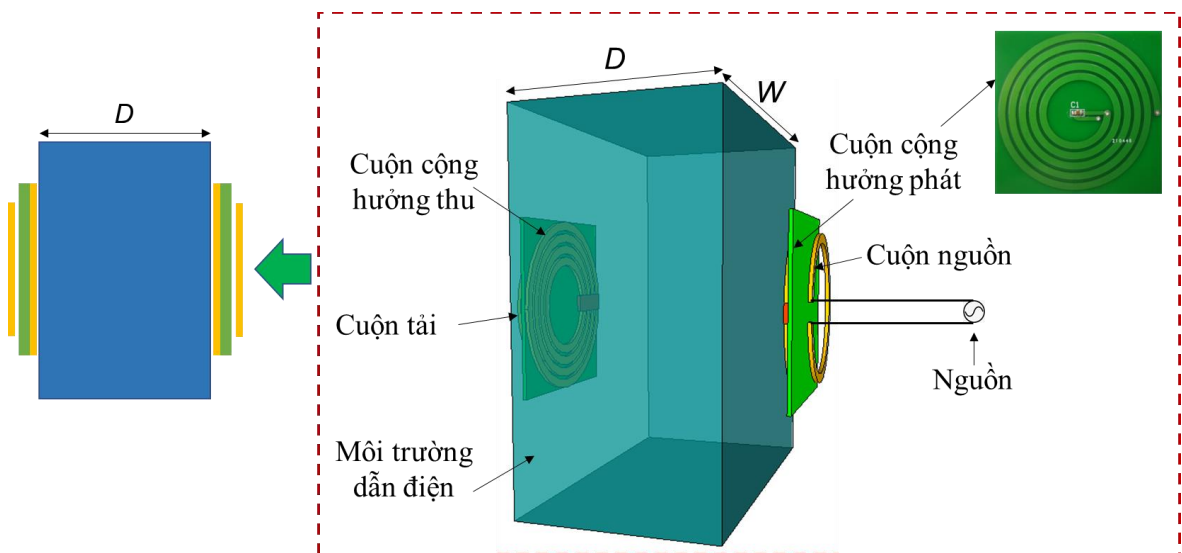
3.1. Nghiên cứu khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất hệ thống MR-WPT cơ bản

Để khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống MR-WPT, chúng tôi thiết kế một hệ thống có tần số hoạt động thay đổi được và đặt trong môi trường có độ dẫn điện và kích thước của môi trường cũng thay đổi được. Trước tiên, bằng phương pháp lý thuyết và mô phỏng, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của độ dẫn điện và tần số hoạt động tới hiệu suất của hệ thống, trong đó khảo sát và phân tích chi tiết các tham số R , L , Q của cuộn cộng hưởng khi thay đổi các tham số đó. Trong nghiên cứu này, độ dẫn điện của môi trường được thay đổi từ 0 – 8 S/m - tương ứng với độ dẫn điện thay đổi từ độ dẫn điện của môi trường không khí đến độ dẫn điện của các môi trường được định hướng ứng dụng; tần số hoạt động của hệ thống được thay đổi trong dải tần số MHz (nhỏ hơn 30 MHz) - vùng tần số mà WPT được định hướng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực. Sau đó, hai hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 10 MHz và dải tần số 20 MHz được chúng tôi chế tạo thực nghiệm để kiểm nghiệm các kết quả phân tích lý thuyết và mô phỏng.

3.1.1. Thiết kế hệ thống MR-WPT

Trong nghiên cứu này, chúng tôi thiết kế một hệ thống MR-WPT hoạt động ở vùng tần số MHz, truyền năng lượng thông qua một khối dẫn điện có độ dày D và độ rộng W , như được minh họa trong [Hình 3.1](#). Trong đó, khoảng cách truyền dẫn của hệ thống được cố định là 5 cm. Hệ thống MR-WPT chúng tôi thiết kế là một hệ thống bốn cuộn đối xứng, chia thành hai phần: phần phát và phần thu. Phần phát bao gồm cuộn nguồn và cuộn cộng hưởng phát. Cuộn nguồn là một vòng dây có đường kính 4 cm, cuộn cộng hưởng phát được xác định có kích thước bằng khoảng cách truyền dẫn, cụ thể đường kính 5 cm. Để thiết kế cuộn cộng hưởng có hệ số phẩm chất cao,

chúng tôi tham khảo một số các nghiên cứu sử dụng cấu trúc có hiệu quả cao trong WPT [97], [98] và từ đó lựa chọn cấu trúc xoắn ốc tròn gắn thêm tụ điện ngoài - một cấu trúc hiệu quả để chế tạo cuộn cộng hưởng có hệ số phẩm chất cao và hoạt động ở dải tần số MHz thấp [99]. Trên cơ sở xác định đường kính của cuộn cộng hưởng là 5 cm, phương pháp mô phỏng được chúng tôi thực hiện để tối ưu các tham số cấu trúc khác của cuộn. Kết quả thu được cuộn cộng hưởng là xoắn ốc tròn 5 vòng, làm bằng dây đồng với độ dày lớp đồng là 0,105 mm, chiều rộng dải 2,5 mm, khoảng cách giữa các dải 1 mm và chế tạo trên đế FR-4 dày 1 mm, có hằng số điện môi là 4,4.



Hình 3.1. Sơ đồ của hệ thống MR-WPT được đề xuất.

Phần thu của hệ thống MR-WPT có các thành phần tương tự như phần phát, gồm cuộn tải và cuộn cộng hưởng thu Rx. Cuộn tải và cuộn cộng hưởng thu có cấu tạo lần lượt giống cuộn nguồn và cuộn cộng hưởng phát. Tần số cộng hưởng của các cuộn cộng hưởng chính là tần số hoạt động của hệ thống MR-WPT. Tần số này ở vùng MHz và có thể được điều khiển bởi một tụ điện gắn vào mặt sau của ô cơ sở kết nối hai đầu xoắn ốc thông qua hai lỗ thông, cụ thể tụ điện 261 pF cho tần số 10 MHz và tụ điện 50 pF cho tần số 20 MHz. Trong nghiên cứu này, ngoài khảo sát ảnh hưởng của độ dẫn điện của môi trường và ảnh hưởng của tần số hoạt động của hệ thống đến hiệu suất truyền dẫn, ảnh hưởng của kích thước của môi trường dẫn điện cũng được chúng tôi khảo sát.

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

3.1.2.1. Phân tích lý thuyết

Do hiệu suất của hệ thống MR-WPT phụ thuộc vào các tham số có ảnh hưởng đến các tham số của cuộn cộng hưởng (điện trở R , độ tự cảm L và hệ số phẩm chất

Q) nên trước tiên điện trở của cuộn cộng hưởng, tham số ảnh hưởng lớn đến hệ số phẩm chất Q , được chúng tôi xem xét. Đối với các ứng dụng WPT trong môi trường không khí, tổn thất Ohmic gây ra bởi điện trở của cuộn dây là chiếm ưu thế, trong khi tổn hao gây ra bởi bức xạ có thể bị bỏ qua khi hệ thống hoạt động ở dải tần số thấp [100]. Khi xem xét hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số cao, vùng tần số MHz, khi đó điện trở của cuộn dây trong môi trường không khí hoặc trong môi trường dẫn điện được tính đến cả điện trở bức xạ và được xác định bởi công thức:

$$R = R_{DC} + R_{AC} + R_{rad} \quad (3.1)$$

Trong đó: R_{DC} , R_{AC} và R_{rad} lần lượt là điện trở một chiều, điện trở xoay chiều và điện trở bức xạ của cuộn dây. R_{DC} phụ thuộc vào kích thước cuộn dây và R_{AC} phụ thuộc vào độ sâu da (skin depth) là tương tự nhau, nhưng điện trở bức xạ R_{rad} trong môi trường không khí và trong môi trường dẫn điện có sự khác biệt lớn ở tần số cao.

Điện trở bức xạ của một vòng dây đơn trong không khí và trong môi trường dẫn điện lần lượt được xác định bởi [101]:

$$R_{rad}^{air} = \frac{\pi}{6} \frac{\omega^4 \mu r^4}{c^3} \quad (3.2)$$

$$R_{rad}^{cond} = \omega \mu r \left[\frac{4}{3} (\beta r)^2 - \frac{\pi}{3} (\beta r)^3 + \frac{2\pi}{15} (\beta r)^5 - \dots \right] \quad (3.3)$$

Trong đó: ω là tần số góc, μ là độ từ thẩm của môi trường, c là vận tốc ánh sáng trong không khí, r là bán kính của vòng dây và $\beta = (\mu\omega\sigma/2)^{1/2}$ với σ là độ dẫn của môi trường.

So sánh (3.2) và (3.3) có thể thấy điện trở bức xạ của một vòng dây trong môi trường không khí nhỏ hơn nhiều so với điện trở bức xạ của nó trong môi trường dẫn điện. Điều này có nghĩa điện trở bức xạ của mỗi cuộn cộng hưởng trong môi trường không khí nhỏ hơn nhiều so với điện trở bức xạ của nó trong môi trường dẫn điện. Do đó, tổn hao bức xạ của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số MHz trong môi trường dẫn điện là đáng kể và cần được xem xét. Trong môi trường dẫn điện, sự biến thiên từ trường ở tần số cao trong các cuộn cộng hưởng tạo ra dòng điện xoáy trong môi trường xung quanh, ảnh hưởng đến hiệu suất truyền dẫn của hệ thống. Khi đó, hiệu suất của hệ thống MR-WPT trong môi trường dẫn điện được xác định theo công thức sau [102]:

$$\eta_{\text{cond}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + I_T^2 R_T + I_R^2 R_R + P_{\text{eddy}}} \quad (3.4)$$

Trong đó: (I_T, I_R) và (R_T, R_R) lần lượt là các dòng điện và các điện trở của cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu trong môi trường không khí, $P_{\text{out}} = \omega_0 M I_T I_R$ là công suất đầu ra với M là hệ cảm giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu [103]. P_{eddy} là tổn hao do dòng điện xoáy gây ra, được xác định bởi điện trở bức xạ của các cuộn cộng hưởng phát/thu trong môi trường dẫn điện [101]. Do đó, hiệu suất của hệ thống MR-WPT trong môi trường dẫn điện có thể được tính như sau:

$$\eta_{\text{cond}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + I_T^2 R_T + I_R^2 R_R + I_T^2 R_{T\text{-rad}} + I_R^2 R_{R\text{-rad}}} \quad (3.5)$$

Trong đó: $R_{T\text{-rad}}$ và $R_{R\text{-rad}}$ lần lượt là điện trở bức xạ của cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu.

Kết quả phân tích đối với hệ thống MR-WPT đối xứng cho thấy hiệu suất của hệ thống đạt cực đại khi $I_T = I_R$ [103]. Khi đó, hiệu suất truyền dẫn tối đa của hệ thống MR-WPT được xác định là:

$$\eta_{\text{cond}}^{\text{max}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{kQ_{\text{cond}}}} \quad (3.6)$$

Trong đó: $k = M/L$ là hệ số ghép cặp giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu với L là độ tự cảm của mỗi cuộn cộng hưởng, Q_{cond} là hệ số phẩm chất của mỗi cuộn cộng hưởng trong môi trường dẫn điện và có thể xác định bằng:

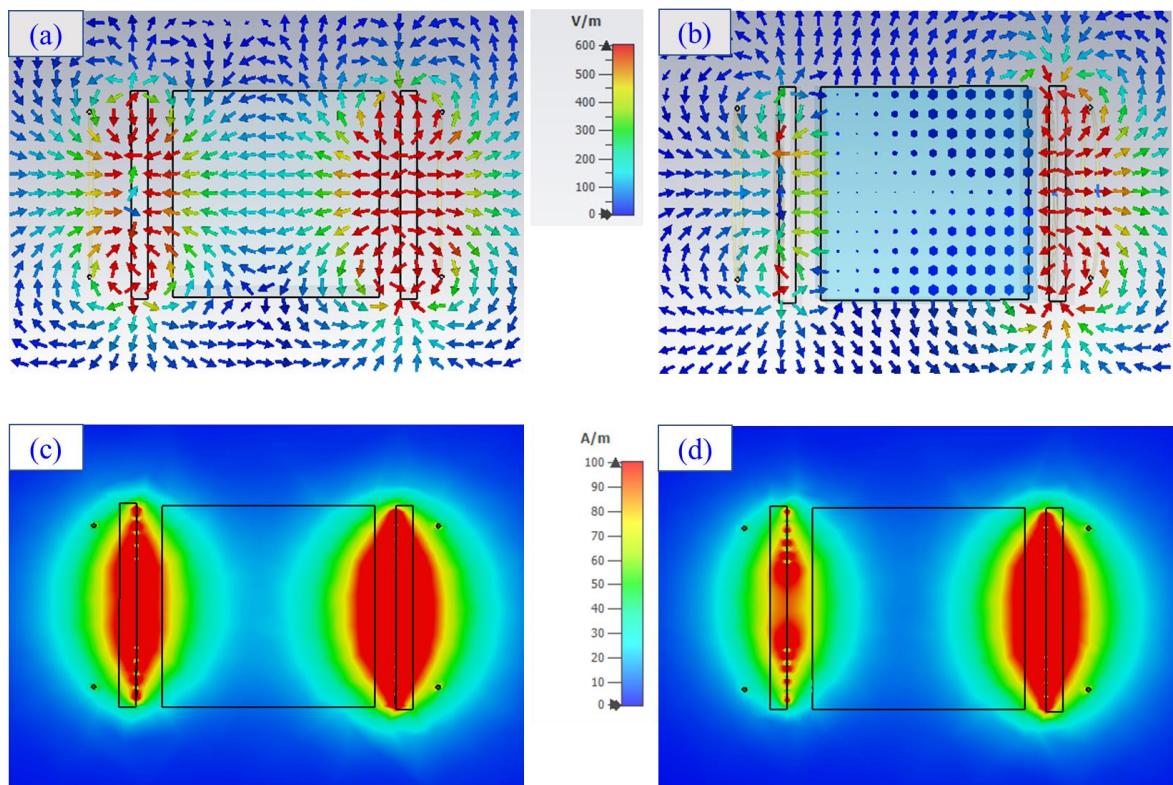
$$Q_{\text{cond}} = \frac{\omega L}{R} \quad (3.7)$$

Theo phương trình (3.6), hiệu suất tối đa của hệ thống MR-WPT đối xứng phụ thuộc vào tích kQ_{cond} chứ không phụ thuộc vào mức công suất. Mức công suất tỷ lệ với công suất tổn hao do dòng điện xoáy. Tuy nhiên, tỷ lệ giữa tổn hao do dòng điện xoáy gây ra và công suất đầu ra ($P_{\text{eddy}}/P_{\text{out}}$) không phụ thuộc vào mức công suất mà bị ảnh hưởng bởi tần số cộng hưởng và kích thước của hệ thống. Tại một khoảng cách nhất định, hệ số ghép cặp k là cố định, nên với hệ số phẩm chất Q_{cond} càng cao sẽ dẫn đến hiệu suất tối đa của hệ thống càng lớn. Mặt khác, theo phương trình (3.2), (3.3) và (3.7) có thể thấy hệ thống MR-WPT hoạt động ở tần số càng cao thì điện trở bức

xạ của các cuộn cộng hưởng trong môi trường dẫn điện càng lớn hay hệ số phẩm chất Q của các cuộn càng giảm, dẫn đến suy giảm hiệu suất của hệ thống MR-WPT.

3.1.2.2. Mô phỏng

Để khảo sát các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống MR-WPT gồm độ dẫn điện và kích thước (độ dày) của khối dẫn điện, tần số hoạt động của hệ thống, trước tiên chúng tôi thực hiện mô phỏng hệ thống bằng phần mềm CST trong hai trường hợp: hệ thống trong môi trường không khí và hệ thống khi có mặt khối dẫn điện với chiều dày khối $D = 5$ cm, chiều rộng khối $W = 5$ cm và độ dẫn điện của khối là 4 S/m - tương đương với độ dẫn điện của nước biển.



Hình 3.2. Kết quả mô phỏng phân bố cường độ trường xung quanh hệ thống MR-WPT: (a) điện trường xung quanh hệ thống MR-WPT trong môi trường không khí, (b) điện trường xung quanh hệ thống MR-WPT khi có mặt khối dẫn điện, (c) từ trường xung quanh hệ thống MR-WPT trong môi trường không khí, (d) từ trường xung quanh hệ thống MR-WPT khi có mặt khối dẫn điện.

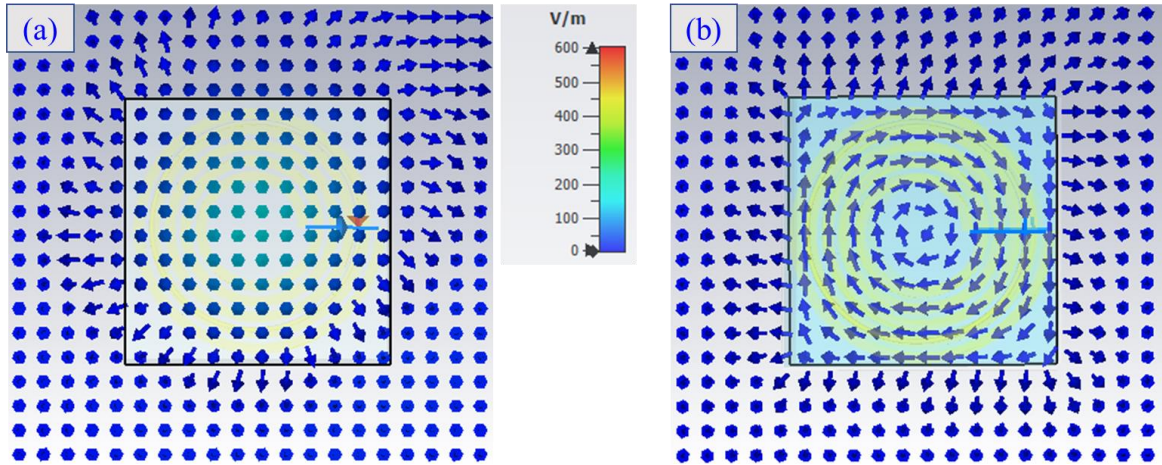
Bằng mô phỏng, hiệu suất của hệ thống trong môi trường không khí và hiệu suất của hệ thống khi có mặt khối dẫn điện được chúng tôi phân tích thông qua phân tích kết quả phân bố cường độ trường xung quanh hệ thống trích xuất được từ mô phỏng CST. **Hình 3.2** cho thấy kết quả mô phỏng thu được đối với phân bố cường độ trường xung quanh hệ thống hoạt động ở 20 MHz khi đặt trong môi trường không khí

và khi có mặt khối dẫn điện. Cụ thể, **Hình 3.2(a), (b)** thể hiện phân bố cường độ điện trường E và **Hình 3.2(c), (d)** thể hiện phân bố cường độ từ trường H xung quanh hệ thống khi đặt trong môi trường không khí và khi có mặt khối dẫn điện. Có thể thấy, trong không khí, điện trường tập trung ở vị trí gần cuộn cộng hưởng và bị suy giảm khi ở vị trí xa cuộn dây. Điện trường do cuộn Tx tạo ra được phân cực phẳng và các mũi tên chứng tỏ rằng cường độ và hướng của điện trường là liên mạch, như thể hiện trong **Hình 3.2(a)**. **Hình 3.2(b)** cho thấy khi có mặt khối dẫn điện, điện trường bên ngoài khối dẫn điện tương tự như trong môi trường không khí nhưng ở phía cuộn cộng hưởng thu Rx cường độ điện trường bị suy giảm; đồng thời bên trong khối dẫn điện, hướng của điện trường E thay đổi so với trong trường hợp trong môi trường không khí. **Hình 3.2(c),(d)** cho thấy cường độ từ trường gần cuộn cộng hưởng thu Rx trong không khí mạnh hơn cường độ từ trường gần Rx khi mặt có khối dẫn điện, tương tự như đối với điện trường. Tuy nhiên, từ trường liên tục qua ranh giới của khối dẫn điện. Qua kết quả mô phỏng có thể nhận thấy rằng, cả cường độ điện trường E và cường độ từ trường H tại vị trí gần cuộn cộng hưởng thu Rx đều bị suy giảm khi có mặt khối dẫn điện, điều này dẫn đến giảm hiệu suất của hệ thống MR-WPT khi có mặt khối dẫn điện.

Để phân tích rõ nguyên nhân gây ra giảm hiệu suất của hệ thống MR-WPT khi có mặt khối dẫn điện, theo phân tích lý thuyết nêu ở phần trước là do tổn hao dòng điện xoáy trong môi trường dẫn điện. Trên cơ sở đó, phân bố cường độ điện trường tại mặt phẳng chính giữa của hệ thống MR-WPT trong môi trường không khí và khi có mặt khối dẫn điện được trích xuất từ mô phỏng và thể hiện ở **Hình 3.3**. Kết quả ở **Hình 3.3(a)** cho thấy, trong môi trường không khí, các mũi tên đại diện cho điện trường có hướng từ cuộn cộng hưởng phát Tx đến cuộn cộng hưởng thu Rx, một số mũi tên có hướng hơi khác có thể do hình dạng của Tx và Rx tạo ra một trường không đồng nhất. **Hình 3.3(b)** cho thấy khi có mặt khối dẫn điện giữa Tx và Rx, các dòng điện xoáy được kích thích bên trong khối dẫn điện và tạo ra điện trường E phản ứng. Kết quả là tất cả các mũi tên đại diện cho điện trường bên trong khối dẫn điện đều thay đổi hướng và có dạng xoáy. Dòng điện xoáy quan sát được này chính là nguồn gốc của tổn hao phụ khi WPT qua môi trường dẫn điện.

Theo phân tích lý thuyết ở phần trước, hiệu suất của hệ thống MR-WPT phụ thuộc vào hệ số ghép cặp và hệ số phẩm chất Q của các cuộn cộng hưởng. Để phân tích rõ ảnh hưởng của dòng điện xoáy hay ảnh hưởng của độ dẫn điện và tần số hoạt động đến hiệu suất của hệ thống trong môi trường dẫn điện, hệ số phẩm chất Q và

các tham số liên quan của các cuộn cộng hưởng (điện trở R , độ tự cảm L) được khảo sát, phân tích từ kết quả mô phỏng CST.



Hình 3.3. Kết quả mô phỏng phân bố cường độ điện trường tại mặt phẳng chính giữa của hệ thống MR-WPT: (a) trong môi trường không khí và (b) khi có mặt khối dẫn điện.

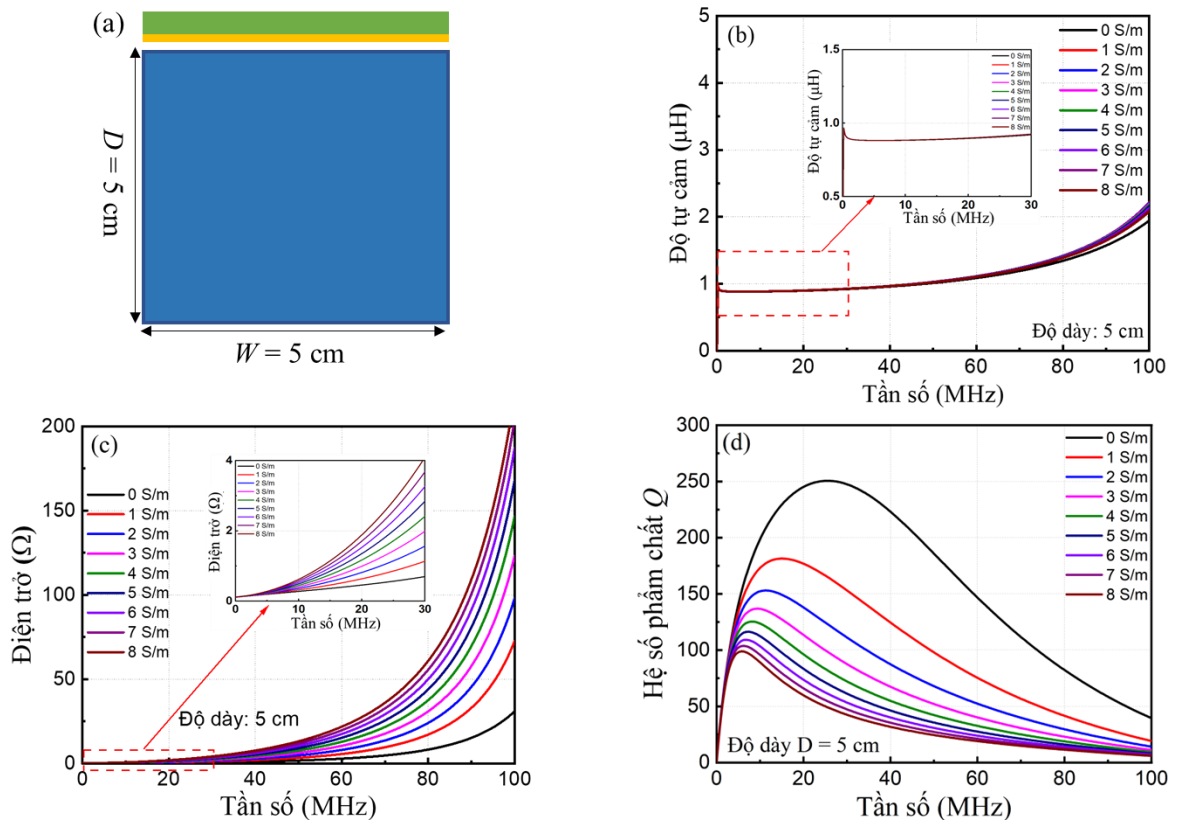
Trong hệ thống MR-WPT, mỗi cuộn cộng hưởng có thể được mô hình hóa bằng một mạch RLC tương đương [23]. Khi đó, hệ thống MR-WPT có thể được biểu diễn dưới dạng mạng một cổng. Do đó, các đặc tính của cuộn cộng hưởng có thể được biểu diễn dưới dạng các tham số mạng, chẳng hạn như S , Z , Y và $ABCD$ [37]. Từ định nghĩa của các tham số Z , trở kháng đầu vào của cuộn cộng hưởng được xác định bởi:

$$Z_{in} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (3.8)$$

Khi các cuộn cộng hưởng trong liên kết cảm ứng hoạt động ở tần số cộng hưởng riêng, mô hình RL đủ chính xác để thay thế cho mô hình RLC [104]. Điện trở R và độ tự cảm L của cuộn cộng hưởng có thể được trích xuất từ phần thực của trở kháng đầu vào của nó Z_{in} . Hệ số phẩm chất Q của cuộn cộng hưởng được xác định thông qua điện trở và độ tự cảm theo công thức (3.7).

Theo phân tích lý thuyết, khi cuộn cộng hưởng đặt trong môi trường dẫn điện, trở kháng đầu vào của nó bị thay đổi do dòng điện xoáy, từ đó dẫn đến các tham số của cuộn cộng hưởng thay đổi. Như vậy, để khảo sát ảnh hưởng của độ dẫn điện của môi trường và ảnh hưởng của tần số hoạt động của hệ thống đến hiệu suất của hệ thống, các tham số R , L , Q của cuộn cộng hưởng khi thay đổi các tham số này được khảo sát bằng cách thiết lập mô phỏng đối với cuộn cộng hưởng như được thể hiện trong Hình 3.4(a). Trong đó, cuộn cộng hưởng được đặt gần khối dẫn điện với chiều

dày khối $D = 5$ cm, chiều rộng khối $W = 5$ cm. Cuộn cộng hưởng này có các thông số chi tiết như được liệt kê ở mục 3.1.1.

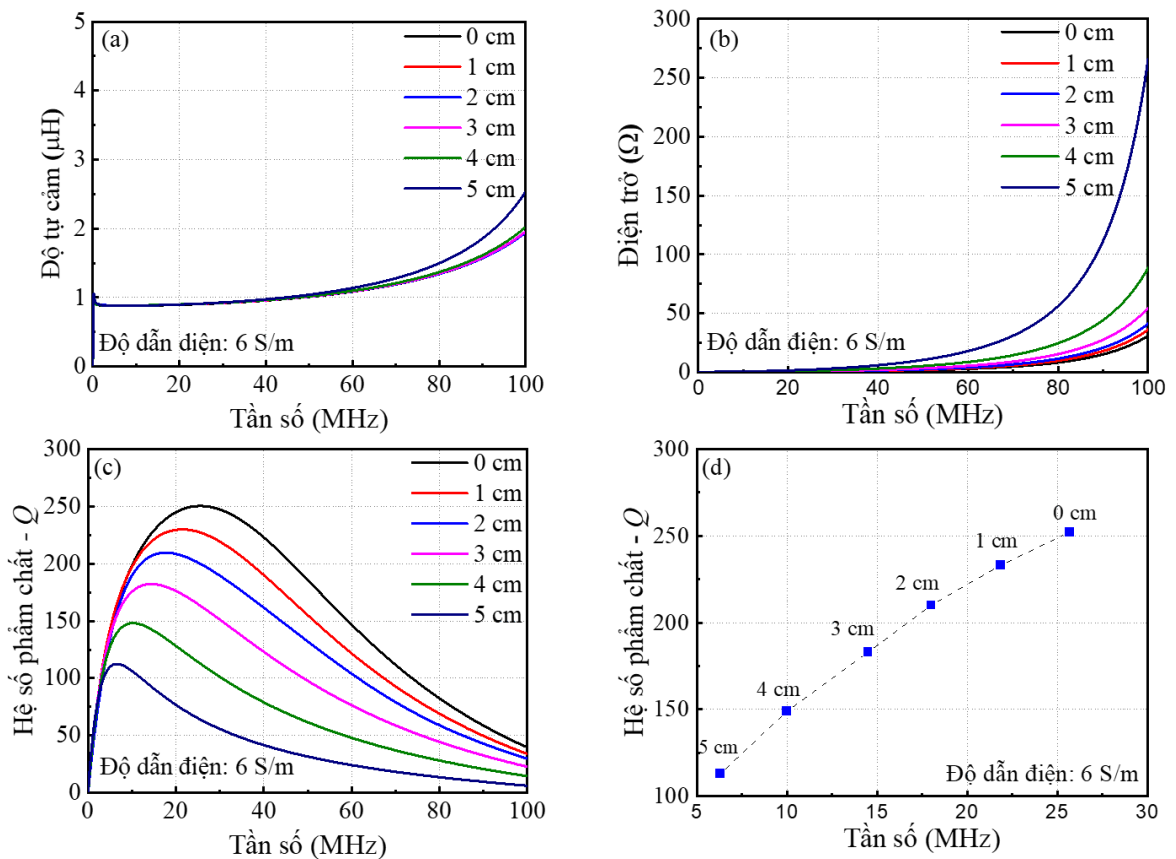


Hình 3.4. (a) Sơ đồ thiết lập mô phỏng cuộn cộng hưởng đặt gần khối dẫn điện; kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của các tham số của cuộn cộng hưởng theo tần số ở các độ dẫn điện khác nhau: (b) độ tự cảm L , (c) điện trở R , (d) hệ số phẩm chất Q .

Kết quả mô phỏng cho thấy sự phụ thuộc của các tham số R , L , Q của cuộn cộng hưởng theo tần số ở các độ dẫn điện khác nhau như được thể hiện trong Hình 3.4(b)-(d). Như đã nêu trên, trong mô phỏng này chúng tôi tập trung vào dải tần số MHz (nhỏ hơn 30 MHz). Kết quả ở Hình 3.4(b) cho thấy trong dải tần số từ 0 đến 30 MHz, độ tự cảm của cuộn cộng hưởng thay đổi nhẹ (phần bên trong của Hình 3.4(b)). Sự phụ thuộc của điện trở của cuộn cộng hưởng theo tần số ở các độ dẫn điện khác nhau cũng được khảo sát và thể hiện ở Hình 3.4(c). Kết quả cho thấy, trong môi trường không dẫn điện hoặc trong không khí, điện trở tăng theo tần số do hiệu ứng da (R_{AC} tăng), như được thể hiện bởi đường cong màu đen. Tuy nhiên, trong môi trường dẫn điện, xét ở cùng tần số thì điện trở của cuộn cộng hưởng tăng mạnh theo độ dẫn điện. Sự tăng điện trở có thể được giải thích bởi thành phần điện trở bức xạ ra bên ngoài trong môi trường dẫn điện của cuộn cộng hưởng. Nó cũng có thể được mô tả là tổn hao do dòng điện xoáy trong môi trường dẫn điện. Khi độ dẫn của môi trường tăng, tổn hao dòng điện xoáy tăng lên, dẫn đến tăng điện trở của cuộn dây khi độ dẫn

điện của môi trường thay đổi từ 1 đến 8 S/m. Vì tần số cũng ảnh hưởng đến tổn hao dòng điện xoáy, nên điện trở có xu hướng lớn hơn ở các tần số cao hơn.

Từ kết quả của độ tự cảm và điện trở có thể tính được hệ số phẩm chất Q của cuộn cộng hưởng - tham số quan trọng để xác định hiệu suất của hệ thống MR-WPT. **Hình 3.4(d)** cho thấy sự phụ thuộc của hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng theo tần số ở các độ dẫn điện khác nhau của môi trường. Khi độ dẫn điện tăng, sự tăng điện trở trong khi độ tự cảm chỉ thay đổi nhẹ làm giảm hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng hay làm giảm hiệu suất của hệ thống MR-WPT. Điều thú vị là tốc độ giảm của hệ số phẩm chất ở các tần số khác nhau có sự khác nhau rất lớn và kết quả mô phỏng cho thấy rằng: khi độ dẫn điện của môi trường tăng, tần số để thu được hệ số phẩm chất tối đa của cuộn cộng hưởng sẽ chuyển sang một dải tần số thấp hơn.

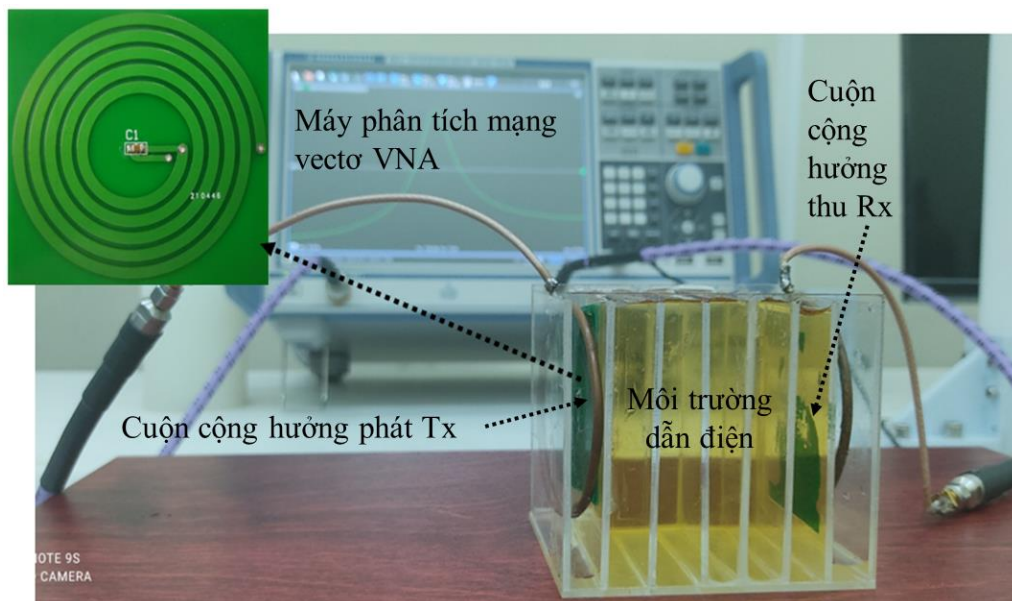


Hình 3.5. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của các tham số của cuộn cộng hưởng theo tần số ở các độ dày khác nhau của khối dẫn điện: (a) độ tự cảm, (b) điện trở, (c) hệ số phẩm chất và (d) hệ số phẩm chất tối đa.

Tiếp theo, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của độ dày khối dẫn điện tới hiệu suất của hệ thống MR-WPT thông qua khảo sát các tham số của bộ cộng hưởng khi thay đổi độ dày khối dẫn điện. **Hình 3.5** cho thấy các tham số L , R , Q của cuộn cộng hưởng khi độ dày khối dẫn điện thay đổi từ 0 đến 5 cm trong khi độ dẫn điện được giữ

nguyên là 6 S/m. Sự tăng độ dày khối dẫn điện có nghĩa là tồn tại một thể tích lớn hơn đối với các dòng điện xoáy, do đó điện trở của cuộn cộng hưởng tăng lên (Hình 3.5(b)) trong khi độ tự cảm thay đổi nhẹ (Hình 3.5(a)), kết quả làm giảm hệ số phẩm chất Q (Hình 3.5(c)) hay làm suy giảm hiệu suất của hệ thống MR-WPT. Với việc tăng độ dày khối dẫn điện từ 0 đến 5 cm, tần số để đạt được hệ số phẩm chất Q tối đa của bộ cộng hưởng cũng giảm từ 25,6 xuống 6,5 MHz, như thể hiện trong Hình 3.5(d). Kết quả này ngụ ý rằng đối với hệ thống MR-WPT khi truyền qua môi trường dẫn điện tồn tại một tần số cụ thể để đạt được hiệu suất tối đa, cụ thể với độ dày lớn hơn của khối dẫn điện đòi hỏi một tần số tối ưu nhỏ hơn.

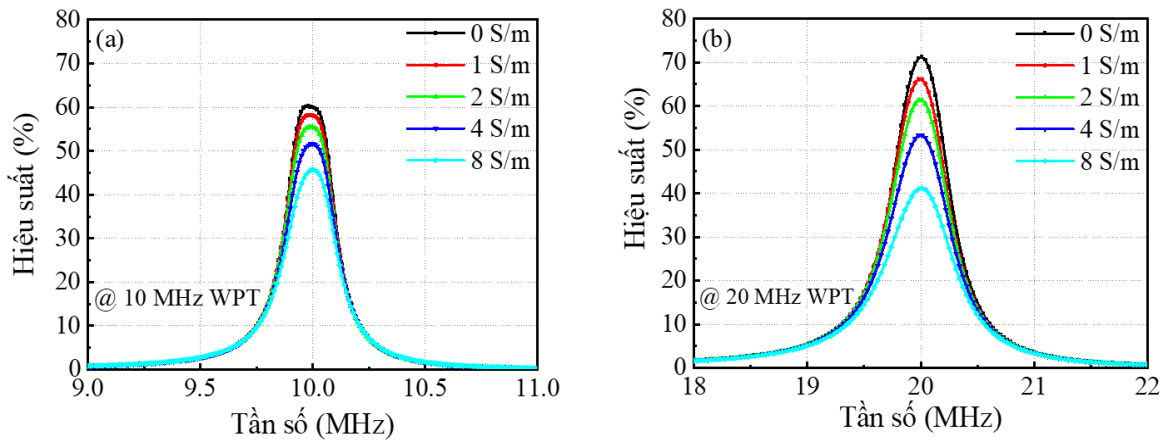
3.1.3. Chế tạo và thực nghiệm đo đạc hệ thống MR-WPT tại hai dải tần số khác nhau



Hình 3.6. Thiết lập thí nghiệm cho hệ thống MR-WPT trong môi trường dẫn điện được đề xuất.

Để xác nhận các phân tích ở các phần trước về ảnh hưởng của các tham số tới hiệu suất của hệ thống MR-WPT, chúng tôi thực nghiệm xác định hiệu suất của hệ thống MR-WPT với cấu hình của hệ thống tương tự cấu hình của hệ thống đã được thiết kế và mô phỏng như minh họa trong Hình 3.1. Chúng tôi khảo sát các hệ thống MR-WPT hoạt động ở hai dải tần số khác nhau là 10 MHz và 20 MHz khi có mặt khối dẫn điện với độ dày khối $D = 5$ cm. Các thông số của các hệ thống được giữ nguyên, riêng tần số hoạt động của mỗi hệ thống được xác định bởi tần số cộng hưởng của cuộn cộng hưởng phát/thu bằng cách thay đổi giá trị của tụ điện gắn thêm vào, như đã đề cập ở mục 3.1.1. Hình 3.6 thể hiện hệ thống MR-WPT trong môi trường

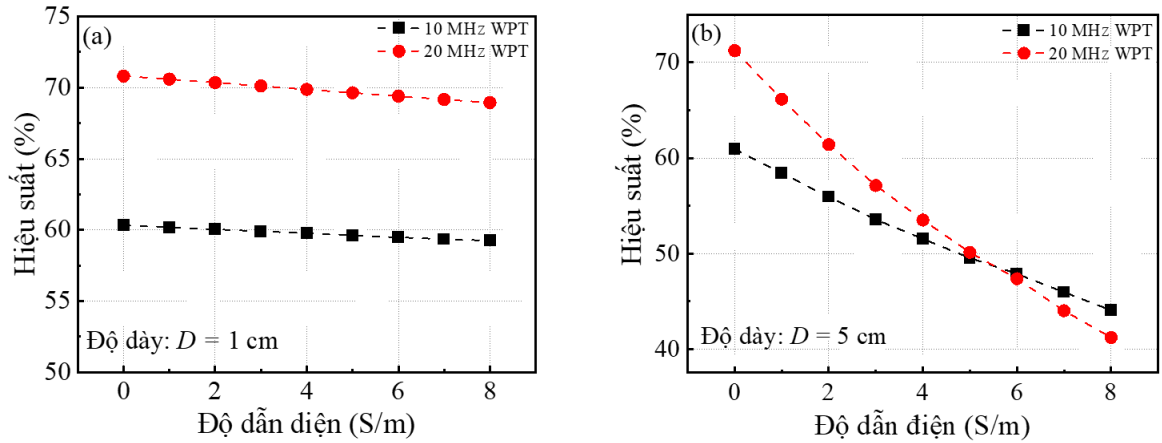
dẫn điện được chúng tôi thiết lập. Sau khi thiết lập, hiệu suất của hệ thống được khảo sát khi thay đổi độ dẫn điện của môi trường.



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

Hình 3.7(a) cho thấy hiệu suất của các hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 10 MHz với các độ dẫn điện khác nhau. Kết quả chỉ ra rằng, đối với môi trường nước tinh khiết, đây là hệ thống MR-WPT thông thường cho hiệu suất là 60%. Khi độ dẫn điện của môi trường tăng lên lần lượt là 1, 2, 4 và 8 S/m thì hiệu suất của hệ thống giảm và lần lượt là 58%, 55%, 51% và 45%. Như vậy sự tăng độ dẫn điện của môi trường dẫn đến sự giảm hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT do các dòng điện xoáy trong khối dẫn điện đã làm tăng điện trở bức xạ của các cuộn cộng hưởng và dẫn tới làm giảm hệ số phẩm chất của các cuộn, như đã được chỉ ra trong phân tích ở các phần trước. **Hình 3.7(b)** thể hiện các kết quả khảo sát đối với hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 20 MHz. So sánh kết quả khảo sát của hai hệ thống có thể thấy: trong nước tinh khiết, hệ số phẩm chất Q của cuộn cộng hưởng ở 20 MHz lớn hơn hệ số phẩm chất Q của cuộn cộng hưởng ở 10 MHz, do đó, hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 20 MHz thu được hiệu suất là 70% (lớn hơn hiệu suất 60% đối với hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 10 MHz). Điều này ngụ ý rằng trong nước tinh khiết hoặc trong không khí, sử dụng hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 20 MHz tốt hơn hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 10 MHz. Mặt khác, xu hướng ngược lại xảy ra trong môi trường dẫn điện, trong đó hiệu suất của hệ thống MR-WPT ở tần số cao giảm nhanh hơn so với hiệu suất của hệ thống MR-WPT ở tần số thấp. Đây là kết quả của sự tăng bức xạ ra bên ngoài của cuộn cộng hưởng trong môi trường dẫn điện, thể hiện qua dòng điện xoáy ở tần số cao hơn. Cụ thể có thể thấy ở độ dẫn 8 S/m, hiệu suất của hệ thống MR-WPT 20 MHz giảm

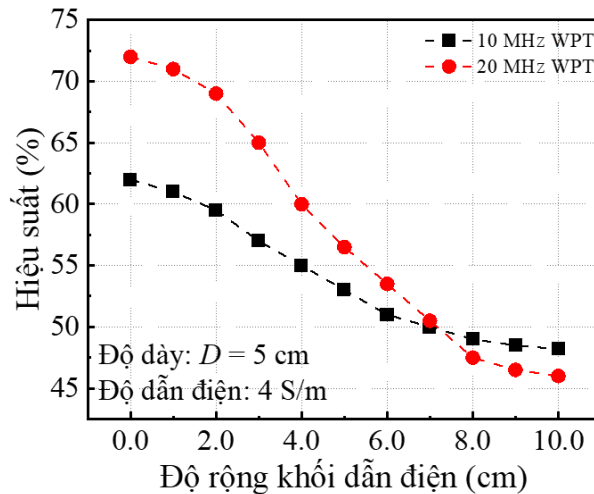
xuống còn 40% trong khi hiệu suất của hệ thống MR-WPT 10 MHz cũng giảm nhưng vẫn đạt được 45%.



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

Theo các phân tích ở các phần trước, bên cạnh sự phụ thuộc vào độ dẫn điện và tần số hoạt động của hệ thống, hiệu suất của hệ thống MR-WPT còn bị ảnh hưởng bởi độ dày của khối dẫn điện và điều này cũng được chúng tôi thực nghiệm khảo sát. **Hình 3.8(a)** cho thấy hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT khi có mặt khối dẫn điện với độ dày khối được giữ cố định là $D = 1$ cm và độ dẫn điện của khối thay đổi từ 0 đến 8 S/m. Trong các cấu hình này, khối dẫn điện được đặt giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu với khoảng cách giữa hai cuộn cố định là 5 cm. Kết quả khảo sát cho thấy, ở cùng độ dẫn điện, hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 20 MHz đạt hiệu suất cao hơn hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 10 MHz. Như dự đoán, hiệu suất của cả hai hệ thống đều giảm dần khi tăng độ dẫn điện. Có thể thấy hiệu suất của hệ thống MR-WPT 20 MHz giảm nhanh hơn nhưng không có sự khác biệt đáng kể. **Hình 3.8(b)** cho thấy hiệu suất của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 20 MHz và hiệu suất của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 10 MHz khi độ dày của khối dẫn điện là $D = 5$ cm. Khi chiều dày khối dẫn điện tăng, do năng lượng tiêu tán nhiều hơn trong môi trường dẫn điện, hiệu suất của cả hai hệ thống đều giảm đáng kể. Tuy nhiên, hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 20 MHz có hiệu suất giảm nhanh hơn nhiều so với hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 10 MHz. Ở độ dẫn điện nhỏ, hiệu suất của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 20 MHz cao hơn, tuy nhiên khi độ dẫn điện lớn hơn 6 S/m, hiệu suất của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 10 MHz có xu hướng cao hơn. Kết quả này thể hiện sự cân bằng khi thiết kế hệ thống MR-WPT trong môi trường dẫn điện: tần số để đạt được

hệ số phẩm chất Q tối đa của cuộn cộng hưởng và từ đó hệ thống đạt được hiệu suất truyền dẫn tối đa sẽ thấp hơn khi tăng độ dẫn điện và độ dày của khối dẫn điện.



Hình 3.9. Kết quả đo đặc sự phụ thuộc hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT 10 MHz và hệ thống MR-WPT 20 MHz theo độ rộng của khối dẫn điện.

Phân tích lý thuyết chỉ ra rằng, tổn hao năng lượng trong hệ thống MR-WPT tăng theo kích thước của môi trường dẫn điện, dẫn đến làm giảm hiệu suất của hệ thống. Độ dày của khối dẫn điện đã được khảo sát ở trên, chúng tôi tiếp tục khảo sát ảnh hưởng của độ rộng của khối dẫn điện tới hiệu suất của hệ thống. Hình 3.9 cho thấy sự phụ thuộc hiệu suất đo được của hệ thống theo độ rộng của khối dẫn điện khi độ dẫn điện được giữ cố định là 4 S/m và độ dày của khối dẫn điện cố định là $D = 5$ cm. Kết quả khảo sát cho thấy hiệu suất của cả hệ thống hoạt động ở dải tần số 20 MHz và hệ thống hoạt động ở dải tần số 10 MHz đều giảm dần khi tăng độ rộng của khối dẫn điện. Tuy nhiên, hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 20 MHz bị ảnh hưởng nhiều hơn bởi độ rộng của khối dẫn điện và dẫn đến hiệu suất của hệ thống giảm đáng kể hơn. Khi độ rộng của môi trường dẫn điện lớn hơn 7 cm ($W > 7$ cm), sự suy giảm bắt đầu xuất hiện dấu hiệu bão hòa và hiệu suất của hệ thống hoạt động ở dải tần số 10 MHz lớn hơn hiệu suất của hệ thống hoạt động ở dải tần số 20 MHz.

Qua nghiên cứu khảo sát các tham số ảnh hưởng tới hiệu suất hệ thống MR-WPT, chúng tôi nhận thấy đây là một nhiệm vụ đầy thách thức do đặc tính suy giảm hiệu suất của hệ thống. Trước đây, một số cách tiếp cận đã được thực hiện để giải quyết vấn đề này. IC-WPT [103], [105], [106] đã được sử dụng trong dải tần kHz và đạt được hiệu suất truyền dẫn cao, nhưng khoảng cách truyền dẫn nhỏ so với đường kính cuộn dây. WPT ở dải tần GHz [107] cũng đã được sử dụng để truyền năng lượng qua mô sêu với hiệu suất nhỏ. Một số nghiên cứu trước đây về MR-WPT đã khảo sát ở cả dải tần kHz [108] và dải tần số MHz thấp [109], nhưng các nghiên cứu này không

đề cập đến ảnh hưởng của tần số và độ dẫn điện tới hiệu suất truyền dẫn. Kết quả nghiên cứu của chúng tôi chỉ ra rằng, đối với từng độ dẫn điện cụ thể, tần số hoạt động của hệ thống MR-WPT phải khác nhau để đạt được hiệu quả tối đa. Để kết quả nghiên cứu đảm bảo tính khoa học, chúng tôi thực hiện so sánh chi tiết hiệu suất của các hệ thống WPT trong môi trường dẫn điện trong nghiên cứu của chúng tôi so với một số các nghiên cứu trước đây, cụ thể được thể hiện trong [Bảng 3.1](#).

Bảng 3.1. So sánh hiệu suất của một số hệ thống MR-WPT trong môi trường dẫn điện.

Công nghệ	Tần số	Độ dẫn điện	Khoảng cách truyền dẫn (cm)/đường kính cuộn dây (cm)	Hiệu suất (%)	Tài liệu tham khảo
Cộng hưởng từ	0,65 kHz	5 S/m	170/340 (0,5)	59	[108]
GHz WPT	1-4 GHz	Mô	2/1-6 (2-0,33)	0,4-0,004	[107]
Cảm ứng từ	70-520 kHz	4 S/m	6,6/17,6 (0,38)	81-90	[103]
Cảm ứng từ	0,1-1 MHz	4,5 S/m	0,5/21 (0,023)	95-35	[105]
Cộng hưởng từ	2,12 MHz	4 S/m	4/6 (0,67)	53	[109]
Cảm ứng từ	80 kHz	4 S/m	1,6/6 (0,27)	75	[106]
Cộng hưởng từ	10 MHz, 20 MHz	1-8 S/m	5/5 (1)	66-42	Nghiên cứu này [110]

So sánh với nghiên cứu trước đây [103], các kết quả nghiên cứu khảo sát cho thấy ở độ dày khối dẫn điện tương tự, ở khoảng cách truyền dẫn tương tự, hiệu suất của hệ thống MR-WPT chúng tôi đề xuất nhỏ hơn hiệu suất của hệ thống MR-WPT trong nghiên cứu đó. Điều này có thể giải thích là do trong hệ thống MR-WPT chúng tôi đề xuất, đường kính của các cuộn cộng hưởng được thu nhỏ, chỉ là 5 cm, nhỏ hơn đường kính của cuộn cộng hưởng trong nghiên cứu trước đây là 17,6 cm.

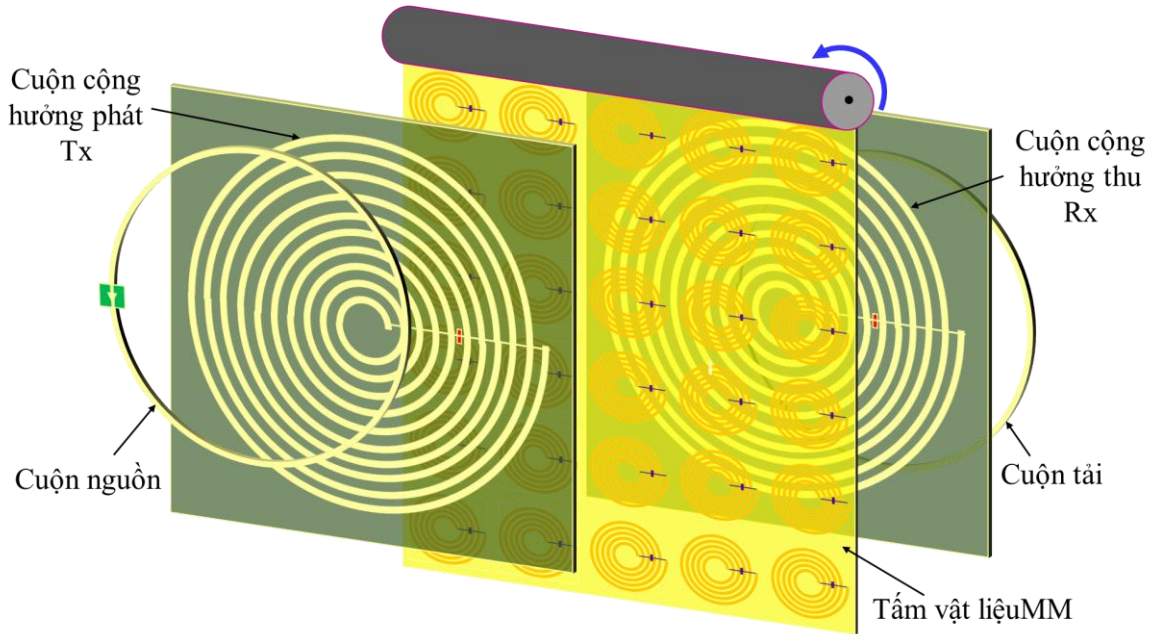
3.2. Hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp

Như đã đề cập trong phần tổng quan cũng như ở đầu chương 3, vật liệu MM có thể được sử dụng để tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT. Tuy nhiên, các hệ thống MR-WPT đã được nghiên cứu đa số là các hệ thống không có sai lệch trục hay sai lệch góc. Do nhu cầu của các ứng dụng thực tế, trong một số trường hợp, hệ thống MR-WPT chịu sai lệch trục hoặc/và sai lệch góc làm giảm hệ số ghép cặp giữa các cuộn cộng hưởng, điều này dẫn đến suy giảm đáng kể hiệu suất của hệ thống. Nhằm khắc phục nhược điểm này, hướng nghiên cứu sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp trong hệ thống MR-WPT chịu sai lệch trục, góc được chúng tôi phát triển. Vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp được sử dụng có thể thay đổi trạng thái linh hoạt theo sự thay đổi của các cuộn cộng hưởng trong hệ thống MR-WPT, từ đó giúp cải thiện đáng kể hiệu suất của hệ thống. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một cấu trúc vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp nhằm tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT hoạt động ở tần số 13,56 MHz khi có sai lệch trục và sai lệch góc. Để tấm vật liệu MM có thể cuộn hoặc gấp, chúng tôi lựa chọn polyimide với độ dày mỏng làm chất nền cho tấm vật liệu MM. Hiệu suất của hệ thống MR-WPT khi có sai lệch trục và sai lệch góc được chúng tôi khảo sát bằng mô phỏng và đo đạc thực nghiệm trong ba trường hợp: hệ thống ban đầu, hệ thống khi sử dụng tấm MM phẳng và hệ thống khi sử dụng tấm MM có thể cuộn hoặc gấp. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm thu được nhằm khẳng định tính đúng đắn của nghiên cứu, cũng như giúp làm rõ vai trò của tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp trong việc tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT khi có sai lệch. Kết quả nghiên cứu có thể mở ra khả năng ứng dụng cho các hệ thống MR-WPT, đặc biệt là các hệ thống MR-WPT có sai lệch trục hoặc sai lệch góc hoặc hệ thống MR-WPT chịu đồng thời sai lệch trục và sai lệch góc.

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

Hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM có thể cuộn hoặc gấp được đề xuất có cấu trúc như được minh họa trong [Hình 3.10](#). Hệ thống MR-WPT này là hệ thống MR-WPT đối xứng với cấu trúc 4 cuộn dây: cuộn nguồn, cuộn cộng hưởng phát Tx, cuộn cộng hưởng thu Rx và cuộn tải. Trong đó, Tx và Rx có thiết kế giống nhau, dạng hình xoắn ốc với đường kính ngoài 188 mm và được gắn một tụ điện ngoài để chuyển tần số cộng hưởng của chúng từ tần số cộng hưởng riêng của xoắn ốc về tần số hoạt động của hệ thống là 13,56 MHz. Cuộn nguồn và cuộn tải là các cuộn dây

một vòng với đường kính ngoài 120 mm. Tấm vật liệu MM được thêm vào hệ thống MR-WPT, đặt chính giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu nhằm cải thiện hiệu suất của hệ thống. Tấm vật liệu MM được đề xuất trong nghiên cứu này có cấu trúc 6×5 ô cơ sở và có kích thước $300 \times 250 \text{ mm}^2$. Như minh họa trong **Hình 3.10**, tấm vật liệu MM có thể cuộn vào thanh hình trụ ở trên, do đó tấm vật liệu MM có thể cuộn lại khi không sử dụng hoặc sử dụng một phần để kiểm soát hiệu suất truyền dẫn của hệ thống.

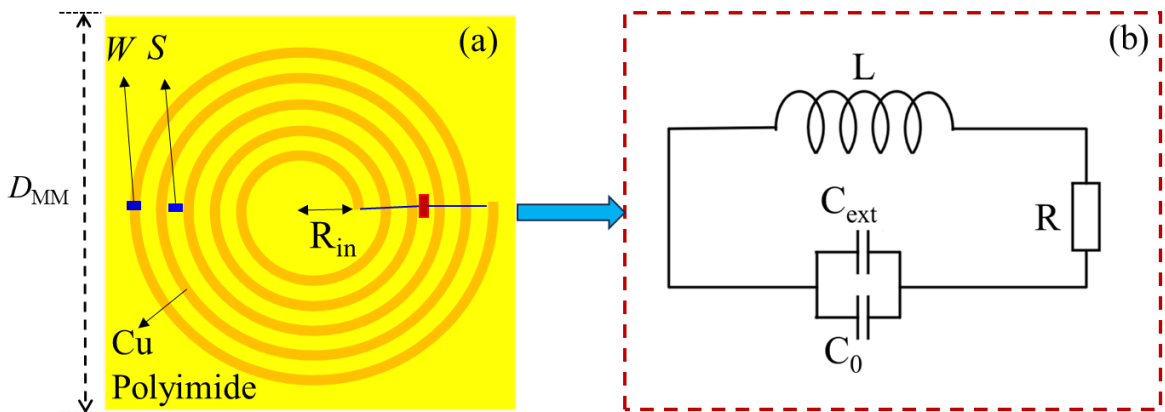


Hình 3.10. Sơ đồ hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có thể cuộn.

Để thiết kế, chế tạo tấm vật liệu MM linh hoạt theo ý tưởng nêu trên, chúng tôi tham khảo một số các nghiên cứu sử dụng cấu trúc có hiệu quả cao trong WPT [97], [98] và từ đó lựa chọn cấu trúc xoắn ốc tròn gắn thêm tụ điện ngoài - một cấu trúc hiệu quả để chế tạo vật liệu MM có hệ số phẩm chất cao và hoạt động ở dải tần số MHz thấp [99]. Trên cơ sở xác định tổng kích thước của tấm cũng như số lượng ô cơ sở trên tấm, chúng tôi xây dựng ô cơ sở MM có dạng hình vuông với tổng kích thước $D_{MM} = 50 \text{ mm}$. Với mỗi ô cơ sở, cố định bán kính trong của xoắn ốc tròn là $R_{in} = 8 \text{ mm}$, phương pháp mô phỏng được chúng tôi thực hiện để tối ưu hóa các tham số cấu trúc khác của ô cơ sở nhằm thu được vật liệu MM có hệ số phẩm chất Q cao.

Hình 3.11(a) mô tả ô cơ sở vật liệu MM. Mỗi ô cơ sở này được cấu tạo từ cuộn xoắn ốc tròn 5 vòng và được đề xuất chế tạo trên đế polyimide mỏng với độ dày 0,1 mm và hằng số điện môi là 3,4. Nhờ độ dày rất mỏng của đế polyimide, tấm vật liệu MM được thiết kế để có thể dễ dàng cuộn trên thanh hình trụ hoặc gấp lại tùy theo ứng dụng. Độ dày của lớp đồng Cu làm cuộn xoắn ốc của ô cơ sở là 0,035 mm; dây

làm cuộn xoắn ốc có chiều rộng dải $W = 2$ mm; khoảng cách giữa các dải là $S = 1$ mm. Các mặt trước và mặt sau của ô cơ sở được kết nối bằng hai lỗ thông nhằm cung cấp đường dẫn kết nối tụ điện bên ngoài với xoắn ốc nằm ở mặt bên kia của cấu trúc. Mỗi cuộn xoắn ốc này có tần số cộng hưởng riêng cao, tương tự như tần số cộng hưởng riêng của cuộn cộng hưởng phát/thu. Do đó để tần số cộng hưởng của mỗi ô cơ sở vật liệu MM phù hợp với tần số hoạt động của hệ thống MR-WPT, một tụ điện ngoài được gắn vào cuộn xoắn ốc làm ô cơ sở, từ đó giúp điều chỉnh từ tần số cộng hưởng riêng của xoắn ốc xuống tần số hoạt động của hệ thống MR-WPT. Trong nghiên cứu này, để thiết kế tấm vật liệu MM hoạt động ở tần số 13,56 MHz của hệ thống MR-WPT, một tụ điện với điện dung 180 pF đã được sử dụng. Ô cơ sở vật liệu MM có thể được mô hình hóa bằng một mạch điện đơn giản với các phần tử: độ tự cảm riêng (L), điện trở nối tiếp (R), điện dung riêng (C_0) và tụ điện bên ngoài (C_{ext}) – tương tự như đã trình bày trong các phần trước.

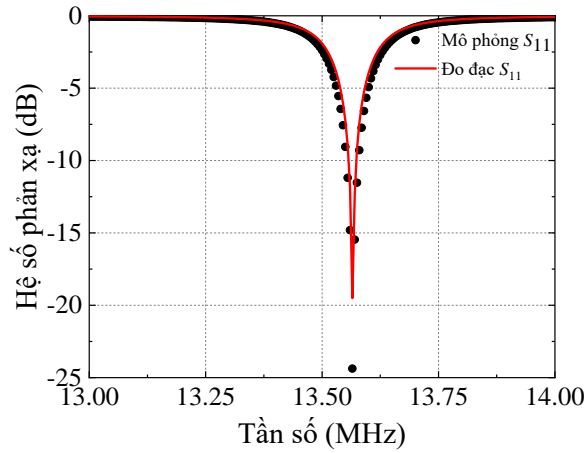


Hình 3.11. (a) Thiết kế ô cơ sở vật liệu MM, (b) mạch tương đương của ô cơ sở.

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

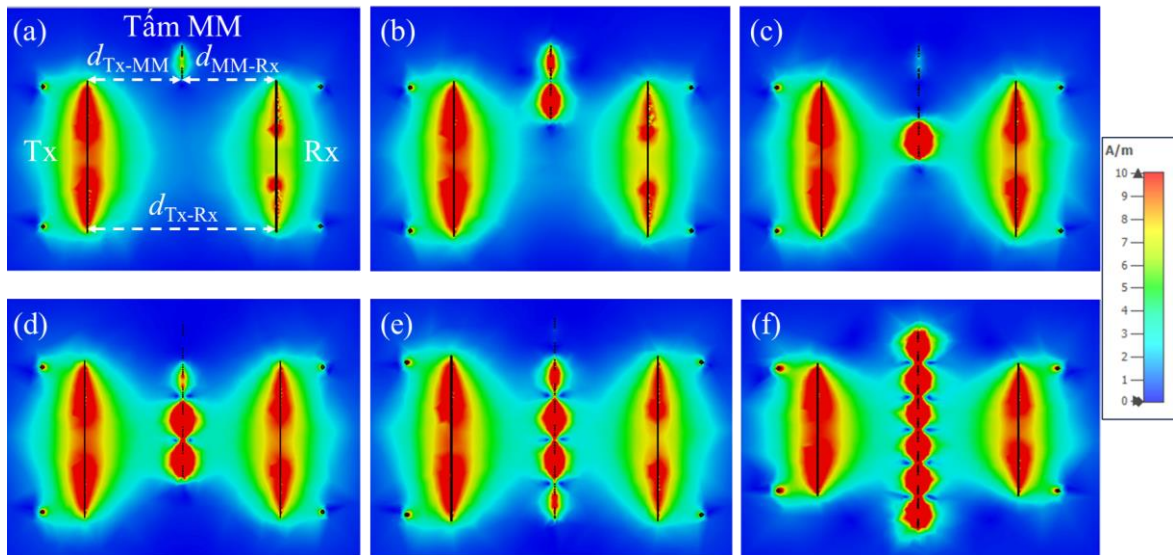
Bằng mô phỏng chúng tôi đã tối ưu các tham số cấu trúc của ô cơ sở sao cho chúng hoạt động ở tần số làm việc của hệ thống MR-WPT là 13,56 MHz. Sau đó, ô cơ sở vật liệu MM được chế tạo theo các thông số tối ưu và xác định tần số cộng hưởng nhằm xác định sự phù hợp giữa mô phỏng và thực nghiệm.

Hình 3.12 thể hiện kết quả mô phỏng và đo đạc đối với hệ số phản xạ (S_{11}) của ô cơ sở vật liệu MM gồm xoắn ốc gắn thêm một tụ điện ngoài. Kết quả cho thấy, tần số cộng hưởng của ô cơ sở là 13,56 MHz, độ phản xạ là -24,8 dB đối với kết quả mô phỏng và là -19,9 dB đối với kết quả đo đạc. Điều này có nghĩa ô cơ sở vật liệu MM hay tấm vật liệu MM hoạt động tốt ở tần số làm việc của hệ thống MR-WPT.



Hình 3.12. Tần số cộng hưởng mô phỏng và đo đạc của ô cơ sở vật liệu MM.

Tiếp theo, để phân tích hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có thể cuộn hoặc gấp được đề xuất, các mô phỏng điện từ đã được thực hiện bằng phần mềm CST Studio Suite. [Hình 3.13\(a-f\)](#) thể hiện phân bố từ trường H xung quanh hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có thể cuộn, trong đó chiều dài tấm vật liệu MM được tăng dần bằng cách thả dần từng hàng ô cơ sở trong tấm vật liệu MM. Trong cấu hình này, khoảng cách giữa cuộn dây Tx và Rx là $d_{Tx-Rx} = 250$ mm và tấm vật liệu MM được đặt ở chính giữa Tx và Rx, do đó $d_{Tx-MM} = d_{MM-Rx} = 125$ mm.



Hình 3.13. Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có thể cuộn được thả dần từng hàng ô cơ sở vật liệu MM: (a) 1 hàng, (b) 2 hàng, (c) 3 hàng, (d) 4 hàng, (e) 5 hàng, (f) 6 hàng.

Kết quả mô phỏng phân bố từ trường cho thấy khi tấm vật liệu MM được thả dần từng hàng ô cơ sở, cường độ từ trường H tại cuộn cộng hưởng thu sẽ tăng dần, điều này ngụ ý rằng hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT được cải thiện. Đồng

thời, việc quan sát phân bố từ trường ở hai bên của tấm vật liệu MM cũng cung cấp bằng chứng cho thấy sự liên kết từ trường giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu được tăng cường. Để làm rõ phân tích này, từ mô phỏng điện từ, hệ số truyền qua và từ đó hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có thể cuộn cũng được xác định và trình bày trong **Bảng 3.2**.

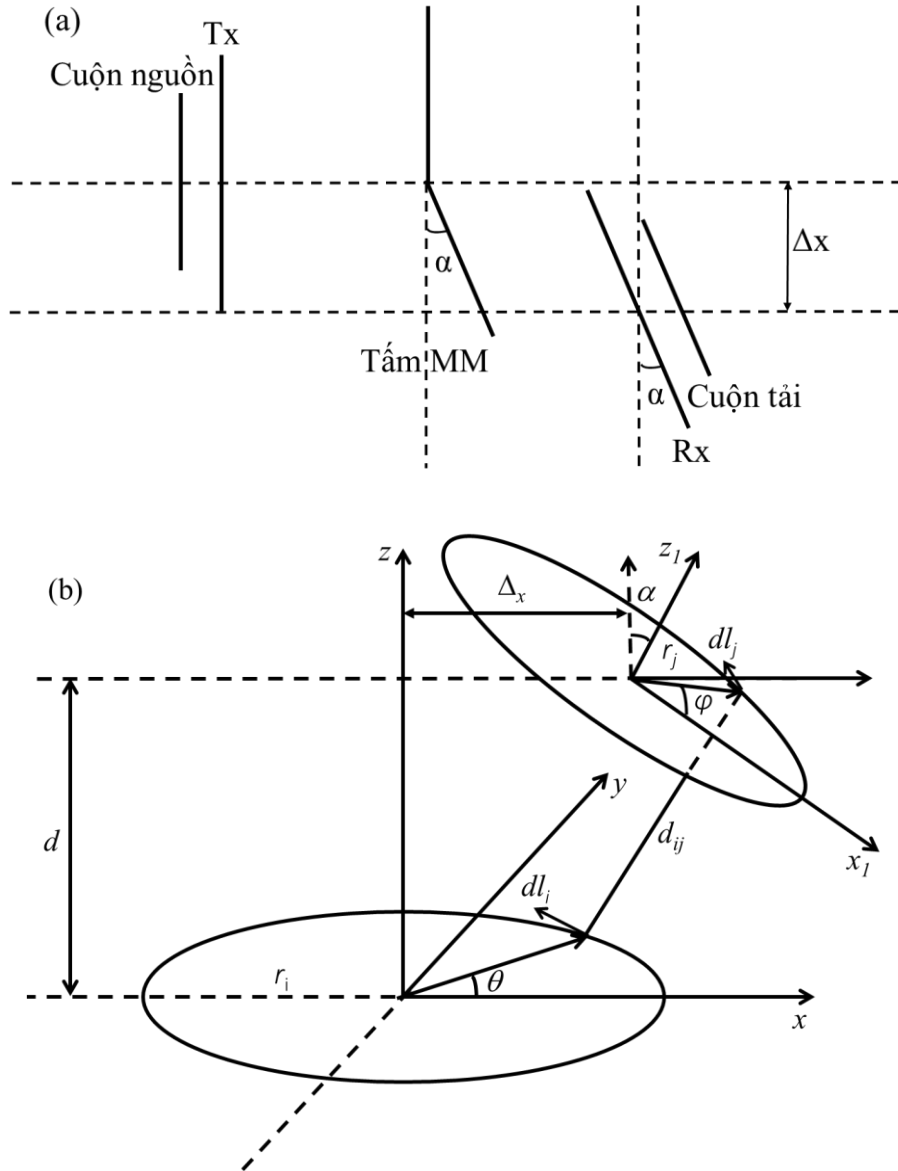
Bảng 3.2. Hệ số truyền qua S_{21} và hiệu suất η của hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có thể cuộn khi $d_{Tx-Rx} = 250$ mm và $d_{Tx-MM} = d_{MM-Rx} = 125$ mm.

Hệ thống MR-WPT	Ban đầu	1 hàng MM	2 hàng MM	3 hàng MM	4 hàng MM	5 hàng MM	6 hàng MM
S_{21}	0,55	0,57	0,58	0,62	0,66	0,68	0,71
η (%)	30,25	32,49	33,64	38,44	43,56	46,24	50,41

Kết quả ở **Bảng 3.2** cho thấy, trong trường hợp hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM với 1 hàng ô cơ sở, hiệu suất của hệ thống là 32,49%, tăng nhẹ so với hiệu suất 30,25% của hệ thống ban đầu khi chưa sử dụng tấm vật liệu MM. Khi số hàng ô cơ sở của tấm vật liệu MM tăng dần, hiệu suất của hệ thống được cải thiện dần và đạt 50,41% khi sử dụng tấm vật liệu MM hoàn chỉnh gồm sáu hàng ô cơ sở. Kết quả này cho thấy sự phù hợp giữa hiệu suất và phân bố từ trường xác định được từ mô phỏng. Đặc biệt quan sát phân bố từ trường trong **Hình 3.13(f)** có thể thấy rằng: tấm vật liệu MM hoàn chỉnh với 6 hàng ô cơ sở bao trùm toàn bộ vùng tương tác từ trường giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu. Do đó, nếu có tăng thêm nữa số lượng hàng ô cơ sở trong cấu trúc tấm vật liệu MM cũng không giúp cải thiện đáng kể hiệu suất truyền dẫn của hệ thống.

Các phân tích, mô phỏng ở trên tập trung xem xét hệ thống MR-WPT không đối xứng và không có sai lệch. Tuy nhiên, trong nhiều ứng dụng thực tế, cuộn cộng hưởng phát/thu có thể chịu sự sai lệch trục hoặc sai lệch góc hoặc cả sai lệch trục và góc, từ đó dẫn đến làm giảm hiệu suất của hệ thống. **Hình 3.14(a)** mô tả hệ thống MR-WPT với các cuộn cộng hưởng Tx và Rx bị sai lệch cả trục và góc. Để khảo sát ảnh hưởng của sự sai lệch trục và góc, chúng tôi xem xét cấu hình của hai cuộn cộng hưởng xuất phát từ cấu hình của hai vòng dây như minh họa trong **Hình 3.14(b)**. Trong cấu hình của hệ thống MR-WPT được đề xuất, cuộn cộng hưởng thu Rx sai lệch trục một khoảng Δx và sai lệch góc một góc α . Các tham số sai lệch này sẽ làm thay đổi hệ số ghép cặp k giữa hai cuộn cộng hưởng và do đó ảnh hưởng đến hiệu

suất của hệ thống. Ảnh hưởng của các thông số hình học đến hệ số ghép cặp của hai cuộn cộng hưởng được làm sáng tỏ trong các phân tích sau.



Hình 3.14. (a) Sơ đồ hệ thống MR-WPT với cuộn cộng hưởng thu lệch trục và lệch góc khi sử dụng tấm vật liệu MM có thể gấp, (b) sơ đồ hai vòng dây lệch trục Δx và lệch góc α .

Hệ số ghép cặp của hai cuộn dây i và j được biểu diễn theo công thức sau:

$$k_{ij} = \beta \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} M_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}} \tag{3.9}$$

Trong đó n và m là số vòng của mỗi cuộn, $\beta = 4/\pi$ là hệ số hình dạng của cuộn dây [28]. Dựa trên công thức Newwam, hồ cảm giữa hai vòng dây có thể tính toán:

$$M_{ij} = \frac{\mu_0 r_i r_j}{4\pi} \frac{d\vec{l}_i d\vec{l}_j}{d_{ij}} \quad (3.10)$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \iint \frac{\sin \theta \sin \varphi \cos \alpha + \cos \theta \cos \varphi}{\sqrt{\left[r_i^2 + r_j^2 + d^2 + \Delta x^2 + 2\Delta x r_j \cos \varphi \cos \alpha - 2\Delta x r_i \cos \varphi - \right.}} d\varphi d\theta$$

$$\left. \sqrt{2r_i r_j (\cos \theta \cos \varphi \cos \alpha + \sin \theta \sin \varphi) - 2r_j d \cos \varphi \sin \alpha} \right]} d_{ij}$$

Trong đó: r_i, r_j là bán kính của hai vòng dây, d là khoảng cách giữa hai vòng khi chúng đồng trục, Δx là độ lệch so với trục của hai vòng dây, các góc θ, φ, α như mô tả trong [Hình 3.14\(b\)](#). Các đại lượng trong phương trình (3.10) được xác định:

$$d\vec{l}_i = r_i (-\sin \theta \vec{x} + \cos \theta \vec{y}) d\theta \quad (3.11)$$

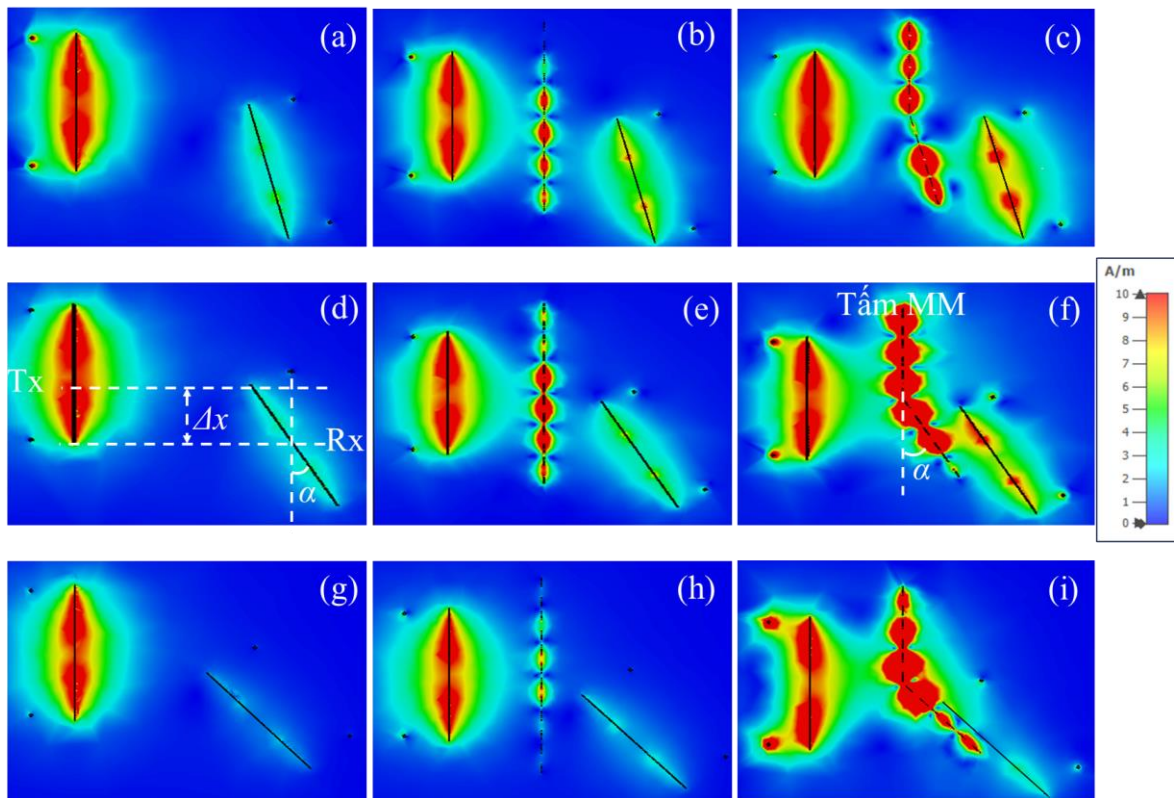
$$d\vec{l}_j = r_j (-\sin \varphi \cos \alpha \vec{x} + \cos \varphi \vec{y} + \sin \varphi \sin \alpha \vec{z}) d\varphi \quad (3.12)$$

$$d_{ij} = \left| (\Delta x + r_j \cos \varphi \cos \alpha, r_j \sin \varphi, d - r_j \cos \varphi \sin \alpha) - (r_i \cos \theta, r_i \sin \theta, 0) \right| \quad (3.13)$$

Như vậy trong hệ thống MR-WPT có sai lệch trục hoặc sai lệch góc hoặc cả sai lệch trục và sai lệch góc, hệ số ghép cặp giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu sẽ bị giảm đáng kể, điều đó dẫn tới suy giảm hiệu suất của hệ thống. Mô phỏng điện từ được thực hiện để khảo sát phân bố từ trường của các hệ thống MR-WPT có Rx sai lệch trục $\Delta x = 100$ mm và ở các góc sai lệch khác nhau ($15^\circ, 30^\circ$ và 45°). Đối với hệ thống MR-WPT chịu sự sai lệch này, để hạn chế sự suy giảm hiệu suất của hệ thống, tấm vật liệu MM chúng tôi đề xuất có thể gấp theo góc sai lệch của cuộn cộng hưởng thu, nhờ đó làm giảm đáng kể sự suy giảm hiệu suất của hệ thống. Để khảo sát ảnh hưởng của tấm vật liệu MM đối với hiệu suất của hệ thống MR-WPT, với từng góc lệch khác nhau của cuộn cộng hưởng thu Rx, chúng tôi lần lượt khảo sát phân bố từ trường trong hệ thống ban đầu, trong hệ thống với tấm vật liệu MM thẳng và trong hệ thống với tấm vật liệu MM gấp ở các góc khác nhau tương ứng với góc lệch của Rx. Các phân bố từ trường thu được từ các mô phỏng này được thể hiện trong [Hình 3.15](#).

[Hình 3.15\(a\)](#) cho thấy phân bố từ trường xung quanh hệ thống MR-WPT khi Rx lệch trục $\Delta x = 100$ mm và lệch góc 15° . Do độ lệch trục lớn nên với góc lệch $\alpha = 15^\circ$, từ trường H tại cuộn cộng hưởng thu yếu so với trường H tại cuộn cộng hưởng phát và khi đó hiệu suất truyền dẫn của hệ thống giảm đáng kể xuống còn 12,96%.

Khi tấm vật liệu MM được đặt vào chính giữa hệ thống này (như minh họa trong [Hình 3.15\(b\)](#)), từ trường H tại cuộn cộng hưởng thu được tăng lên và tương ứng hiệu suất của hệ thống MR-WPT tăng lên 26,01%. Một số nghiên cứu trước đây cũng đã khảo sát các cấu hình này [111], [112] và cho kết quả tương tự về sự tăng hiệu suất. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất tấm vật liệu MM với tính chất mới là có khả năng gấp theo góc sai lệch của Rx và nhờ đó hiệu suất truyền dẫn của hệ thống đã được cải thiện hơn nữa, lên 37,21%. Điều này cũng được minh chứng bằng sự tăng cường cường độ từ trường ở cuộn cộng hưởng thu Rx, như quan sát thấy trong [Hình 3.15\(c\)](#).



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

Khi góc sai lệch tăng lên đến 30° và 45° , phân bố từ trường tương ứng được thể hiện trong [Hình 3.15\(d-f\)](#) và [Hình 3.15\(g-i\)](#). Phân bố từ trường trong hai trường hợp này tuân theo xu hướng tương tự như trong trường hợp sai lệch góc 15° . Tuy nhiên, do góc sai lệch lớn hơn nên cường độ từ trường phân bố ở Rx nhỏ hơn. Do đó, hệ số truyền qua và hiệu suất của hệ thống nhỏ hơn trường hợp sai lệch góc 15° . Do những hạn chế về cấu hình, nếu góc nghiêng tăng thêm, tấm vật liệu MM sẽ đặt quá

gần Rx, điều này sẽ làm giảm đáng kể hiệu suất của hệ thống MR-WPT do tương tác quá mức. Nếu xét với các cấu hình Δx khác, góc sai lệch cho phép có thể lớn hơn góc sai lệch trong trường hợp trên. Cũng từ mô phỏng điện từ, hệ số truyền qua và từ đó hiệu suất của các hệ thống trong các cấu hình khác nhau cũng lần lượt được xác định và trình bày trong **Bảng 3.3**.

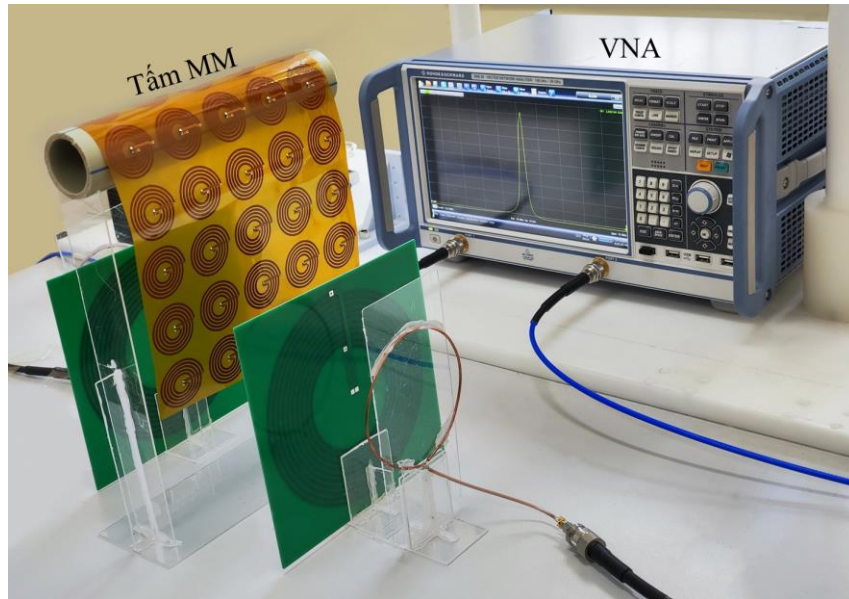
Bảng 3.3. Hệ số truyền qua và hiệu suất của hệ thống MR-WPT có cuộn cộng hưởng thu Rx lệch trục $\Delta x = 100$ mm, lệch góc $\alpha = 15^\circ, 30^\circ$ và 45° sử dụng tấm vật liệu MM có thể gấp theo góc lệch của Rx

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

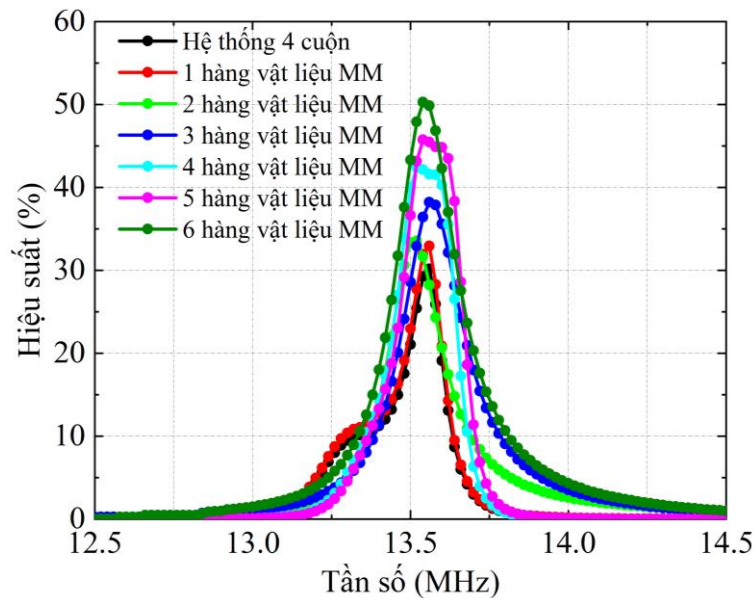
3.2.3. Chế tạo và thực nghiệm đo đạc hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp

Để xác nhận các kết quả phân tích và mô phỏng được trình bày ở các phần trước trong nghiên cứu này, một hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có thể cuộn hoặc gấp đã được xây dựng dựa trên mô tả ở **Hình 3.9** và được thể hiện như trong **Hình 3.16**. Trong hệ thống này, tương tự các nghiên cứu trước, các cuộn cộng hưởng phát/thu và tấm vật liệu MM cũng được chế tạo bằng phương pháp quang khắc nhằm giảm thiểu các lỗi chế tạo và dễ dàng sao chép. Chất nền được sử dụng cho cuộn cộng hưởng phát/thu (Tx/Rx) là FR-4 với độ dày 1,6 mm. Tần số cộng hưởng của cuộn cộng hưởng phát/thu và tấm vật liệu MM đều là 13,56 MHz, tần số này được điều chỉnh bằng cách lần lượt gắn thêm các tụ điện ngoài lên các cuộn xoắn ốc làm các cuộn cộng hưởng. Sau khi chế tạo và xây dựng phương pháp đo đạc cho hệ thống

MR-WPT (Hình 3.16), hiệu suất của hệ thống được đo bằng máy phân tích mạng vectơ VNA và được xác định thông qua $|S_{21}|^2$ [61]. Kết quả thu được được thể hiện như Hình 3.17.



Hình 3.16. Thiết lập thí nghiệm đo đặc hiệu suất của hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có thể uốn hoặc gấp.

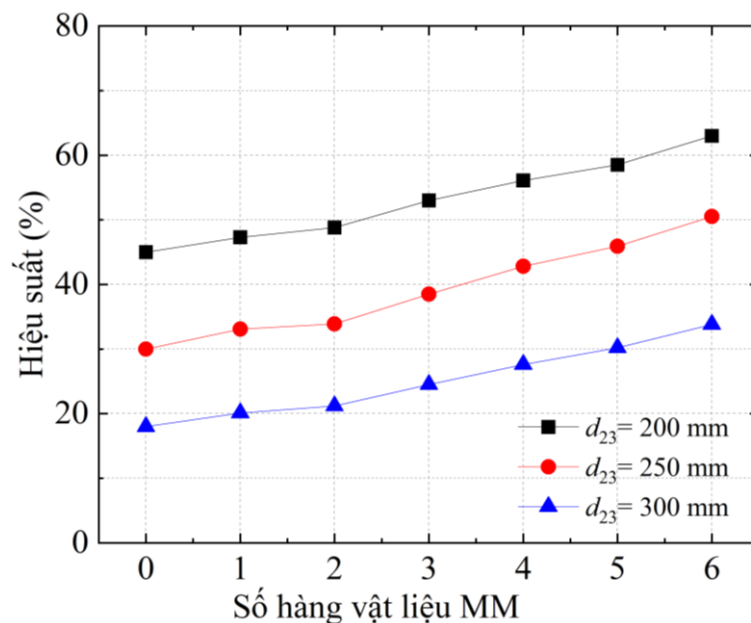


Hình 3.17. Hiệu suất đo đặc của hệ thống MR-WPT ban đầu và khi sử dụng tấm vật liệu MM có thể cuộn được thả dần từng hàng ô cơ sở vật liệu MM như minh họa trong Hình 3.13 ở khoảng cách truyền dẫn $d_{Tx-Rx} = 250$ mm.

Hình 3.17 trình bày hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT ở khoảng cách truyền dẫn $d_{Tx-Rx} = 250$ mm đối với các cấu hình khác nhau: hệ thống MR-WPT ban đầu và hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM có số hàng ô cơ sở thay đổi từ 1 đến

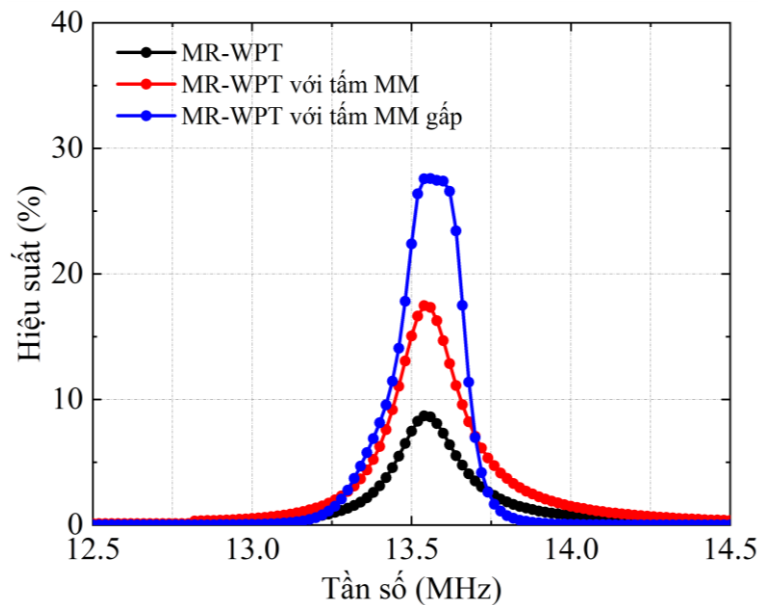
6 hàng. Đối với hệ thống MR-WPT ban đầu, hiệu suất truyền dẫn đạt được ở mức 32,3%. Trong trường hợp tẩm vật liệu MM có thể cuộn được chèn vào chính giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu, hiệu suất của hệ thống tăng từ 32,3% lên 50,5% khi tẩm vật liệu MM được thả dần từ 1 hàng ô cơ sở đến 6 hàng ô cơ sở (cả tẩm vật liệu MM). Kết quả này cho thấy sự phù hợp giữa kết quả đo đạc với kết quả mô phỏng về phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT được hiển thị trong [Hình 3.15](#) và kết quả mô phỏng xác định hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT được thể hiện trong [Bảng 3.2](#). Đối với hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT, kết quả đo đạc và kết quả mô phỏng có sự sai lệch nhỏ (sai lệch lớn nhất nhỏ hơn 7%), điều này có thể giải thích do những thay đổi trong quá trình sản xuất và đo lường đối với hệ thống.

Để có phân tích toàn diện hơn về hiệu quả của tẩm vật liệu MM, phép đo được minh họa trong [Hình 3.17](#) đã được sao chép với các khoảng cách truyền dẫn khác nhau. Các kết quả đo đạc về đỉnh hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT với các khoảng cách truyền dẫn d_{Tx-Rx} lần lượt là 200 mm, 250 mm và 300 mm tương ứng được thể hiện bằng đường màu đen, màu đỏ và xanh lam trong [Hình 3.18](#). Kết quả chứng minh rằng tẩm vật liệu MM có thể cải thiện hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT ở các khoảng cách truyền dẫn khác nhau. Hiển nhiên, hiệu suất sẽ cao hơn ở khoảng cách truyền dẫn ngắn hơn (200 mm) và ngược lại, hiệu suất sẽ thấp hơn ở khoảng cách truyền dẫn xa hơn (300 mm).



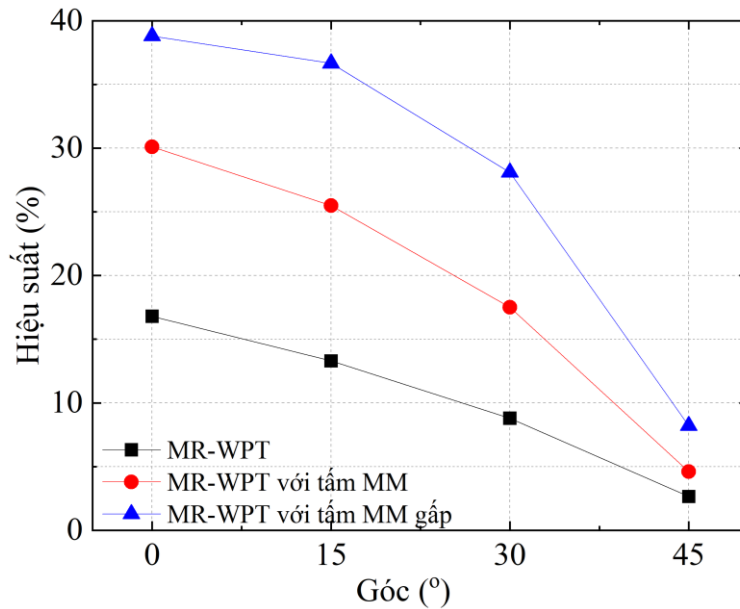
[Hình 3.18](#). Đỉnh hiệu suất đo đạc của hệ thống MR-WPT sử dụng tẩm vật liệu MM với ba khoảng cách d_{Tx-Rx} lần lượt là 200 mm, 250 mm và 300 mm.

Hiệu suất của hệ thống MR-WPT có cuộn cộng hưởng thu Rx lệch $\Delta x = 100$ mm so với trục của Tx/Rx ban đầu, lệch góc $\alpha = 30^\circ$ so với Tx và sử dụng tấm vật liệu MM gấp theo góc sai lệch của Rx, như minh họa trong [Hình 3.15](#), được đo đạc và thể hiện trong [Hình 3.19](#). Kết quả ở [Hình 3.19](#) cho thấy hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT thấp, hiệu suất tối đa chỉ đạt 8,8% (đường cong màu đen). Khi sử dụng tấm vật liệu MM phẳng, hiệu suất có thể tăng lên tối đa là 17,5% (đường cong màu đỏ). Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây sử dụng tấm vật liệu MM để điều chỉnh hiệu suất của hệ thống MR-WPT bị sai lệch [74], [75]. Trong nghiên cứu này, tấm vật liệu MM được đề xuất có thể được gấp để phù hợp với cuộn cộng hưởng thu Rx, dẫn đến cải thiện hơn nữa hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT và đạt được hiệu tối đa lên tới 28,1% (đường cong màu xanh lam).



[Hình 3.19](#). Hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT khi cuộn cộng hưởng thu Rx lệch $\Delta x = 100$ mm so với trục của Tx/Rx ban đầu, lệch góc $\alpha = 30^\circ$ so với Tx và khi sử dụng tấm vật liệu MM thẳng, tấm vật liệu MM gấp theo góc sai lệch của Rx như minh họa ở [Hình 3.15](#)(d), (e), (f).

Hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT có cuộn cộng hưởng thu Rx lệch trục $\Delta x = 100$ mm và sai lệch góc ở các góc khác nhau từ 0° đến 45° được thể hiện trong [Hình 3.20](#). Kết quả thực nghiệm này có sai lệch nhỏ so với kết quả mô phỏng ở [Bảng 3.3](#), nguyên nhân có thể do sai số trong quá trình chế tạo và đo đạc. Các kết quả này đều chứng minh rằng tấm vật liệu MM có thể gấp linh hoạt theo hướng sai lệch của Rx có hiệu quả cao trong các ứng dụng thực tế mà ở đó Rx chịu cả sai lệch trục và sai lệch góc.



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

Như vậy, bằng việc đề xuất sử dụng tấm vật liệu MM có thể cuộn hoặc gấp trong hệ thống MR-WPT, hiệu suất của hệ thống đã được cải thiện đáng kể cả trong trường hợp hệ thống không chịu sai lệch và trường hợp hệ thống chịu sai lệch trục và sai lệch góc. Cụ thể, việc sử dụng tấm vật liệu MM có thể cuộn giúp cải thiện hiệu suất của hệ thống MR-WPT từ 30% lên 50,5% ở khoảng cách truyền 250 mm khi sử dụng toàn bộ tấm vật liệu MM và khi không cần sử dụng hoặc cần sử dụng một phần để kiểm soát hiệu suất, tấm vật liệu MM có thể được cuộn lại một cách thuận tiện. Đối với hệ thống MR-WPT có cuộn cộng hưởng thu đồng thời chịu sai lệch trục so với trục của Tx/Rx ban đầu và sai lệch góc so với Tx, việc sử dụng tấm vật liệu MM có thể gấp về phía Rx (song song với Rx) cũng giúp cải thiện đáng kể hiệu suất của hệ thống. Trong trường hợp độ lệch trục là 100 mm và độ lệch góc 30° , việc sử dụng tấm vật liệu MM đã giúp tăng cường hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT từ 8,8% lên 28,1%. Tấm vật liệu MM có thể cuộn hoặc gấp cho thấy tiềm năng đáng kể để triển khai trong các hệ thống điện tử hiện đại kết hợp ngày càng nhiều các sản phẩm có thể cuộn hoặc/và có thể gấp lại. Mức độ linh hoạt cao của tấm vật liệu MM tạo điều kiện tích hợp liền mạch vào các hình dạng và bề mặt phức tạp, khiến nó phù hợp với nhiều ứng dụng khác nhau trong các hệ thống điện tử phức tạp, bao gồm các thiết bị đeo, hệ thống IoT và thiết bị y tế cấy ghép.

3.3. Kết luận chương 3

Trong chương này, bằng phương pháp tính toán lý thuyết và mô hình hoá, mô phỏng kết hợp với thực nghiệm, chúng tôi đã khảo sát được các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống MR-WPT cơ bản trong môi trường dẫn điện và đã nghiên cứu thiết kế, chế tạo được tấm vật liệu MM nhằm tăng cường hiệu suất của hệ thống. Qua các kết quả nghiên cứu, chúng tôi thu được một số kết luận như sau:

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

ii) Tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp đã giúp cải thiện đáng kể hiệu suất của hệ thống MR-WPT đối xứng trong cả hai trường hợp: không chịu sai lệch hoặc chịu cả sai lệch trục và sai lệch góc. Trong trường hợp sử dụng tấm dưới dạng có thể cuộn cho hệ thống không chịu sai lệch, hiệu suất của hệ thống đã được cải thiện đáng kể từ 30% khi không sử dụng tấm vật liệu MM lên 50,5% khi sử dụng toàn bộ tấm vật liệu MM ở khoảng cách truyền dẫn 250 mm. Trong trường hợp này cũng có thể cuộn một phần tấm MM để kiểm soát hiệu suất của hệ thống. Trong trường hợp sử dụng tấm MM dưới dạng gấp (gấp song song với cuộn cộng hưởng thu) cho hệ thống MR-WPT có cuộn cộng hưởng thu đồng thời chịu sai lệch trục (so với trục của cuộn cộng hưởng phát/thu ban đầu) và sai lệch góc (so với cuộn cộng hưởng phát) đã giúp cải thiện đáng kể hiệu suất của hệ thống. Cụ thể, với độ lệch trục là 100 mm và độ lệch góc 30° , sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt này đã giúp hiệu suất của hệ thống MR-WPT tăng từ 8,8% lên 28,1%. Như vậy, tấm vật liệu MM linh

hoạt có thể cuộn hoặc gấp cho thấy tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống điện tử hiện đại kết hợp ngày càng nhiều các sản phẩm có thể cuộn hoặc/và có thể gấp.

Các kết quả nghiên cứu trong chương này đã được đăng trên tạp chí SCIE và trong “Danh mục công trình công bố liên quan đến luận án” là công trình 1 và công trình 4.

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

Xuất phát từ những hạn chế trong nghiên cứu sử dụng vật liệu MM cho hệ thống MR-WPT, bao gồm: thứ nhất hầu hết các hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM đã được triển khai nghiên cứu là các hệ thống đối xứng hoặc là các hệ thống không hoặc ít có sai lệch trục hay sai lệch góc; thứ hai hầu hết các cấu trúc vật liệu MM sử dụng trong hệ thống có cấu hình phẳng với chất nền cứng nên hạn chế khả năng ứng dụng; thứ ba là hiện nay các hệ thống vẫn tồn tại hạn chế về hiệu suất và khoảng cách truyền dẫn. Đồng thời xuất phát từ các yêu cầu thực tế ngày càng cao đối với hệ thống MR-WPT bao gồm cần có hiệu suất cao, khoảng cách truyền dẫn ngày càng mở rộng và hệ thống có thể không đối xứng hoặc có sai lệch trục hoặc/và sai lệch góc hoặc cấu trúc vật liệu có thể biến đổi linh hoạt để phù hợp với các ứng dụng. Để giải quyết vấn đề tăng cường hiệu suất, khoảng cách truyền dẫn, cũng như tăng khả năng ứng dụng của hệ thống MR-WPT trong cả trường hợp hệ thống không có sai lệch và trường hợp hệ thống có sai lệch trục hoặc/và có sai lệch góc, trong chương 3 chúng tôi đã đề xuất sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt có thể cuộn hoặc gấp và kết quả cho thấy hiệu suất của hệ thống đã được cải thiện đáng kể khi sử dụng cấu trúc này.

Mặc dù vật liệu MM đã thể hiện tốt vai trò tăng cường hiệu suất hệ thống MR-WPT khi không có và khi có sai lệch, tuy nhiên trong một số ứng dụng thực tế lại yêu cầu các bề mặt thu nhận năng lượng có thể uốn cong linh hoạt. Từ thực tế đó, trong chương này chúng tôi đề xuất một cấu trúc vật liệu MM linh hoạt có thể uốn cong và có khả năng định xứ từ trường nhằm tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT bất đối xứng hoạt động ở tần số 13,56 MHz. Trong nghiên cứu này, tấm vật liệu MM chúng tôi đề xuất được chế tạo trên đế FR-4 với độ dày nhỏ để có thể uốn cong. Đồng thời, một hốc cộng hưởng được hình thành trên tấm vật liệu MM bằng cách điều khiển tần số cộng hưởng của ô cơ sở vật liệu MM bởi một tụ điện gắn ngoài, từ đó tấm vật liệu MM thu được là tấm vật liệu không đồng nhất có thể định xứ từ trường. Hiệu suất của hệ thống MR-WPT không đối xứng sử dụng tấm MM linh hoạt này được chúng tôi khảo sát bằng mô phỏng và đo đạc thực nghiệm nhằm khẳng định vai trò của cấu trúc vật liệu MM với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong trong tăng cường hiệu suất của hệ thống và nhằm tìm ra cấu hình uốn cong phù hợp để tối ưu hoá hiệu suất của hệ thống. Kết quả nghiên cứu có thể mở ra khả năng ứng dụng của tấm vật

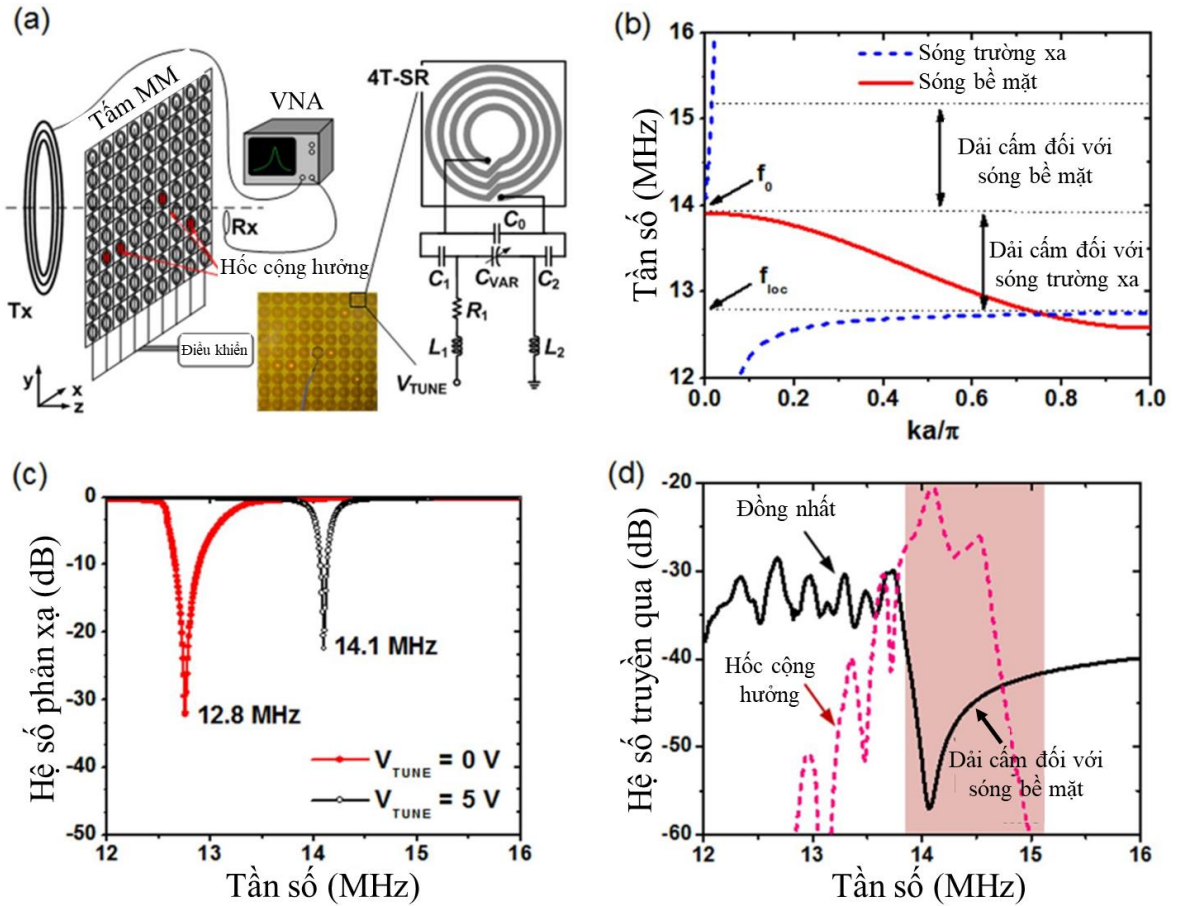
liệu MM linh hoạt đối với các hệ thống MR-WPT, đặc biệt là các hệ thống MR-WPT không đối xứng có thể uốn cong.

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

Hốc cộng hưởng hay vùng tập trung năng lượng từ trường trong WPT là khái niệm được đề xuất bởi Ranaweera và cộng sự nhằm giải quyết hạn chế của WPT trong kiểm soát cường độ cũng như hình dạng của vùng định xứ từ trường [78]. Bằng cách đề xuất sử dụng hốc cộng hưởng, Ranaweera và cộng sự đã chứng minh bằng thực nghiệm rằng vị trí, hình dạng và cường độ của vùng tập trung năng lượng từ trường trong WPT có thể được điều chỉnh theo mong muốn. Trên cơ sở đó, hốc cộng hưởng giúp tăng cường hiệu quả truyền năng lượng cho vị trí cần thiết, đồng thời giảm rò rỉ từ trường đến các khu vực khác. Trong nghiên cứu đó, cơ chế hoạt động của hốc cộng hưởng cũng đã được chỉ ra và được minh họa như trong [Hình 4.1](#).

[Hình 4.1\(a\)](#) minh họa cho sự hoạt động của tấm vật liệu MM chủ động. Trong tấm, tần số cộng hưởng của các ô cơ sở được thay đổi theo điện dung của tổ hợp nối tiếp C_{VAR} , C_1 và C_2 . Giá trị C_{VAR} thay đổi theo V_{TUNE} , tại $V_{TUNE} = 0$ và 5 V thì C_{VAR} lần lượt là 50 và 5 pF. Sử dụng hai giá trị C_{VAR} , các ô cơ sở trên tấm vật liệu MM có thể điều chỉnh để chuyển đổi hoạt động ở hai tần số riêng biệt, như thể hiện trong [Hình 4.1\(c\)](#). Khi điều chỉnh $V_{TUNE} = 0$ V, ô cơ sở cộng hưởng tại tần số $f_{loc} = 12,8$ MHz và khi điều chỉnh $V_{TUNE} = 5$ V, ô cơ sở cộng hưởng tại $f_0 = 14,1$ MHz. Để tạo ra được hốc cộng hưởng, các ô cơ sở xung quanh ô cơ sở được xác định để tạo hốc cộng hưởng cần tạo ra dải lai hóa như đường màu đen ở [Hình 4.1\(d\)](#), các ô cơ sở này cần hoạt động tại tần số cộng hưởng $f_{loc} = 12,8$ MHz. Khi đó ô cơ sở được xác định để tạo hốc cộng hưởng được điều chỉnh sao cho cộng hưởng tại tần số $f_0 = 14,1$ MHz.

Xét trường hợp sóng điện từ (sóng trường xa) tương tác với tấm vật liệu MM, [Hình 4.1\(b\)](#) cho thấy các đặc điểm tán sắc khảo sát được. Khi đó, sóng bề mặt với khả năng lan truyền năng lượng từ trường được hình thành bên dưới tần số cộng hưởng f_{loc} và sự tán sắc của nó được thể hiện dưới dạng đường nét đứt màu xanh. Sự lan truyền của sóng điện từ xảy ra ở hai vùng: vùng từ 0 đến dải tần $f < f_{loc}$ và vùng ở dải tần $f > f_0$. Như vậy trong trường hợp sóng điện từ tương tác với tấm vật liệu MM, tồn tại một vùng cấm lan truyền giữa tần số $f_{loc} = 12,8$ MHz và $f_0 = 14,1$ MHz. Tuy nhiên, dải cấm đối với sóng điện từ lại cho phép năng lượng từ trường được lan truyền nhờ có sóng bề mặt trên tấm vật liệu biến hóa.



Hình 4.1. (a) Sơ đồ và ảnh chụp của tấm vật liệu MM chủ động với các ô cơ sở có tần số có thể điều chỉnh được. Khoảng cách giữa cuộn cộng hưởng phát Tx và tấm vật liệu MM là 20 cm, (b) Đặc điểm tán sắc của sự lan truyền năng lượng từ trường và lan truyền sóng điện từ, (c) Hệ số phản xạ đo được của một ô cơ sở vật liệu MM khi điều chỉnh điện thế V_{TUNE} , (d) Hệ số truyền qua đo được đối với tấm vật liệu MM đồng nhất và tấm vật liệu MM với hốc cộng hưởng (khi sử dụng cuộn cộng hưởng phát Tx và cuộn cộng hưởng thu Rx) [78].

Cơ chế vật lý cho việc hình thành hốc cộng hưởng có thể được giải thích bằng hiệu ứng giao thoa Fano giữa các ô cơ sở [23]. Giao thoa tăng cường xảy ra khi tần số cộng hưởng của hốc cộng hưởng cao hơn tần số của các ô cơ sở khác để từ trường có thể được định xứ trong đó. Ngược lại thì hiện tượng giao thoa triệt tiêu xảy ra, dẫn đến suy giảm từ trường. Hình 4.1(d) cho thấy hệ số truyền qua đo được trong hai trường hợp: tấm vật liệu MM đồng nhất và tấm vật liệu MM có hốc cộng hưởng. Trong trường hợp tấm vật liệu MM đồng nhất, tất cả các phần tử trên tấm đều cộng hưởng ở tần số f_{loc} . Giá trị của tần số f_{loc} được lựa chọn thích hợp nhằm cho phép định xứ từ trường mạnh tại tần số f_0 bằng cách cấm lan truyền năng lượng từ trường xung quanh tần số đó khi tấm vật liệu MM là đồng nhất. Trong trường hợp tấm vật liệu MM với hốc cộng hưởng, tất cả các ô cơ sở cộng hưởng tại f_{loc} ngoại trừ ô cơ sở ở

trung tâm được điều chỉnh để cộng hưởng tại f_0 . Kết quả cho thấy một đỉnh truyền qua với cường độ cao xung quanh tần số f_0 . Như vậy, ở vị trí của các ô cơ sở khác hóc cộng hưởng, sự lan truyền sóng bề mặt bị ngăn chặn bởi dải cấm; điều này dẫn đến từ trường bị giới hạn trong hóc cộng hưởng. Điều kiện hình thành hóc cộng hưởng là tần số cộng hưởng của ô cơ sở để tạo thành hóc phải cao hơn tần số cộng hưởng của các ô cơ sở khác và sự khác biệt 11% về tần số là tối ưu cho việc định xứ trường [23].

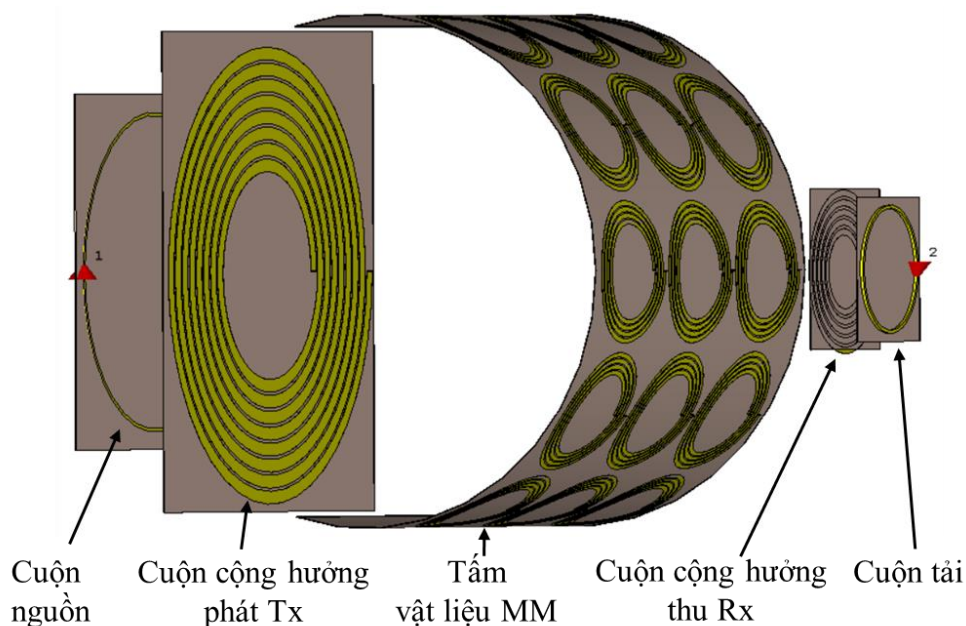
4.2. Tấm vật liệu MM linh hoạt với hóc cộng hưởng và có thể uốn cong ứng dụng trong tăng cường hiệu suất hệ thống MR-WPT

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

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một hệ thống MR-WPT không đối xứng với cuộn cộng hưởng phát Tx lớn hơn ba lần cuộn cộng hưởng thu Rx và đặt ra khoảng cách truyền dẫn mong muốn là $d_{Tx-Rx} = 200$ mm. Trên cơ sở đó, phần phát được chúng tôi thiết kế gồm cuộn cộng hưởng phát có đường kính ngoài $D_{Tx} = 150$ mm và cuộn nguồn có đường kính $D_S = 100$ mm; phần thu gồm cuộn cộng hưởng thu có đường kính ngoài $D_{Rx} = 50$ mm và cuộn tải có đường kính $D_L = 40$ mm. Tấm vật liệu MM linh hoạt với hóc cộng hưởng và có thể uốn cong được đặt giữa Tx và Rx sao cho khoảng cách từ cuộn cộng hưởng phát/thu đến tấm vật liệu MM lần lượt là $d_{Tx-Meta} = 150$ mm và $d_{Meta-Rx} = 50$ mm.

Trong nghiên cứu này, cách tiếp cận của chúng tôi nhằm mục đích cải thiện hiệu suất của hệ thống MR-WPT trong cả hai trường hợp: sử dụng tấm vật liệu MM phẳng và sử dụng tấm vật liệu MM uốn cong để tăng khả năng ứng dụng của các hệ thống MR-WPT. Để tấm vật liệu MM có thể uốn cong và khi uốn cong vẫn bao phủ vùng tương tác từ giữa các cuộn cộng hưởng, tấm vật liệu MM chúng tôi đề xuất được chế tạo trên đế FR-4 với độ dày nhỏ 0,2 mm, tấm có tổng kích thước 150×300 mm², gồm 3×5 ô cơ sở và theo chiều dọc của tấm, mỗi đầu được thiết kế dài thêm 25 mm để dễ dàng thực hiện uốn cong. Đồng thời, nhận thấy hóc cộng hưởng có khả năng định xứ từ trường trong hóc, từ đó có khả năng tăng cường hơn nữa hiệu suất của hệ thống MR-WPT khi sử dụng tấm uốn cong, chúng tôi đề xuất tấm vật liệu MM với hóc cộng hưởng ở tâm tấm. Hóc cộng hưởng trên tấm được chúng tôi thiết kế bằng cách điều khiển tần số cộng hưởng của các ô cơ sở trong tấm để thỏa mãn điều kiện hình thành hóc cộng hưởng. Cụ thể tần số cộng hưởng của hóc phải cao hơn tần số cộng hưởng của các ô cơ sở khác 10% để tối ưu cho việc định xứ từ trường [23]. Sự xuất hiện của hóc cộng hưởng dẫn đến phá vỡ tính đồng nhất của tấm vật liệu MM,

do đó bằng cách thiết kế hốc cộng hưởng chúng tôi thu được tấm vật liệu MM không đồng nhất. Cấu hình của hệ thống MR-WPT tích hợp tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong được đề xuất như được minh họa trong [Hình 4.2](#).

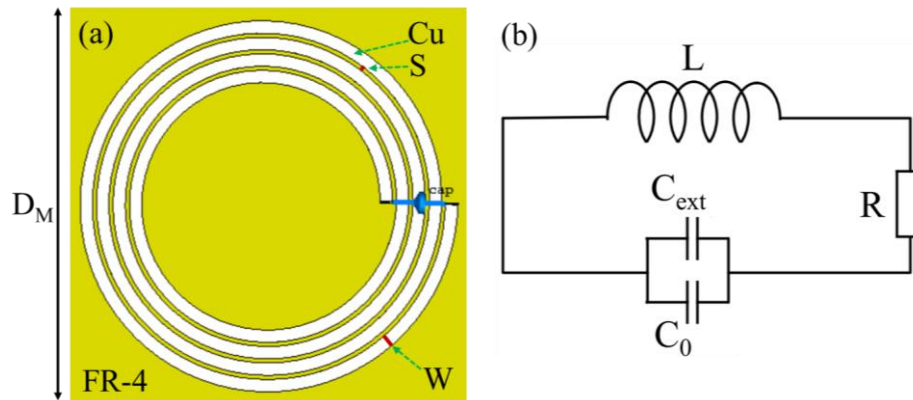


Hình 4.2. Sơ đồ của hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong.

Để thiết kế, chế tạo tấm vật liệu MM linh hoạt theo ý tưởng nêu trên, tương tự như trong chương 3, chúng tôi tham khảo một số các nghiên cứu sử dụng cấu trúc có hiệu quả cao trong WPT [97], [98] và từ đó lựa chọn cấu trúc xoắn ốc tròn gắn thêm tụ điện ngoài - một cấu trúc hiệu quả để chế tạo vật liệu MM có hệ số phẩm chất cao và hoạt động ở dải tần số MHz thấp [99].

Trên cơ sở xác định tổng kích thước của tấm cũng như số lượng ô cơ sở trên tấm, chúng tôi xây dựng ô cơ sở MM có dạng hình vuông với tổng kích thước $D_M = 50$ mm. Cố định đường kính ngoài của xoắn ốc tròn là 46 mm, phương pháp mô phỏng được chúng tôi thực hiện để tối ưu hoá các tham số cấu trúc khác của ô cơ sở nhằm thu được vật liệu MM có hệ số phẩm chất Q cao. Ô cơ sở vật liệu MM với các tham số tối ưu như được minh họa ở [Hình 4.3\(a\)](#). Ô cơ sở vật liệu MM được thiết kế là một bộ cộng hưởng gồm xoắn ốc tròn 4 vòng gắn thêm một tụ điện ngoài. Xoắn ốc được chế tạo trên đế FR-4 với hằng số điện môi là 4,3 và có độ dày nhỏ là 0,2 mm để có thể uốn cong. Xoắn ốc được làm bằng đồng Cu với độ dày lớp đồng là 0,07 mm, chiều rộng dải đồng là $W = 1,5$ mm, khoảng cách giữa các dải là $S = 0,5$ mm. [Hình 4.3\(b\)](#) minh họa mô hình mạch điện tương đương của ô cơ sở được đơn giản hóa. Các tham số bên trong của ô cơ sở MM gồm điện trở nối tiếp, độ tự cảm và điện dung

riêng lần lượt được biểu thị bằng R , L và C_0 . Tụ điện gắn ngoài được sử dụng để điều chỉnh tần số cộng hưởng của ô cơ sở MM và được kí hiệu bởi C_{ext} . Tần số cộng hưởng của ô cơ sở MM được tính theo công thức (2.1) như đã trình bày ở chương 2.

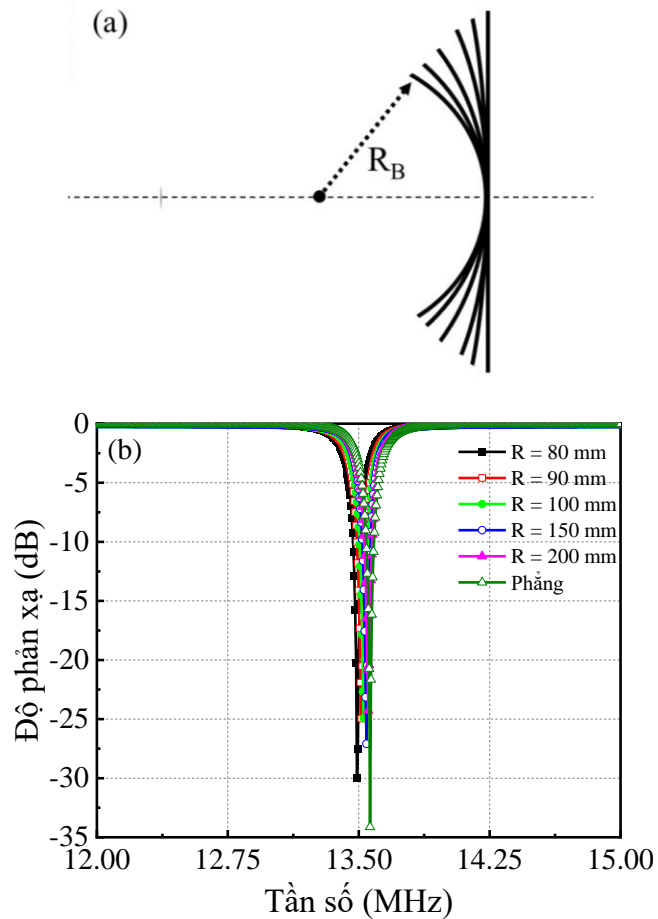


Hình 4.3. (a) Thiết kế ô cơ sở vật liệu MM và (b) mô hình mạch điện tương đương của ô cơ sở vật liệu MM.

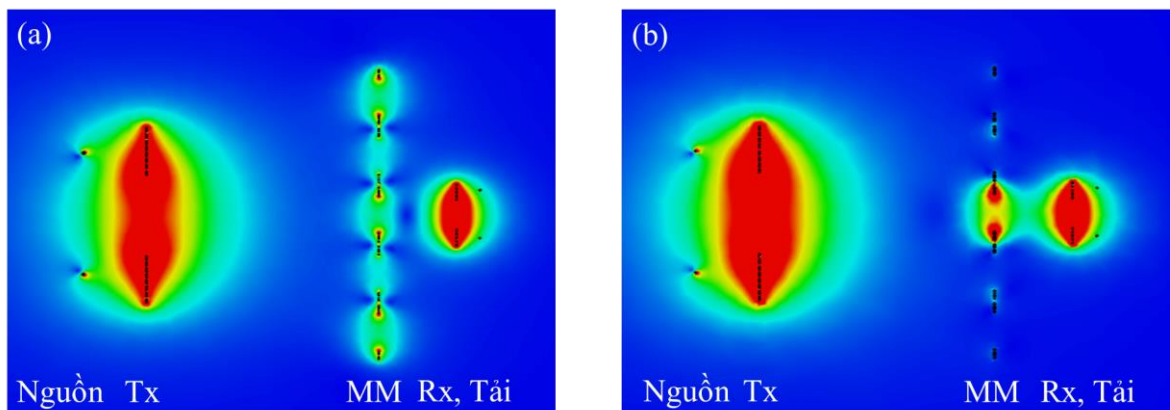
4.2.2. Mô phỏng hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong

Tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong được đề xuất sử dụng để tăng cường hiệu suất truyền dẫn và tăng khả năng ứng dụng của hệ thống MR-WPT. Do đó, trước tiên đáp ứng của tấm vật liệu MM đồng nhất đối với sự uốn cong là một đặc tính cần được nghiên cứu. Đáp ứng này được chúng tôi khảo sát bằng mô phỏng điện từ được thực hiện bởi phần mềm CST.

Hình 4.4(a) mô tả sơ đồ uốn cong tấm vật liệu MM đồng nhất từ cấu hình phẳng với bán kính uốn là vô cùng và khi thực hiện uốn với các bán kính khác nhau được biểu thị bằng R_B giảm từ 200 mm xuống 80 mm. Đáp ứng phản xạ của các ô cơ sở vật liệu MM với các bán kính uốn cong khác nhau được trích xuất từ mô phỏng và thể hiện trong **Hình 4.4(b)**. Kết quả cho thấy, ở cấu hình phẳng, các ô cơ sở vật liệu MM được thiết kế để cộng hưởng ở tần số 13,56 MHz. Khi tấm vật liệu MM bị uốn cong theo hình cung tròn có bán kính giảm từ 200 mm xuống 80 mm, tần số cộng hưởng của các ô cơ sở này thay đổi nhẹ từ 13,55 MHz đến 13,5 MHz. Do sự tương tác giữa các ô cơ sở, một dải tần số cộng hưởng được hình thành thay vì một đỉnh cộng hưởng trong phổ phản xạ của tấm vật liệu MM [113]. Do đó, sự thay đổi nhỏ về tần số cộng hưởng của ô cơ sở vật liệu MM khi bị uốn cong ảnh hưởng không đáng kể đến hiệu quả của tấm.



Hình 4.4. (a) Sơ đồ của tấm vật liệu MM uốn cong, (b) tần số cộng hưởng mô phỏng của ô cơ sở vật liệu MM theo bán kính uốn cong.



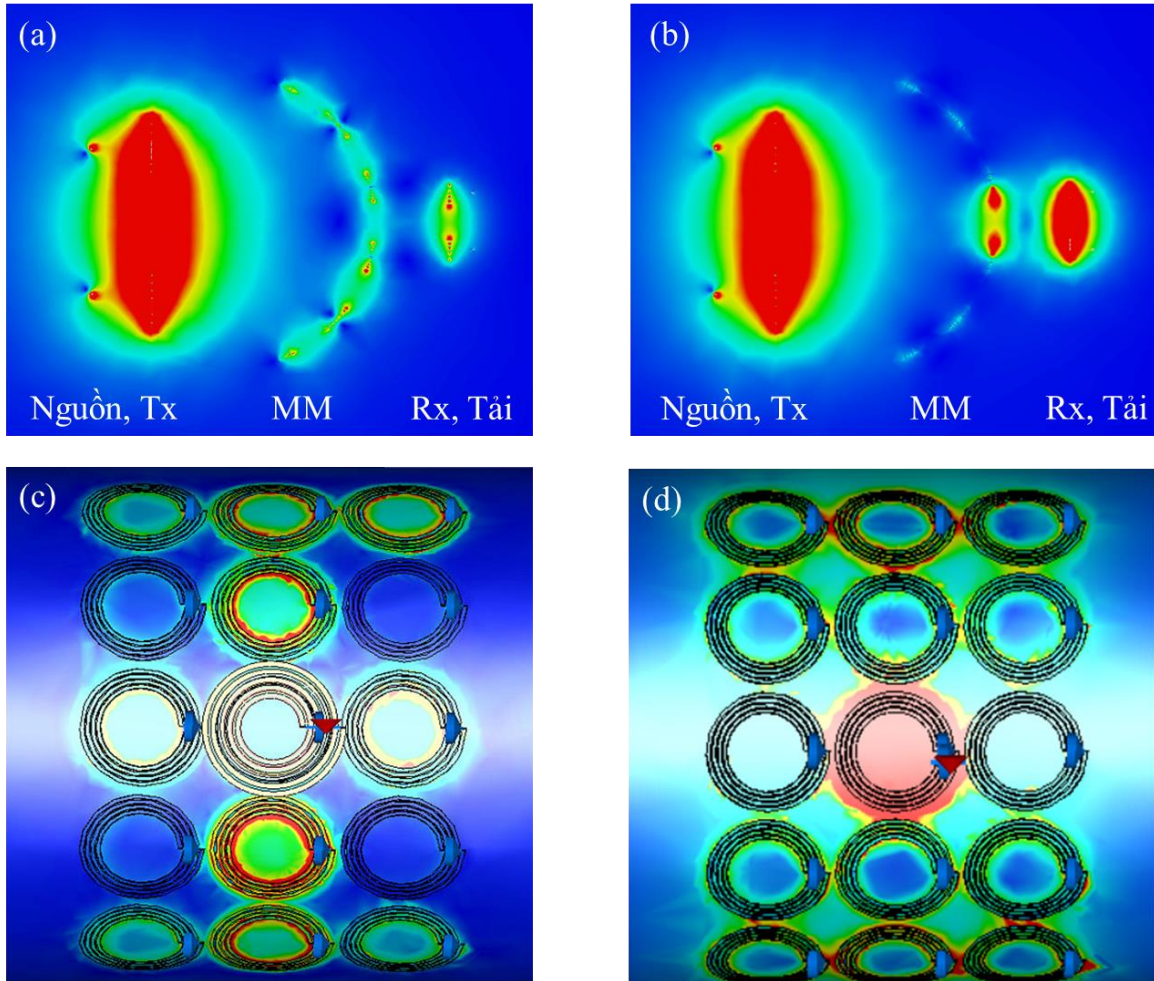
Hình 4.5. Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT: (a) với tấm MM đồng nhất, (b) với tấm MM không đồng nhất (có một hốc cộng hưởng tại tâm tấm).

Tiếp theo, mô phỏng điện từ được thực hiện để khảo sát phân bố từ trường tại các thành phần trong hệ thống MR-WPT ở tần số cộng hưởng 13,56 MHz. [Hình 4.5\(a\)](#) cho thấy phân bố cường độ từ trường trong hệ thống MR-WPT khi sử dụng tấm vật

liệu MM đồng nhất. Có thể thấy, có năng lượng từ trường xuất hiện trên tấm vật liệu MM do sự lan truyền năng lượng từ trường từ cuộn cộng hưởng phát Tx tới tấm. Do đó, tấm vật liệu MM có thể tăng cường cường độ từ trường gần cuộn thu, từ đó giúp tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT [114]. Với ý tưởng sử dụng một hốc cộng hưởng trên tấm vật liệu MM để định xứ từ trường, [Hình 4.5\(b\)](#) cho thấy phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT thu được từ mô phỏng khi một hốc cộng hưởng được thiết kế tại tâm của tấm vật liệu MM. Trong trường hợp này, có thể quan sát thấy rõ từ trường được định xứ mạnh tại vị trí hốc cộng hưởng và sự định xứ từ trường này chính là nguyên nhân giúp cải thiện hơn nữa hiệu suất của hệ thống MR-WPT.

Như đã đề cập ở một số phần trước, trong một số ứng dụng thực tế, tấm vật liệu MM phẳng là không khả dụng hoặc không tối ưu. Do đó, để tăng khả năng ứng dụng của hệ thống MR-WPT, tấm vật liệu MM được đưa vào hệ thống MR-WPT cần có khả năng uốn cong được. Đồng thời, theo kết quả khảo sát đã nêu, tấm vật liệu MM không đồng nhất với một hốc cộng hưởng tại tâm tấm có khả năng tăng cường hiệu suất truyền dẫn của hệ thống. Vì vậy, hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM với cấu hình đồng nhất và không đồng nhất lần lượt được khảo sát bằng mô phỏng khi thực hiện uốn cong các tấm đó. [Hình 4.6\(a\),\(b\)](#) thể hiện phân bố từ trường thu được từ mô phỏng tại các thành phần trong các hệ thống MR-WPT tương ứng với các hệ thống trong [Hình 4.5\(a\),\(b\)](#) nhưng ở đây các tấm vật liệu MM được uốn cong với bán kính 100 mm. Kết quả cho thấy, cường độ từ trường tại cuộn cộng hưởng thu trong hai trường hợp này đều giảm so với trường hợp khi các tấm vật liệu MM phẳng. Mặt khác, trong cả cấu hình tấm vật liệu MM phẳng và tấm vật liệu MM uốn cong, khi thiết kế hốc cộng hưởng ở tâm tấm đều thu được cường độ từ trường tại cuộn cộng hưởng thu lớn hơn. Bên cạnh đó, có thể thấy, khi các tấm vật liệu MM bị uốn cong với bán kính 100 mm, trên tấm vật liệu MM đồng nhất năng lượng từ trường phân bố khá đều trên tấm; còn ở tấm vật liệu MM không đồng nhất, năng lượng từ trường với cường độ cao tập trung tại vị trí hốc cộng hưởng. Những kết quả này chỉ ra rằng tấm vật liệu MM với hốc cộng hưởng được đề xuất có thể cải thiện tốt hiệu suất của hệ thống MR-WPT trong cả cấu hình tấm MM phẳng và cả cấu hình tấm MM uốn cong. Để có thể phân tích rõ hơn vai trò của tấm vật liệu MM, các phân bố từ trường trên tấm vật liệu MM đồng nhất và tấm vật liệu MM không đồng nhất được khảo sát và thể hiện trong [Hình 4.6\(c\),\(d\)](#). [Hình 4.6\(c\)](#) chỉ ra rằng phân bố từ trường tương đối đồng đều được quan sát trong trường hợp tấm vật liệu MM đồng nhất. Tuy nhiên, cường độ từ trường ở hàng ô trung tâm của tấm cao hơn một chút, nó có thể được quy cho từ trường tới của cuộn Tx. Ngược lại, trên tấm vật liệu MM không đồng nhất, từ trường được định xứ đáng kể tại ô trung tâm của tấm - tại vị trí hốc cộng

hường - như trong [Hình 4.6\(d\)](#). Kết quả này xác nhận rằng các đặc tính của hốc cộng hưởng được duy trì trong điều kiện uốn cong. Vì vậy tấm vật liệu MM với hốc cộng hưởng có thể giúp tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT khi sử dụng tấm đòi hỏi cần có cấu hình uốn cong.

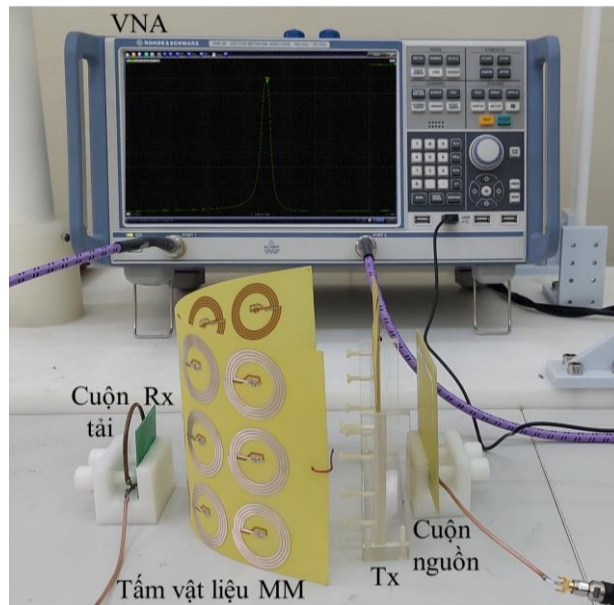


Hình 4.6. Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt: (a) tấm vật liệu MM đồng nhất và (b) tấm vật liệu MM không đồng nhất. Kết quả mô phỏng phân bố từ trường trên tấm vật liệu MM với: (c) tấm vật liệu MM đồng nhất và (d) tấm vật liệu MM không đồng nhất.

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

Để xác nhận các phân tích trong các phần trước, một hệ thống MR-WPT sử dụng tấm MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong như thể hiện trong [Hình 4.7](#) đã được chúng tôi triển khai. Cấu hình của hệ thống thực nghiệm tương tự như cấu hình của hệ thống mô phỏng được minh họa trong [Hình 4.2](#). Các cuộn cộng hưởng phát/thu (Tx/Rx) và tấm vật liệu MM được chế tạo bằng phương pháp quang

khắc trên đế FR-4 có độ dày 0,2 mm nên giảm thiểu sai số chế tạo và dễ nhân rộng. Nhờ độ dày đế mỏng, tấm vật liệu MM có khả năng uốn cong theo cung tròn với bán kính cong nhỏ nhất là 80 mm. Tần số hoạt động của cuộn cộng hưởng phát/thu (Tx/Rx) và các ô cơ sở của tấm vật liệu MM là 13,56 MHz. Các hệ số phẩm chất Q không tải đo được của Tx, Rx và ô cơ sở MM lần lượt là 433, 165 và 152. Hốc cộng hưởng trên tấm vật liệu MM được hình thành bằng cách điều chỉnh các giá trị tụ điện được hàn vào các ô cơ sở, cụ thể: 155 pF cho ô cơ sở tạo thành hốc cộng hưởng và 180 pF cho các ô cơ sở khác trong tấm.

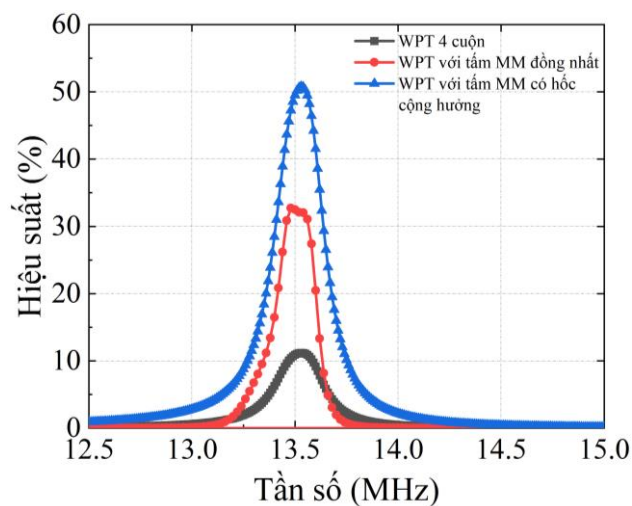


Hình 4.7. Thiết lập thí nghiệm đo đặc trưng của hệ thống MR-WPT không đối xứng sử dụng tấm vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong.

Sau khi chế tạo và xây dựng phương pháp đo đặc cho hệ thống MR-WPT (Hình 4.7), hiệu suất của hệ thống được đo bằng máy phân tích mạng vector VNA, được xác định thông qua $|S_{21}|^2$ [58] và thể hiện trong Hình 4.8.

Hình 4.8 cho thấy hiệu suất đo được của các hệ thống MR-WPT ở ba cấu hình khác nhau: hệ thống MR-WPT bốn cuộn ban đầu, hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM đồng nhất và hệ thống MR-WPT với tấm vật liệu MM không đồng nhất. Trong các cấu hình này, khoảng cách giữa hai cuộn cộng hưởng, khoảng cách giữa các cuộn cộng hưởng phát/thu và tấm vật liệu MM như xác định ban đầu, lần lượt là 200 mm, 150 mm và 50 mm. Kết quả đo đặc cho thấy, với hệ thống MR-WPT bốn cuộn ban đầu, hiệu suất của hệ thống chỉ đạt tối đa là 11,5% ở 13,56 MHz, như được mô tả bởi đường cong màu đen. Hiệu suất của hệ thống này thấp là do khoảng cách giữa cuộn cộng hưởng phát/thu trong cấu hình này là 200 mm, lớn hơn bốn lần so với đường kính của cuộn cộng hưởng thu Rx, từ đó dẫn tới hạn chế từ thông cuộn cộng hưởng

thu Rx nhận được. Đường cong màu đỏ cho thấy hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT với tấm MM đồng nhất. Hiệu suất cực đại đạt được trong cấu hình này là 32,3%, cao gấp ba lần so với hiệu suất của hệ thống ban đầu. Trong cấu hình này, do sự ghép cặp lẫn nhau giữa các ô cơ sở trên tấm MM, đỉnh hiệu suất được mở rộng một chút so với trường hợp ban đầu [113]. Khi một hốc cộng hưởng được tạo ra trong tấm MM, hiệu suất tối đa của hệ thống tăng đáng kể lên 52%, như được thể hiện bởi đường cong màu xanh lam. Điều này cho thấy kết quả đo đặc phù hợp với kết quả mô phỏng thu được ở Hình 4.5, được giải thích do từ trường được định xứ mạnh trong hốc cộng hưởng. Như vậy với việc thiết kế hốc cộng hưởng tại tâm của tấm vật liệu MM đã giúp tăng cường đáng kể hiệu suất của hệ thống MR-WPT.

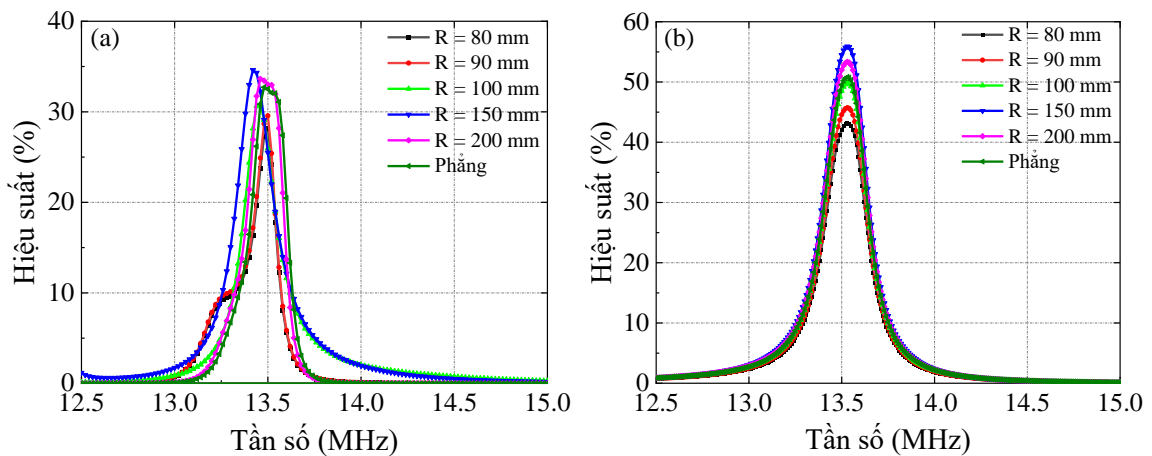


Hình 4.8. Hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT trong các trường hợp: khi không có tấm vật liệu MM (hệ thống MR-WPT 4 cuộn), khi có tấm vật liệu MM đồng nhất và khi có tấm MM với hốc cộng hưởng.

Tiếp theo, để khảo sát ảnh hưởng của việc uốn cong tấm vật liệu MM đối với hiệu suất của hệ thống MR-WPT, hiệu suất của hệ thống khi sử dụng tấm MM linh hoạt có khả năng uốn cong được khảo sát với hai cấu hình của tấm: tấm MM đồng nhất và tấm MM không đồng nhất và thu được kết quả như thể hiện trong Hình 4.9.

Hình 4.9(a) trình bày kết quả đo đặc hiệu suất của hệ thống MR-WPT với tấm MM đồng nhất ở cấu hình phẳng và ở các bán kính uốn khác nhau, giảm từ 200 mm xuống 80 mm. Kết quả cho thấy, ở các độ cong nhỏ tương ứng với bán kính uốn cong lớn, hiệu suất MR-WPT tăng nhẹ so với cấu hình phẳng. Điều này có thể được giải thích: khi tấm vật liệu MM uốn cong có thể thu được thông lượng từ lớn hơn do khoảng cách giữa các ô cơ sở trong tấm tới Tx gần hơn so với trường hợp cấu hình phẳng. Hiệu suất của MR-WPT tăng lên 33,1% khi bán kính uốn là 200 mm và đạt 34,8% khi bán kính uốn là 150 mm. Tiếp đó, khi độ cong tăng lên tương ứng với bán

kính uốn nhỏ hơn, hiệu suất MR-WPT giảm so với cấu hình phẳng. Hiệu suất thu được lần lượt là 31%, 30% và 28,5% tương ứng với bán kính uốn cong là 100 mm, 90 mm và 80 mm. Có thể hiểu rằng hiệu suất bị giảm ở bán kính uốn cong nhỏ là do tấm vật liệu MM bị uốn cong quá, dẫn đến diện tích hiệu dụng bị giảm quá mức và hạn chế từ thông thu được. Hình 4.9(b) cho thấy hiệu suất đo được của hệ thống MR-WPT với tấm MM không đồng nhất uốn cong. Trong cấu hình này, hiệu suất hệ thống MR-WPT cũng tăng ở bán kính uốn cong lớn và giảm ở bán kính uốn cong nhỏ. Hiệu suất tối đa đạt được ở bán kính uốn cong 150 mm là 55,1%. Ở bán kính uốn cong nhỏ nhất là 80 mm, hiệu suất giảm xuống 42,5%. Như vậy, hệ thống MR-WPT sử dụng tấm MM không đồng nhất với các bán kính uốn cong khác nhau vẫn cho thấy có thể cải thiện đáng kể hiệu suất so với hệ thống ban đầu. Đồng thời, khi sử dụng tấm vật liệu MM với cả cấu hình đồng nhất và cấu hình không đồng nhất, kết quả đều cho thấy tồn tại một bán kính uốn cong như nhau là 150 mm mà khi đó hiệu suất của các hệ thống được cải thiện tối đa.



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

Như vậy, bằng cách sử dụng tấm vật liệu MM với hóc cộng hưởng và có thể uốn cong, chúng tôi có thể thu được hiệu suất tối đa cho hệ thống MR-WPT là 55,1% ở khoảng cách truyền dẫn 200 mm - lớn hơn bốn lần đường kính của cuộn cộng hưởng thu. So sánh với nghiên cứu trước [115] có cùng khoảng cách truyền dẫn và với kích thước cuộn cộng hưởng thu lớn hơn, hiệu suất hệ thống thu được chỉ là 20% khi sử dụng tấm vật liệu biến hóa. Trong một nghiên cứu khác [116] hiệu suất đạt được của hệ thống khi sử dụng tấm vật liệu biến hóa là 50,4% khi khoảng cách truyền dẫn là 120 mm.

4.3. Kết luận chương 4

Trong chương này, bằng phương pháp mô phỏng và thực nghiệm, chúng tôi đã đề xuất, thiết kế, chế tạo được một cấu trúc vật liệu MM linh hoạt với hốc cộng hưởng và có thể uốn cong giúp tăng cường hiệu suất của hệ thống MR-WPT không đối xứng hoạt động ở tần số 13,56 MHz. Tấm vật liệu MM được đề xuất làm từ chất nền FR-4 với độ dày 0,2 mm – độ dày đủ nhỏ để có thể thực hiện uốn cong với bán kính cong nhỏ nhất 80 mm. Tấm vật liệu MM này có tổng kích thước $150 \times 300 \text{ mm}^2$, có cấu trúc là một mảng 3×5 ô cơ sở và mỗi đầu của tấm (theo chiều dọc của tấm) được thiết kế dài thêm 25 mm để có thể dễ dàng thực hiện uốn cong với các bán kính uốn khác nhau từ 200 mm đến 80 mm. Khi để phẳng, tấm vật liệu MM có bán kính uốn cong là vô cùng. Đồng thời, một hốc cộng hưởng được hình thành trên tấm vật liệu MM bằng cách điều khiển tần số cộng hưởng của ô cơ sở vật liệu MM bởi một tụ điện gắn ngoài (tần số của hốc cộng hưởng lớn hơn 11% tần số của các ô cơ sở khác). Tấm vật liệu MM này, với thiết kế có hốc cộng hưởng, khi sử dụng ở cấu hình phẳng đã cải thiện đáng kể hiệu suất của hệ thống MR-WPT, cụ thể hiệu suất tối đa của hệ thống đã tăng lên 52% so với hiệu suất cực đại 32,3% khi sử dụng tấm MM đồng nhất và hiệu suất cực đại 11,5% của hệ thống ban đầu khi chưa sử dụng tấm. Khi sử dụng tấm vật liệu MM với cấu hình uốn cong, kết quả chỉ ra rằng nếu tấm MM uốn cong quá mức nào đó sẽ làm hiệu suất của hệ thống giảm, tuy nhiên tồn tại một bán kính uốn cong phù hợp mà tại đó hiệu suất của hệ thống được tăng cường trong cả trường hợp sử dụng tấm MM đồng nhất và tấm MM không đồng nhất. Cụ thể, trong nghiên cứu này, ở bán kính cong 150 mm, hiệu suất cực đại của hệ thống đã tăng từ 32,3% lên 34,8% khi sử dụng tấm MM đồng nhất và đã tăng từ 52% lên 55,1% khi sử dụng tấm MM với hốc cộng hưởng tại tâm tấm.

Các kết quả nghiên cứu trong chương này đã được đăng trên tạp chí SCIE và trong “Danh mục công trình công bố liên quan đến luận án” là công trình 3.

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

Bên cạnh khả năng ứng dụng trong hệ thống MR-WPT, các cấu trúc vật liệu MM với trật tự xác định cũng cho thấy khả năng lan truyền năng lượng từ trường trong các cấu trúc vật liệu đó. Sự lan truyền năng lượng này được tạo ra do sự ghép cặp từ trường giữa các phần tử ô cơ sở được sắp xếp tuần hoàn [81]. Sự lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu MM thể hiện nhiều đặc tính độc đáo như đường cong tán sắc có độ dốc âm, điều này chứng tỏ sự lan truyền ngược [117]. Các cấu trúc vật liệu MM gồm một dãy các bộ cộng hưởng vòng có rãnh đã được sử dụng để lan truyền năng lượng từ trường và đã được nghiên cứu trong trường hợp một chiều (1-D) [118], hai chiều (2-D) [119]. Kết quả nghiên cứu cho thấy chuỗi vật liệu MM 1-D có hiệu suất tốt đối với sự lan truyền năng lượng từ trường, tuy nhiên nó bị hạn chế về phạm vi ứng dụng [120]. Trong khi đó, dù có phạm vi hoạt động rộng hơn nhưng vật liệu MM 2-D đồng nhất lại có hiệu suất truyền dẫn thấp do tổn hao lớn xảy ra trong toàn bộ cấu trúc [121]. Từ thực tế đó, trong chương này, chúng tôi nghiên cứu thiết kế và đề xuất một cấu trúc vật liệu MM 2-D không đồng nhất có từ trường định xứ nhằm tăng cường hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu đó.

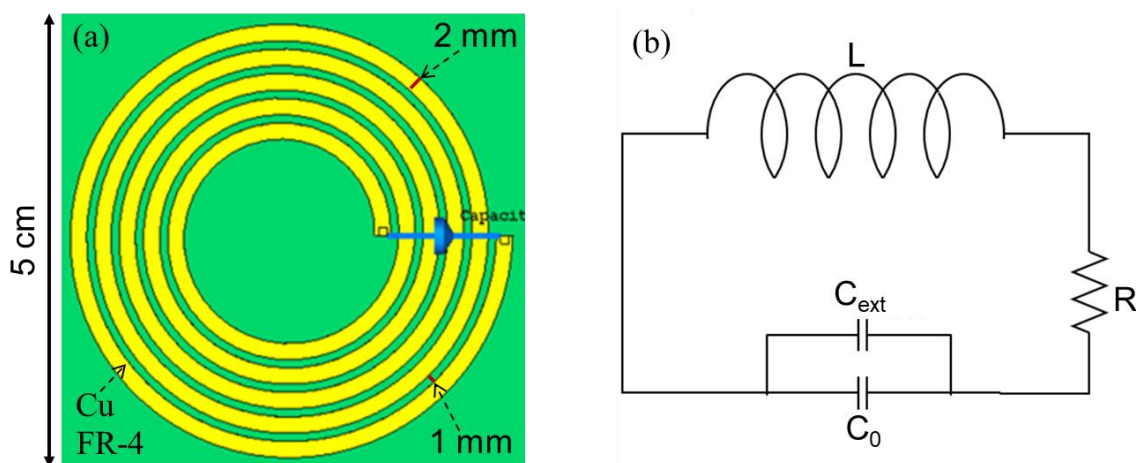
5.1. Lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu MM 1-D

5.1.1. Thiết kế ô cơ sở vật liệu MM

Tương tự như các chương trước, trên cơ sở tham khảo một số các nghiên cứu về sử dụng cấu trúc xoắn ốc có hiệu quả cao trong truyền dẫn năng lượng không dây [97], [98], trong chương này chúng tôi đề xuất vật liệu MM có cấu trúc ô cơ sở gồm một xoắn ốc tròn gắn thêm tụ điện ngoài - một cách hiệu quả để chế tạo vật liệu MM có hệ số phẩm chất cao và hoạt động ở dải tần số MHz thấp [99].

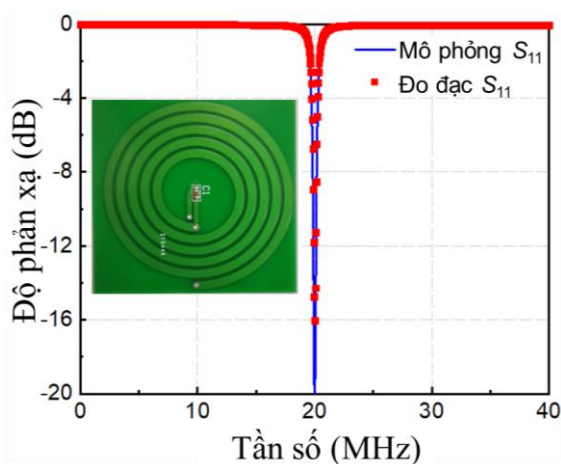
Trên cơ sở cố định đường kính ngoài của xoắn ốc tròn là 4,5 cm và tổng kích thước của mỗi ô cơ sở MM là $5 \times 5 \text{ cm}^2$, phương pháp mô phỏng được chúng tôi thực hiện để tối ưu hoá các tham số cấu trúc khác của ô cơ sở nhằm thu được vật liệu MM có hệ số phẩm chất Q cao. Hình 5.1(a) mô tả ô cơ sở vật liệu MM được thiết kế bởi một cuộn cộng hưởng xoắn ốc tròn gắn tụ điện ngoài, đặt trên đế FR-4 với các tham số tối ưu. Cuộn cộng hưởng xoắn ốc có năm vòng $N = 5$, khoảng cách giữa hai vòng

liên tiếp là $S = 1 \text{ mm}$. Cuộn cộng hưởng này được chế tạo bằng đồng (Cu) với độ dày lớp đồng là $0,105 \text{ mm}$ và độ rộng của dây đồng là $W = 2 \text{ mm}$. Chất nền FR-4 trong thiết kế này có độ dày $1,2 \text{ mm}$ và hằng số điện môi là $4,3$. Mô hình mạch điện tương đương của mỗi ô cơ sở vật liệu MM được thể hiện trong **Hình 5.1(b)**. Tương tự các chương trước, các tham số bên trong của ô cơ sở vật liệu MM gồm điện trở nối tiếp, độ tự cảm và điện dung riêng lần lượt được biểu thị bằng R , L và C_0 . Tự điện gắn ngoài được sử dụng để điều chỉnh tần số cộng hưởng của ô cơ sở vật liệu MM và được kí hiệu bởi C_{ext} . Tần số cộng hưởng của ô cơ sở vật liệu MM cũng được tính toán theo công thức (2.1) ở chương 2.



Hình 5.1. (a) Ô cơ sở vật liệu MM, (b) mạch điện tương đương của ô cơ sở vật liệu MM.

5.1.2. Đặc tính của ô cơ sở vật liệu MM



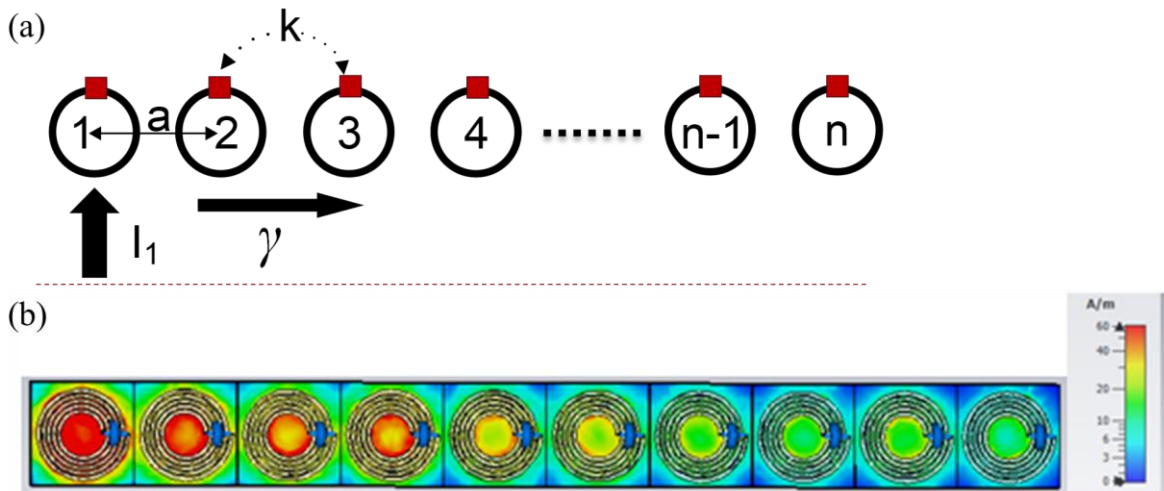
Hình 5.2. Tần số cộng hưởng mô phỏng và đo đạc của ô cơ sở vật liệu MM.

Đặc tính của ô cơ sở vật liệu MM được khảo sát thông qua tham số tán xạ S_{11} từ mô phỏng hoặc bằng cách đo đạc sử dụng máy phân tích mạng vectơ VNA và được thể hiện như ở **Hình 5.2**. Kết quả cho thấy ô cơ sở vật liệu MM, khi gắn tự điện ngoài

với điện dung 40 pF, cộng hưởng ở 20 MHz và độ sắc nét của đỉnh cộng hưởng cho biết ô cơ sở có hệ số phẩm chất tốt - cơ sở để có thể giảm độ suy hao.

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

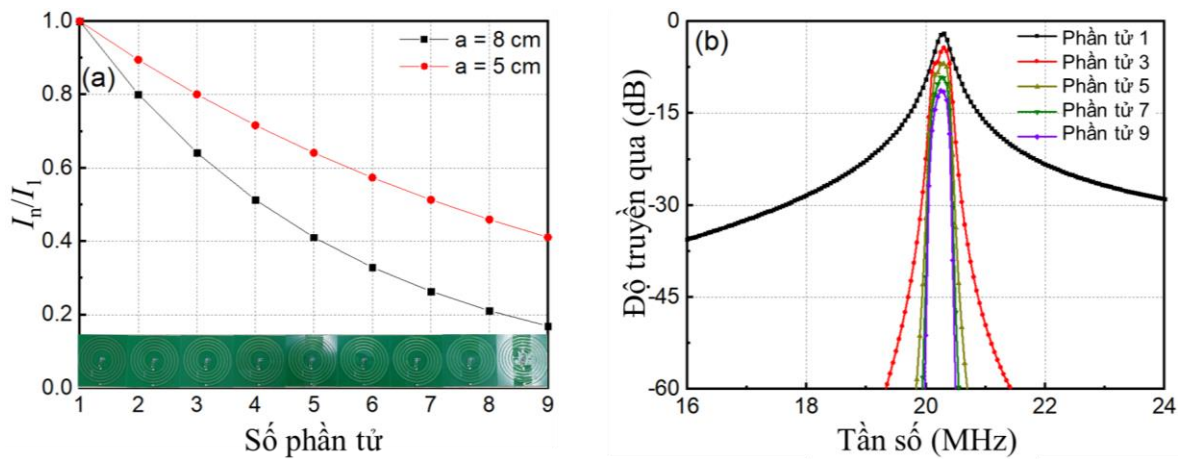
Năng lượng từ trường có thể lan truyền trong cấu trúc được hình thành bởi các ô cơ sở liên tiếp của vật liệu MM. Một chuỗi các ô cơ sở liên tiếp của vật liệu MM hay chuỗi ô cơ sở vật liệu MM 1-D là chuỗi cuộn cộng hưởng ghép cặp có thể hỗ trợ sự lan truyền năng lượng từ trường, như được mô tả trong Hình 5.3(a). Hằng số mạng a là khoảng cách giữa hai tâm của hai phần tử liên tiếp trong chuỗi. Hệ số ghép cặp của hai phần tử liên tiếp là k . Trong cấu hình này, các ô cơ sở đặt cạnh nhau và khoảng cách a bằng độ dài ô cơ sở. Do sự ghép cặp giữa các ô cơ sở giảm nhanh chóng theo khoảng cách giữa chúng nên trong nghiên cứu này chỉ xem xét sự tương tác giữa các ô cơ sở vật liệu MM ngay cạnh nhau để đơn giản hóa phân tích.



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

Để khảo sát đáp ứng điện từ trong cấu trúc vật liệu MM, mô phỏng điện từ được thực hiện bằng phần mềm CST Studio Suite với các điều kiện biên thích hợp, điều kiện biên mở (Boundary conditions: Open), được áp dụng cho đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường. Hình 5.3(b) thể hiện phân bố từ trường trên mỗi phần tử của chuỗi vật liệu MM 1-D gồm 9 cuộn cộng hưởng. Kết quả cho thấy từ trường tập trung trong chuỗi vật liệu MM 1-D và tập trung cường độ cao ở tâm các xoắn ốc. Cường độ từ trường bị suy giảm khi ô cơ sở ở xa nguồn là do sự suy giảm trên mỗi ô cơ sở vật liệu MM. Với phân tích dòng điện và phân tích từ trường, chuỗi vật liệu MM 1-D cho thấy khả năng lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc và năng lượng từ trường chủ yếu lan truyền trên bề mặt cấu trúc.

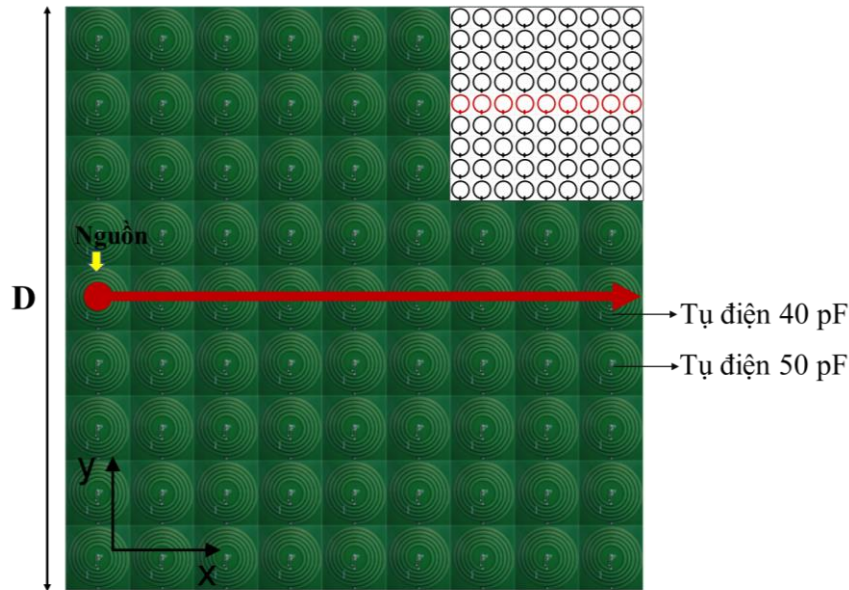
Khi năng lượng từ trường lan truyền trong cấu trúc vật liệu MM, hiện tượng suy giảm năng lượng từ trường xảy ra làm giảm dòng điện trong mỗi cuộn cộng hưởng. Hình 5.4(a) cho thấy tỉ lệ giữa dòng điện trong phần tử thứ n (I_n , $n = 1 - 9$) và dòng điện trong phần tử đầu tiên (I_1) đối với hai hằng số mạng khác nhau ($a = 5$ cm và $a = 8$ cm). Kết quả cho thấy hằng số mạng ảnh hưởng đến hệ số ghép cặp giữa các ô cơ sở vật liệu MM và dòng điện chạy trong chúng. Khi hằng số mạng là 5 cm, tỉ lệ dòng điện giảm khi tăng số phần tử như được mô tả bởi đường cong màu đỏ và ở phần tử thứ 9, tỉ lệ I_n/I_1 là 0,4. So sánh cho thấy tỉ lệ dòng điện giảm nhanh hơn khi hằng số mạng là 8 cm, được biểu thị bởi đường cong màu đen. Trong cấu hình này, tỉ lệ dòng điện đạt được ở phần tử thứ 9 là 0,18. Sự suy giảm nhanh hơn của tỉ lệ dòng điện trong chuỗi vật liệu MM với hằng số mạng lớn hơn phù hợp với phương trình dòng điện (1.34) ở Chương 1.



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

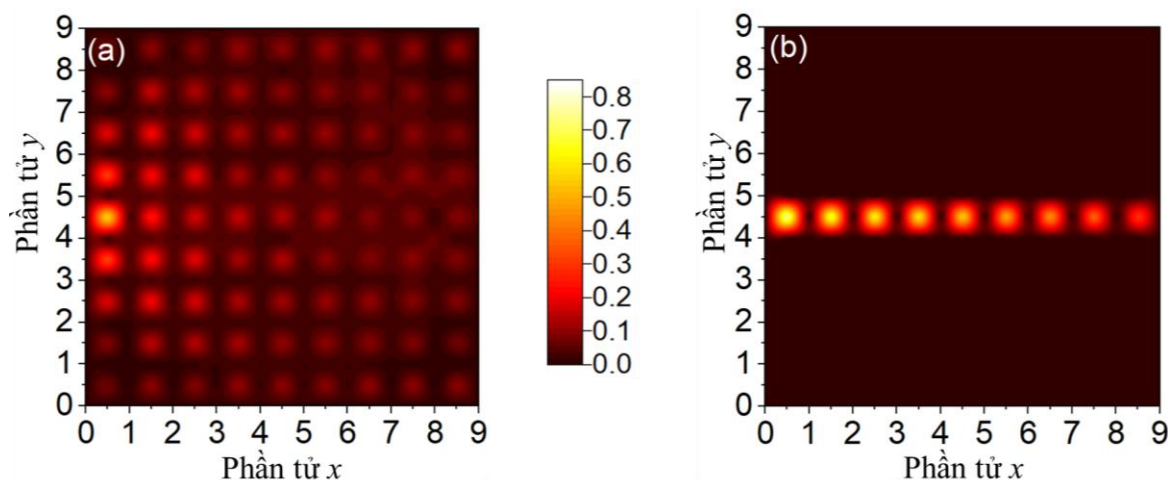
Hình 5.4(b) thể hiện sự lan truyền năng lượng từ trường đo được trong chuỗi vật liệu MM 1-D. Kết quả thu được các đỉnh của độ truyền qua lần lượt là $-1,6$; $-4,03$; $-6,86$; $-8,98$ và $-11,23$ dB ở 20,3 MHz khi số lượng cuộn cộng hưởng lần lượt là 1; 3; 5; 7 và 9. Băng thông truyền dẫn là 268 kHz cho chuỗi 9 cuộn cộng hưởng. Bởi vì sự lan truyền năng lượng từ trường chỉ xảy ra trên bề mặt chuỗi vật liệu MM ở dải tần số MHz thấp nên tổn hao do bức xạ có thể bỏ qua. Do đó, sự giảm năng lượng từ trường trên chuỗi vật liệu MM 1-D là do tổn hao Ohmic trong các ô cơ sở vật liệu MM. Sự suy giảm này gây ra bởi hệ số suy hao, hệ số có liên quan mật thiết với hệ số phẩm chất Q của các ô cơ sở vật liệu MM.

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



Hình 5.5. Tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất tăng cường hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường.

Chuỗi vật liệu MM 1-D có thể dễ dàng mở rộng thành tấm vật liệu MM 2-D từ các ô cơ sở vật liệu MM. **Hình 5.5** cho thấy tấm vật liệu MM 2-D được đề xuất, bao gồm 9×9 ô cơ sở. Kích thước của tấm vật liệu MM 2-D là $D \times D = 45 \times 45 \text{ cm}^2$. Đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường được tạo ra bằng cách gắn thêm các tụ điện có điện dung khác nhau cho các phần tử thuộc đường dẫn và các phần tử ở phần còn lại của tấm vật liệu MM để tạo ra tần số cộng hưởng cao hơn cho các ô cơ sở vật liệu MM trong đường dẫn. Trong cấu hình này, giá trị điện dung của tụ điện gắn thêm cho các ô cơ sở thuộc đường dẫn là 40 pF, như đã thảo luận trong **Hình 5.2**, trong khi các ô cơ sở ở phần còn lại của tấm vật liệu MM được gắn tụ điện với điện dung 50 pF. Điều đó dẫn đến các tần số cộng hưởng khác nhau của các ô cơ sở, lần lượt là 20 MHz và 18 MHz đối với các phần tử thuộc đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường và các phần tử ở phần còn lại của tấm vật liệu MM 2-D. Tần số cộng hưởng của các ô cơ sở trong đường dẫn cao hơn 11% so với các ô cơ sở còn lại, làm cho chế độ đường dẫn rơi vào vùng cấm lai hóa của tấm MM [122]. Do khoảng cách dải lai hóa được hình thành trong tấm vật liệu MM, năng lượng từ trường bị giới hạn trong khu vực đường dẫn. Do đó, năng lượng từ trường có thể được lan truyền một cách hiệu quả trong đường dẫn. Cấu hình đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường này có thể được sửa đổi đơn giản bằng cách điều chỉnh giá trị điện dung của tụ điện gắn vào các ô cơ sở vật liệu MM.



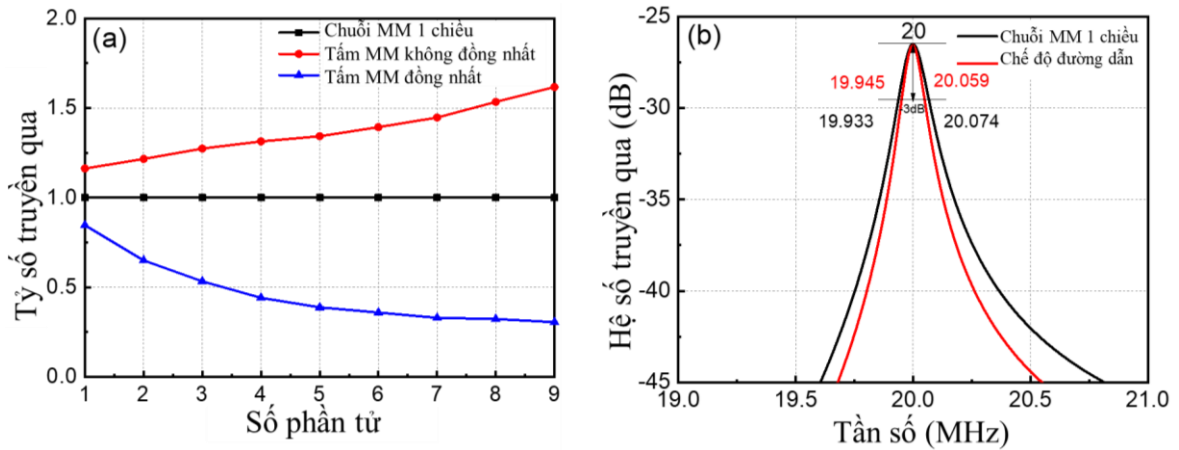
Hình 5.6. Cường độ từ trường đo được ở 20,3 MHz trong: (a) tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất và (b) tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất.

Để khảo sát trường định xứ trên đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường sử dụng tấm vật liệu MM được đề xuất, cường độ từ trường trên tấm vật liệu MM đã được đo đạc. **Hình 5.6** cho thấy phân bố từ trường trên tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất và tấm MM 2-D không đồng nhất ở tần số 20,3 MHz. Ô trung tâm ở cạnh trái của tấm vật liệu MM 2-D được chọn làm nguồn để kích thích tấm vật liệu. Trong tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất, năng lượng từ trường lan truyền trên tấm, dẫn đến cường độ từ trường giảm nhanh chóng khi ra khỏi nguồn kích thích, như trong **Hình 5.6(a)**. Năng lượng từ trường được phân bố trên toàn bộ tấm, làm tăng đáng kể hệ số suy hao, do đó tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất không hiệu quả để lan truyền năng lượng từ trường. Trong **Hình 5.6(b)**, tất cả các ô cơ sở ở tâm của hướng y trong tấm vật liệu MM 2-D được thay đổi tần số cộng hưởng (cao hơn 11% so với tần số của các ô cơ sở còn lại) để tạo đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường. Kết quả cho thấy từ trường mạnh được định xứ dọc theo đường dẫn thay vì từ trường phân bố trên tất cả các ô cơ sở trong tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất với cường độ yếu. Trong cấu hình này, năng lượng từ trường lan truyền theo hướng x qua chín phần tử, tương tự như trường hợp chuỗi vật liệu MM 1-D. Tần số cộng hưởng của ô cơ sở vật liệu MM có thể thay đổi bằng cách thay đổi tụ điện gắn ngoài, do đó cấu hình đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường cũng có thể dễ dàng sửa đổi và tạo ra ở các đường dẫn khác nhau trong tấm vật liệu MM 2-D. Năng lượng hoặc tín hiệu có thể được truyền đi dọc theo đường dẫn từ một nguồn duy nhất đến bất kỳ vị trí nào trong tấm. Trong nghiên cứu này, bước sóng của sóng điện từ ở 20,3 MHz là 15 m, lớn hơn nhiều so với kích thước một chiều của tấm vật liệu MM 2-D (45 cm). Do đó, thiết kế này của đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường hay ống dẫn sóng cảm ứng từ hoạt động ở chế độ kích thước của hệ thống nhỏ hơn nhiều lần so với bước sóng. Từ đó cấu trúc

này có nhiều ý nghĩa trong nghiên cứu tương tác của sóng điện từ với vật chất cũng như các ứng dụng thực tế khác.

Khả năng giam giữ từ trường trong đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường sẽ ảnh hưởng đến cường độ truyền dẫn hay hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường của các cấu hình ống dẫn sóng. Hình 5.7(a) cho thấy sự so sánh cường độ truyền dẫn được thể hiện bởi tỷ số truyền qua của ba cấu hình, bao gồm: chuỗi vật liệu MM 1-D (màu đen), đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường trong tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất (màu đỏ) và đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường trong tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất (màu xanh). Trong so sánh này, để có thể thấy rõ được sự giam giữ từ trường trong tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất, hệ số truyền qua của chuỗi vật liệu MM 1-D được chọn làm giá trị chuẩn hóa. Từ đó, hệ số truyền qua của cấu trúc vật liệu MM 2-D không đồng nhất và của cấu trúc vật liệu MM 2-D đồng nhất được so sánh với hệ số truyền qua của chuỗi vật liệu MM 1-D và giúp xác định được tỷ số truyền qua của mỗi cấu hình.

Kết quả cho thấy, tại ô cơ sở thứ 9 trong đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường của tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất, tỷ số truyền qua là 0,31, điều này có nghĩa là năng lượng bị rò rỉ sang các phần khác của tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất khi số phần tử ô cơ sở vật liệu MM tăng và gây ra sự suy giảm lớn trong quá trình lan truyền. Tuy nhiên, tại ô cơ sở thứ 9 trong đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường của tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất, tỷ số truyền qua lại đạt tới 1,62, tương ứng cao hơn 5,2 lần so với trường hợp tấm vật liệu MM 2-D đồng nhất. Điều này có thể được giải thích dựa vào hệ số phẩm chất của các ô cơ sở vật liệu MM trong đường dẫn đó ở hai cấu hình. Hình 5.7(b) cho thấy hệ số truyền qua đo được trong chế độ ghép cặp yếu để trích xuất hệ số phẩm chất. Trong tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất, hệ số phẩm chất Q của các ô cơ sở trong đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường là 175, cao hơn hệ số phẩm chất của các ô cơ sở ở phần còn lại của tấm, cũng chính là hệ số phẩm chất của các ô cơ sở trong chuỗi ô cơ sở vật liệu MM 1-D, là 142. Như vậy, bằng cách tạo ra đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường trong tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất với các ô cơ sở trong đường dẫn có hệ số phẩm chất cao hơn các ô cơ sở ở phần còn lại trong tấm đã làm giảm suy hao từ trường hay tăng cường hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong tấm. Như vậy, nhìn chung khi số lượng phần tử tăng lên, hiệu ứng giam giữ từ trường trong tấm MM 2-D không đồng nhất và rò rỉ từ trường trong tấm MM 2-D đồng nhất rõ ràng hơn, dẫn đến hệ số truyền qua lần lượt lớn hơn và nhỏ hơn so với hệ số truyền qua trong chuỗi ô cơ sở vật liệu MM 1-D.

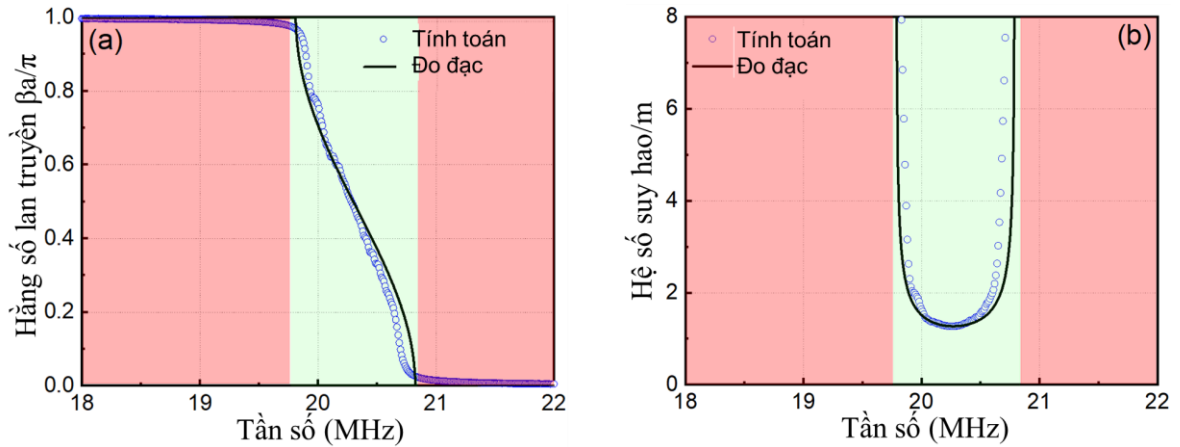


Hình 5.7. (a) So sánh sự lan truyền năng lượng từ trường đo được cho ba cấu hình: chuỗi vật liệu MM 1-D (màu đen), tấm vật liệu MM đồng nhất (màu xanh), tấm vật liệu MM không đồng nhất (màu đỏ) (b) hệ số truyền qua đo được trong chế độ ghép cặp yếu để trích xuất hệ số phẩm chất của ô cơ sở vật liệu MM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

Một trong những đặc tính kỳ lạ của sự lan truyền năng lượng từ trường trong đường dẫn lan truyền năng lượng trên tấm vật liệu MM là sự lan truyền ngược. **Hình 5.8(a)** cho thấy quan hệ tán sắc tính toán và đo được của đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường trong tấm vật liệu MM không đồng nhất. Đường cong này được đo gián tiếp bằng máy VNA qua pha của tham số S_{21} theo tần số. Kết quả đo phù hợp tốt với kết quả từ phương trình (1.30) ở chương 1 khi đo hệ số ghép cặp $k = -0,036$ được sử dụng để tính toán. Kết quả chỉ ra rằng tấm vật liệu MM không đồng nhất cho phép lan truyền năng lượng từ trường ở dải tần từ 19,75 đến 20,8 MHz với đường cong tán sắc có độ dốc âm. Đặc tính lan truyền ngược này của năng lượng từ trường trong đường dẫn được thể hiện, trong đó vận tốc năng lượng và vận tốc pha ngược hướng nhau [123]. Thuộc tính đó liên quan tới sự hệ số ghép cặp âm giữa các ô cơ sở vật liệu MM lân cận. Bởi vì trong cấu hình phẳng, từ trường xuất phát từ ô cơ sở vật liệu MM nguồn phải đổi hướng để truyền năng lượng vào các ô lân cận. Đường cong tán sắc cũng mô tả khả năng truyền sóng chậm trong ống dẫn sóng vật liệu MM [124]. Do đó, cấu trúc vật liệu MM được đề xuất này cung cấp một cách tiếp cận mới để làm chậm sóng trong chế độ dẫn sóng trong cấu trúc có kích thước nhỏ hơn so với bước sóng.

Sự lan truyền năng lượng từ trường trong các hốc cộng hưởng vật liệu MM cộng hưởng cục bộ đã được nghiên cứu bởi Kaina và cộng sự trong [124]. Tuy nhiên, họ tập trung vào điện trường ở vùng tần số GHz, trong khi nghiên cứu này trình bày tác động của vật liệu MM ở vùng tần số MHz. **Hình 5.8(b)** cho thấy độ suy hao tính

toán và đo được của đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường trong tấm MM 2-D không đồng nhất. Cả kết quả tính toán và đo đạc đều có giá trị nhỏ nhất tại 20,3 MHz và tăng dần về phía biên dải của đường cong tán sắc, tại đó $\beta a/\pi = 0$ hoặc 1. Độ suy hao duy trì giá trị nhỏ khoảng 1,2/mét trong dải tần từ 20 đến 20,5 MHz. Độ suy hao thấp chứng tỏ rằng các chế độ lan truyền có thể lan truyền hiệu quả thông qua đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường trong tấm MM 2-D không đồng nhất.



Hình 5.8. Kết quả tính toán, đo đạc: (a) mối quan hệ tán sắc và (b) độ suy hao của đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường trong tấm MM 2-D không đồng nhất.

Đối với tấm MM 2-D không đồng nhất được đề xuất, khả năng định xứ sẽ ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống vật liệu biến hóa. Mặc dù hệ số phẩm chất Q là một tham số quan trọng, nhưng hệ số Purcell đóng một vai trò không thể bỏ qua trong định nghĩa về chế độ định xứ. Hệ số Purcell thông thường có thể được biểu diễn dưới dạng [125]:

$$F_0 = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda_{\text{guide}}}{n} \right)^3 \frac{Q}{V_e} \quad (5.1)$$

Trong đó λ_{guide} và Q lần lượt là bước sóng cộng hưởng và hệ số phẩm chất Q của các ô cơ sở trong ống dẫn sóng, V_e là khối lượng mô hình hiệu dụng.

Xem xét tấm vật liệu MM 2-D, hệ số Purcell cho chế độ định hướng (trong đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường) có thể được đơn giản hóa thành [126]:

$$F_{\text{guide}} = \frac{\Gamma_{\text{guided}}}{\Gamma_0} = \frac{3}{4\pi} \frac{\lambda^2 n_g}{A_e} \quad (5.2)$$

Trong đó Γ_{guided} là tốc độ phân rã của ô cơ sở trong đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường, Γ_0 là tốc độ phân rã trong chân không, n_g là chỉ số nhóm và A_e là

diện tích hiệu dụng, được xác định bằng giới hạn không gian của ô cơ sở (5 cm^2). Chỉ số nhóm n_g được xác định từ quan hệ tán sắc của đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường [84]:

$$n_g = \frac{\beta}{k_0} \quad (5.3)$$

Trong đó k_0 là hằng số truyền dẫn trong chân không, β được xác định từ công thức (1.38) ở chương 1.

Từ quan hệ tán sắc của đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường đó [84], chúng tôi thu được chỉ số nhóm $n_g = 1876$ tại $f = 20 \text{ MHz}$. Sử dụng các tham số này, chúng tôi thu được $F_{\text{guide}} = 4,03 \cdot 10^7$. Kết quả này lớn hơn so với hệ số Purcell thông thường vì hệ thống vật liệu MM có kích thước rất nhỏ so với bước sóng hoạt động, với tỉ lệ giữa khoảng cách mạng ($0,05 \text{ m}$) và bước sóng cộng hưởng (15 m) là $0,0033$.

5.3. Kết luận chương 5

Trong chương này, bằng phương pháp mô phỏng và thực nghiệm, chúng tôi đã nghiên cứu và đề xuất một cấu trúc vật liệu MM có từ trường định xứ hoạt động ở dải tần số MHz giúp tăng cường hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong cấu trúc vật liệu. Cấu trúc tấm vật liệu MM được đề xuất có dạng tấm 2-D không đồng nhất với đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường được tạo ra bởi chuỗi các hốc cộng hưởng được sắp xếp theo một trật tự nhất định để tăng cường hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong đường dẫn đó. Cấu trúc tấm vật liệu MM gồm 9×9 ô cơ sở mà mỗi ô cơ sở được xây dựng từ một cuộn xoắn ốc năm vòng đặt trên chất nền FR-4. Các tụ điện ngoài có giá trị 40 pF được gắn cho các ô cơ sở thuộc đường dẫn nhằm tạo ra chuỗi các hốc cộng hưởng theo một trật tự nhất định và các tụ điện ngoài có giá trị 50 pF được gắn cho các ô cơ sở ở phần còn lại của tấm. Trên cơ sở đó các phần tử thuộc đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường hoạt động ở tần số 20 MHz (cao hơn 11% so với các ô cơ sở còn lại) và các phần tử ở phần còn lại của tấm hoạt động ở tần số 18 MHz . Với tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất hoạt động ở dải tần số MHz này tổn hao bức xạ là không đáng kể, cho phép từ trường tập trung mạnh trong cấu trúc đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường, từ đó giúp tăng cường hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong tấm. Với khả năng giới hạn từ trường mạnh trong đường dẫn lan truyền năng lượng từ trường, hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường trong tấm vật liệu MM 2-D không đồng nhất đã tăng $5,2$ lần so với hiệu suất lan truyền năng lượng từ trường của tấm vật liệu MM đồng nhất. Cấu trúc này có thể sử dụng trong nhiều ứng dụng liên lạc dưới lòng đất, dưới nước, nơi các

liên kết thông tin liên lạc truyền thống sử dụng ăng-ten trường xa khó được triển khai do tổn thất bức xạ. Đồng thời, cấu trúc này cũng cho thấy tiềm năng trong nhiều ứng dụng như thiết bị truyền dẫn năng lượng từ trường (thiết bị sóng cảm ứng từ), hệ thống chụp ảnh cộng hưởng từ, thiết bị truyền năng lượng và dữ liệu đồng thời.

Các kết quả nghiên cứu trong chương này đã được đăng trên tạp chí SCIE và trong “Danh mục công trình công bố liên quan đến luận án” là công trình 2.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

KẾT LUẬN

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

Luận án đã hoàn thành các mục tiêu đặt ra và thu được một số kết quả chính đóng góp cho nghiên cứu về Khoa học vật liệu nói chung và lĩnh vực nghiên cứu vật liệu biến hoá nói riêng, cụ thể như sau:

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

2. Đã khảo sát được các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số MHz trong môi trường dẫn điện. Hiệu suất của hệ thống phụ thuộc vào các tham số: hệ số phẩm chất, độ tự cảm và điện trở của các cuộn cộng hưởng. Các tham số này phụ thuộc vào độ dẫn điện, kích thước của khối dẫn điện và tần số hoạt động của hệ thống. Trong môi trường dẫn điện, khi độ dẫn điện của môi trường tăng sẽ làm tăng điện trở bức xạ của các cuộn cộng hưởng gây ra bởi dòng điện xoáy ở tần số cao, từ đó dẫn đến làm giảm hệ số phẩm chất của các cuộn hay làm giảm hiệu suất của hệ thống. Với độ dày khối dẫn điện nhỏ hơn khoảng cách truyền dẫn, hệ thống hoạt động ở dải tần số cao hơn (20 MHz) đạt được hiệu suất cao hơn và hiệu suất này giảm chậm khi tăng độ dẫn điện. Còn ở độ dày khối dẫn điện bằng khoảng cách truyền dẫn, tồn tại một giá trị của độ dẫn điện mà dưới giá trị đó, hệ thống hoạt động ở dải tần số cao hơn (20 MHz) thu được hiệu suất cao; trên giá trị độ dẫn điện đó, hệ thống hoạt động ở dải tần số thấp hơn (10 MHz)

lại hiệu quả hơn và hiệu suất của hệ thống suy giảm chậm hơn khi độ dẫn điện của khối tăng.

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

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

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

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

KIẾN NGHỊ

1. Tiếp tục nghiên cứu các hệ thống MR-WPT sử dụng vật liệu MM hoạt động ở dải tần số MHz trong các môi trường có độ dẫn điện khác nhau ứng dụng trong các môi trường đặc biệt như truyền năng lượng và thông tin trong môi trường dưới mặt đất, dưới nước và truyền năng lượng cho các thiết bị cấy ghép trong cơ thể người.

2. Tiếp tục nghiên cứu vật liệu MM 2-D không đồng nhất với đa đường dẫn truyền năng lượng từ trường nhằm tới ứng dụng trong các hệ thống truyền năng lượng không dây có cấu hình phẳng và nhiều bộ nhận năng lượng từ cùng một bộ phát.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

* Tạp chí thuộc danh mục SCIE

1. Thanh Son Pham, Thao Duy Nguyen, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Thu Trang Hoang, Quang Minh Ngo, **Le Thi Hong Hiep** & Vu Dinh Lam, “*Optimal frequency for magnetic resonant wireless power transfer in conducting medium*”, Scientific Reports **11**, 18690 (2021).
2. **Le Thi Hong Hiep**, Thanh Son Pham, Bui Xuan Khuyen, Bui Son Tung, Quang Minh Ngo, Nguyen Thi Hien, Nguyen Thai Minh and Vu Dinh Lam, “*Enhanced transmission efficiency of magneto-inductive wave propagating in non-homogeneous 2-D magnetic metamaterial array*”, Physica Scripta **97**, 025504 (2022).
3. **Le Thi Hong Hiep**, Bui Xuan Khuyen, Bui Son Tung, Quang Minh Ngo, Vu Dinh Lam and Thanh Son Pham, “*Flexible Magnetic Metasurface with Defect Cavity for Wireless Power Transfer System*”, Materials **15**, 6583 (2022).
4. **Le Thi Hong Hiep**, Huu Nguyen Bui, Bui Son Tung, Vu Dinh Lam, Bui Xuan Khuyen, Thanh Son Pham, “*Enhanced efficiency of magnetic resonant wireless power transfer system using rollable and foldable metasurface based on polyimide substrate*”, Applied Physics A **130**, 521 (2024).

* Tạp chí Quốc gia

5. Thanh Son Pham, Bui Xuan Khuyen, Bui Son Tung, **Le Thi Hong Hiep**, Vu Dinh Lam, “*A critical review on wireless power transfer systems using Metamaterials*”, Vietnam Journal of Science and Technology **60** (4), 587-613 (2022).
6. **Lê Thị Hồng Hiệp**, Phạm Thanh Sơn, Bùi Xuân Khuyển, Bùi Sơn Tùng, Trần Văn Huỳnh, Vũ Đình Lâm, “*Tối ưu hiệu suất của hệ thống truyền năng lượng không dây cộng hưởng từ sử dụng hệ số phẩm chất của bộ cộng hưởng phát/thụ*”, TNU Journal of Science and Technology **228** (14), 222-229 (2023).

* Kỹ yếu Hội nghị Quốc gia

7. **Lê Thị Hồng Hiệp**, Phạm Thanh Sơn, Bùi Xuân Khuyển, Bùi Sơn Tùng, Trần Văn Huỳnh, Vũ Đình Lâm, “*Nghiên cứu khảo sát vị trí đặt tấm vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm nhằm tối ưu hiệu suất của hệ thống truyền năng lượng không dây cộng hưởng từ*”, Hội nghị Vật lý chất rắn và Khoa học vật liệu toàn quốc lần thứ 13 (SPMS 2023), 5-7/11, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam, Quyển 2, 702-705 (2023).

DANH MỤC 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. Khayrudinov, 2015, Wireless Power Transfer system: Development and Implementation, *Thesis for Bachelor of Engineering, Metropolia University of Applied Sciences*.
3. 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.
4. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P., and Soljačić M., 2007, Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, *Science*, 317(5834), pp. 83–86.
5. Choi J.H., Kang S.H., and Jung C.W., 2017, Magnetic Resonant Wireless Power Transfer with L-Shape Arranged Resonators for Laptop Computer, *J Electromagn Eng Sci*, 17(3), pp. 126–132.
6. ETSI TR 103 493 V1.1.1, 2019, Wireless Power Transmission (WPT) systems operating below 30 MHz, .
7. Huang W., Li C., Fang B., Xu J., Liu F., Xu L., Tang Y., Hong Z., and Jing X., 2024, Research progress of terahertz wave dynamic control of digital coded metasurfaces, *Opt Lasers Eng*, 174, pp. 107977.
8. Boardman A., 2011, Pioneers in metamaterials: John Pendry and Victor Veselago, *J Opt*, 13(2), pp. 020401.
9. Koschny T., Soukoulis C.M., and Wegener M., 2017, Metamaterials in microwaves, optics, mechanics, thermodynamics, and transport, *J Opt*, 19(8), pp. 084005.
10. 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.
11. 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.
12. Shamonina E., Kalinin V.A., Ringhofer K.H., and Solymar L., 2002, Magneto-inductive waveguide, *Electron Lett*, 38(8), pp. 371.
13. Wang B., Teo K.H., Nishino T., Yerazunis W., Barnwell J., and Zhang J., 2011, Experiments on wireless power transfer with metamaterials, *Appl Phys Lett*, 98(25), pp. 254101.

14. Đỗ Thành Việt, 2015, Nghiên cứu chế tạo và tính chất hấp thụ tuyệt đối sóng viba của vật liệu meta (metamaterials), Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
15. Phạm Thị Trang, 2017, Nghiên cứu khả điều khiển tần số và biên độ cộng hưởng của vật liệu biến hóa (metamaterial), Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
16. Đinh Hồng Tiếp, 2020, Nghiên cứu chế tạo vật liệu hấp thụ băng tần rộng vùng GHz trên cơ sở vật liệu biến hóa (metamaterials), Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
17. Dương Thị Hà, 2024, Nghiên cứu đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa cộng hưởng bậc cao có tính năng đàn hồi ở vùng tần số GHz, Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
18. Nguyễn Thị Hiền, 2016, Nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số cấu trúc lên dải tần làm việc của vật liệu meta có chiết suất âm, Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
19. Đặng Hồng Lưu, 2019, Nghiên cứu vật liệu biến hóa (metamaterials) hấp thụ sóng điện từ ở vùng tần số THz, Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
20. Trần Văn Huỳnh, 2022, Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ đẳng hướng của vật liệu biến hóa trên cơ sở kết hợp với graphene, Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
21. Lê Văn Long, 2024, Nghiên cứu điều khiển đặc trưng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa bằng tác động cơ học và điện áp, Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
22. Xuan Khuyen B., Ngoc N.V., Ngoc Dung D., Hai N.P., Tung N.T., Son Tung B., Dinh Lam V., Truong Giang H., Tan P.D., Chen L., Zheng H., and Lee Y., 2024, Dual-band infrared metamaterial perfect absorber for narrow-band thermal emitters, *J Phys Appl Phys*, 57(28), pp. 285501.
23. Pham T.S., Ranaweera A.K., Ngo D.V., and Lee J.-W., 2017, Analysis and experiments on Fano interference using a 2D metamaterial cavity for field localized wireless power transfer, *J Phys Appl Phys*, 50(30), pp. 305102.
24. Ha-Van N., Le-Huu H., Le M.T., Park K., and Seo C., 2020, Free-Positioning Wireless Power Transfer Using a 3D Transmitting Coil for Portable Devices, *J Electromagn Eng Sci*, 20(4), pp. 270–276.
25. Ha-Van N., Vu T.L., and Thuy Le M., 2021, An Efficient Wireless Power Transfer for Retinal Prosthesis using Artificial Intelligent Algorithm, *2020 50th European Microwave Conference (EuMC)*, Utrecht, Netherlands, IEEE, 1115–1118.

26. N. Tesla, 1905, The transmission of electrical energy without wires as a means for further peace,” *Electrical World and Engineering*, 21.
27. Brown W.C., 1984, The History of Power Transmission by Radio Waves, *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 32(9), pp. 1230–1242.
28. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P., and Soljačić M., 2007, Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, *Science*, 317(5834), pp. 83–86.
29. Van Mulders J., Delabie D., Lecluyse C., Buyle C., Callebaut G., Van Der Perre L., and De Strycker L., 2022, Wireless Power Transfer: Systems, Circuits, Standards, and Use Cases, *Sensors*, 22(15), pp. 5573.
30. Park C., Lee S., Cho G.-H., and Rim C.T., 2015, Innovative 5-m-Off-Distance Inductive Power Transfer Systems With Optimally Shaped Dipole Coils, *IEEE Trans Power Electron*, 30(2), pp. 817–827.
31. <https://www.sjelectronics.co.uk/blog/simplify-complicated-emi-measurement-and-debugging/>, .
32. Keller R.B., 2023, Electromagnetic Fields, *Design for Electromagnetic Compatibility--In a Nutshell*. Springer International Publishing, Cham, pp. 95–109.
33. Detka K. and Górecki K., 2022, Wireless Power Transfer—A Review, *Energies*, 15(19), pp. 7236.
34. Liu Z., Li T., Li S., and Mi C.C., 2024, Advancements and challenges in wireless power transfer: A comprehensive review, *Nexus*, 1(2), pp. 100014.
35. Garnica J., Chinga R.A., and Lin J., 2013, Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field, *Proc IEEE*, 101(6), pp. 1321–1331.
36. Alhamrouni I., Iskandar M., Salem M., J. Awalin L., Jusoh A., and Sutikno T., 2020, Application of inductive coupling for wireless power transfer, *Int J Power Electron Drive Syst IJPEDS*, 11(3), pp. 1109.
37. Seo D.-W., Lee J.-H., and Lee H., 2016, A Study on Two-coil and Four-coil Wireless Power Transfer System Using Z-parameter Approach, *ETRI J*, (38(3)), pp. 568–578.
38. 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.
39. Lee W. and Yoon Y.-K., 2020, Wireless Power Transfer Systems Using Metamaterials: A Review, *IEEE Access*, 8, pp. 147930–147947.
40. Zhang X., Meng H., Wei B., Wang S., and Yang Q., 2018, An improved three-coil wireless power link to increase spacing distance and power for magnetic resonant coupling system, *EURASIP J Wirel Commun Netw*, 2018(1), pp. 131.

41. Song M., Belov P., and Kapitanova P., 2017, Wireless power transfer inspired by the modern trends in electromagnetics, *Appl Phys Rev*, 4(2), pp. 021102.
42. Pham, 2021, Investigation on coil misalignment affect magnetic resonant wireless power transfer system, *J Mil Sci Technol*, (75), pp. 57–64.
43. Wei X., Wang Z., and Dai H., 2014, A Critical Review of Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, *Energies*, 7(7), pp. 4316–4341.
44. Fan X., Zhang H., and Zhang X., 2024, Analysis of transmission performance on wireless power transfer system with metamaterial, *Int J Microw Wirel Technol*, 16(1), pp. 83–91.
45. Sidiku M.B., Eronu E.M., and Ashigwuike E.C., 2021, A review on wireless power transfer: Concepts, implementations, challenges, and mitigation scheme, *Niger J Technol*, 39(4), pp. 1206–1215.
46. Jibin S., Ming L., Yipin Wu, and Chengbin M., 2020, Application of Wireless Power Transfer in Smart Homes and Buildings, A CABA White Paper.
47. Hwang M.-W., Kwon Y.-M., and Ko K.-C., 2024, Optimal Design of Relay Coil Inductance to Improve Transmission Efficiency of Four-Coil Magnetic Resonance Wireless Power Transmission Systems, *Electronics*, 13(7), pp. 1261.
48. Li Z., Lee J., Lim J., and Lee B., 2023, Efficient Distributed Wireless Power Transfer System for Multiple Wearable Sensors through Textile Coil Array, *Sensors*, 23(5), pp. 2810.
49. Wagih M., Komolafe A., and Zaghari B., 2020, Dual-Receiver Wearable 6.78 MHz Resonant Inductive Wireless Power Transfer Glove Using Embroidered Textile Coils, *IEEE Access*, 8, pp. 24630–24642.
50. Kim H., Rigo B., Wong G., Lee Y.J., and Yeo W.-H., 2024, Advances in Wireless, Batteryless, Implantable Electronics for Real-Time, Continuous Physiological Monitoring, *Nano-Micro Lett*, 16(1), pp. 52.
51. Haerinia M. and Shadid R., 2020, Wireless Power Transfer Approaches for Medical Implants: A Review, *Signals*, 1(2), pp. 209–229.
52. Yang C.-L., Chang C.-K., Lee S.-Y., Chang S.-J., and Chiou L.-Y., 2017, Efficient Four-Coil Wireless Power Transfer for Deep Brain Stimulation, *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 65(7), pp. 2496–2507.
53. Radkovskaya A., Petrov P., Kiriushchekina S., Satskiy A., Ivanyukovich M., Vakulenko A., Prudnikov V., Kotelnikova O., Korolev A., and Zakharov P., 2018, Magnetic metamaterials: Coupling and permeability, *J Magn Magn Mater*, 459, pp. 187–190.

54. Smith D.R., Schultz S., Markoš P., and Soukoulis C.M., 2002, Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients, *Phys Rev B*, 65(19), pp. 195104.
55. Rothwell E.J., Frasch J.L., Ellison S.M., Chahal P., and Ouedraogo R.O., 2016, Analysis of the nicolson-ross-weir method for characterizing the electromagnetic properties of engineered materials, *Prog Electromagn Res*, 157, pp. 31–47.
56. Chen X., Grzegorzczak T.M., Wu B.-I., Pacheco J., and Kong J.A., 2004, Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials, *Phys Rev E*, 70(1), pp. 016608.
57. 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.
58. Ranaweera A.L.A.K., Duong T.P., and Lee J.-W., 2014, Experimental investigation of compact metamaterial for high efficiency mid-range wireless power transfer applications, *J Appl Phys*, 116(4), pp. 043914.
59. Lee W. and Yoon Y.-K., 2020, Wireless Power Transfer Systems Using Metamaterials: A Review, *IEEE Access*, 8, pp. 147930–147947.
60. Pendry J.B., 2000, Negative Refraction Makes a Perfect Lens, *Phys Rev Lett*, 85(18), pp. 3966–3969.
61. Bingnan Wang, Nishino T., and Koon Hoo Teo, 2010, Wireless power transmission efficiency enhancement with metamaterials, *2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems*, IEEE, 1–4.
62. Jennifer M.T., 2009, Three axisymmetric inductors configured from circular current loops for wireless power transfer, electrical engineering, Thesis mater, *Rensselaer Polytechnic Institute*.
63. Choi J.H. and Seo C., 2010, High-efficiency wireless energy transmission using magnetic resonance based on negative refractive index metamaterial, *Prog Electromagn Res*, 106, pp. 33–47.
64. Urzhumov Y. and Smith D.R., 2011, Metamaterial-enhanced coupling between magnetic dipoles for efficient wireless power transfer, *Phys Rev B*, 83(20), pp. 205114.
65. Huang D., Urzhumov Y., Smith D.R., Hoo Teo K., and Zhang J., 2012, Magnetic superlens-enhanced inductive coupling for wireless power transfer, *J Appl Phys*, 111(6), pp. 064902.
66. Ramakrishna S.A. and Grzegorzczak T.M., 2008, Physics and Applications of Negative Refractive Index Materials, *CRC Press*.

67. Zeng Y., Lu C., Rong C., Tao X., Liu X., Liu R., and Liu M., 2021, Analysis and Design of Asymmetric Mid-Range Wireless Power Transfer System with Metamaterials, *Energies*, 14(5), pp. 1348.
68. Lee W. and Yoon Y.-K., 2021, Rollable metamaterial screen for magnetic resonance coupling-based high-efficiency wireless power transfer, *Int J Microw Wirel Technol*, 13(4), pp. 365–373.
69. Wang B., Teo K.H., Nishino T., Yerazunis W., Barnwell J., and Zhang J., 2011, Experiments on wireless power transfer with metamaterials, *Appl Phys Lett*, 98(25), pp. 254101.
70. Chen J.-F., Ding Z., Hu Z., Wang S., Cheng Y., Liu M., Wei B., and Wang S., 2017, Metamaterial-based high-efficiency wireless power transfer system at 13.56 mhz for low power applications, *Prog Electromagn Res B*, 72, pp. 17–30.
71. Zeng Y., Lu C., Rong C., Tao X., Liu X., Liu R., and Liu M., 2021, Analysis and Design of Asymmetric Mid-Range Wireless Power Transfer System with Metamaterials, *Energies*, 14(5), pp. 1348.
72. Pham T.S., Khuyen B.X., Tung B.S., Hoang T.T., Pham V.D., Ngo Q.M., and Lam V.D., 2021, Enhanced Efficiency of Asymmetric Wireless Power Transmission Using Defects in 2D Magnetic Metamaterials, *J Electron Mater*, 50(2), pp. 443–449.
73. Duong T. and Lee J.-W., 2015, A Dynamically Adaptable Impedance-Matching System for Midrange Wireless Power Transfer with Misalignment, *Energies*, 8(8), pp. 7593–7617.
74. Ranaweera A.L.A.K., Moscoso C.A., and Lee J.-W., 2015, Anisotropic metamaterial for efficiency enhancement of mid-range wireless power transfer under coil misalignment, *J Phys Appl Phys*, 48(45), pp. 455104.
75. Wang S., Jiang C., Tao X., Chen F., Rong C., Lu C., Zeng Y., Liu X., Liu R., Wei B., and Liu M., 2020, Enhancing the Stability of Medium Range and Misalignment Wireless Power Transfer System by Negative Magnetic Metamaterials, *Materials*, 13(24), pp. 5695.
76. Lee W. and Yoon Y.-K., 2020, Tunable Metamaterial Slab for Efficiency Improvement in Misaligned Wireless Power Transfer, *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 30(9), pp. 912–915.
77. Lu C., Huang X., Rong C., Hu Z., Chen J., Tao X., Wang S., Wei B., and Liu M., 2019, Shielding the magnetic field of wireless power transfer system using zero-permeability metamaterial, *J Eng*, 2019(16), pp. 1812–1815.
78. Ranaweera A.L.A.K., Pham T.S., Bui H.N., Ngo V., and Lee J.-W., 2019, An active metasurface for field-localizing wireless power transfer using dynamically reconfigurable cavities, *Sci Rep*, 9(1), pp. 11735.

79. Pham T.S., Bui H.N., and Lee J.-W., 2019, Wave propagation control and switching for wireless power transfer using tunable 2-D magnetic metamaterials, *J Magn Magn Mater*, 485, pp. 126–135.
80. Yang F., Song J., Guo Z., Wu X., Zhu K., Jiang J., Sun Y., Jiang H., Li Y., and Chen H., 2021, Actively controlled asymmetric edge states for directional wireless power transfer, *Opt Express*, 29(5), pp. 7844.
81. Chu S., Luloff M.S., Yan J., Petrov P., Stevens C.J., and Shamonina E., 2021, Magnetoinductive waves in attenuating media, *Sci Rep*, 11(1), pp. 7679.
82. 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.
83. Sydoruk O., Zhuromskyy O., Shamonina E., and Solymar L., 2005, Phonon-like dispersion curves of magnetoinductive waves, *Appl Phys Lett*, 87(7), pp. 072501.
84. Solymar L. and Shamonina E., 2009, *Waves in Metamaterials*, Oxford University press.
85. Huang X., Lu C., and Liu M., 2020, Calculation and analysis of near-field magnetic spiral metamaterials for MCR-WPT application, *Appl Phys A*, 126(3), pp. 170.
86. Kumar P., Ali T., and Pai M.M.M., 2021, Electromagnetic Metamaterials: A New Paradigm of Antenna Design, *IEEE Access*, 9, pp. 18722–18751.
87. Hong Hiep L.T., Pham T.S., Khuyen B.X., Tung B.S., Ngo Q.M., Thi Hien N., Minh N.T., and Lam V.D., 2022, Enhanced transmission efficiency of magnetoinductive wave propagating in non-homogeneous 2-D magnetic metamaterial array, *Phys Scr*, 97(2), pp. 025504.
88. Pham T.S., Khuyen B.X., Tung B.S., Hoang T.T., Pham V.D., Ngo Q.M., and Lam V.D., 2021, Enhanced Efficiency of Asymmetric Wireless Power Transmission Using Defects in 2D Magnetic Metamaterials, *J Electron Mater*, 50(2), pp. 443–449.
89. Ali A., Mohd Yasin M.N., Faiz Wan Ali W.F., Mahmed N., Kamarudin M.R., Adam I., Jusoh M., Rahim H.A., Khor S.F., Nurulazlina Ramli, and Ali N., 2021, A Comprehensive Review of Midrange Wireless Power Transfer Using Dielectric Resonators, *Int J Antennas Propag*, 2021, pp. 1–14.
90. Jinliang L., Qijun D., Wenshan H., and Hong Z., 2017, Research on quality factor of the coils in wireless power transfer system based on magnetic coupling resonance, *2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, Chongqing, China, IEEE, 123–127.

91. Özüpak Y., 2024, Analysis and experimental verification of efficiency parameters affecting inductively coupled wireless power transfer systems, *Heliyon*, 10(5), pp. e27420.
92. 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.
93. Yan Z., Zhang Y., Kan T., Lu F., Zhang K., Song B., and Mi C.C., 2019, Frequency Optimization of a Loosely Coupled Underwater Wireless Power Transfer System Considering Eddy Current Loss, *IEEE Trans Ind Electron*, 66(5), pp. 3468–3476.
94. Li C., Liu Y., Hu D., and Sun W., 2020, Research on the Characteristics of Wireless Power Transfer in Non-ferromagnetic Metal Pipe, *J Phys Conf Ser*, 1607(1), pp. 012005.
95. Xu D., Zhang Q., and Li X., 2020, Implantable Magnetic Resonance Wireless Power Transfer System Based on 3D Flexible Coils, *Sustainability*, 12(10), pp. 4149.
96. Yan Z., Zhang Y., Zhang K., Song B., and Mi C., 2019, Underwater wireless power transfer system with a curly coil structure for AUVs, *IET Power Electron*, 12(10), pp. 2559–2565.
97. Liu X., Xia C., and Yuan X., 2018, Study of the Circular Flat Spiral Coil Structure Effect on Wireless Power Transfer System Performance, *Energies*, 11(11), pp. 2875.
98. Wang Y., Liu W., and Xie Y., 2019, Design and Optimization for Circular Planar Spiral Coils in Wireless Power Transfer System, *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Harbin, China, IEEE, 1–4.
99. Zaman M.A., Padhy P., and Hesselink L., 2019, Solenoidal optical forces from a plasmonic Archimedean spiral, *Phys Rev A*, 100(1), pp. 013857.
100. Zhi Sun and Akyildiz I.F., 2010, Magnetic Induction Communications for Wireless Underground Sensor Networks, *IEEE Trans Antennas Propag*, 58(7), pp. 2426–2435.
101. Kraichman M.B., 1962, Impedance of a circular loop in an infinite conducting medium, *J Res Natl Bur Stand Sect Radio Propag*, 66D(4), pp. 499.
102. Yan Z., Song B., Zhang K., Wen H., Mao Z., and Hu Y., 2018, Eddy current loss analysis of underwater wireless power transfer systems with misalignments, *AIP Adv*, 8(10), pp. 101421.
103. Yan Z., Zhang Y., Kan T., Lu F., Zhang K., Song B., and Mi C.C., 2019, Frequency Optimization of a Loosely Coupled Underwater Wireless Power

- Transfer System Considering Eddy Current Loss, *IEEE Trans Ind Electron*, 66(5), pp. 3468–3476.
104. Lenaerts B. and Puers R., 2009, Omnidirectional Inductive Powering for Biomedical Implants, *Springer Netherlands*.
 105. Wang, Song, and Mao, 2019, Application of Shielding Coils in Underwater Wireless Power Transfer Systems, *J Mar Sci Eng*, 7(8), pp. 267.
 106. Han J., Asada A., Ura T., Yamauchi Y., Yagita Y., and Maki T., 2007, Noncontact power supply for seafloor geodetic observing robot system, *J Mar Sci Technol*, 12(3), pp. 183–189.
 107. Poon A.S.Y., O'Driscoll S., and Meng T.H., 2010, Optimal Frequency for Wireless Power Transmission Into Dispersive Tissue, *IEEE Trans Antennas Propag*, 58(5), pp. 1739–1750.
 108. Hasaba R., Okamoto K., Kawata S., Eguchi K., and Koyanagi Y., 2019, Magnetic Resonance Wireless Power Transfer Over 10 m With Multiple Coils Immersed in Seawater, *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 67(11), pp. 4505–4513.
 109. Hu Y., Kang L., Zheng W., and Bai J., 2016, Impedance matching control method for an underwater magnetic resonance-based wireless power transfer system with metamaterials, *J Electromagn Waves Appl*, 30(15), pp. 2003–2019.
 110. Pham T.S., Nguyen T.D., Tung B.S., Khuyen B.X., Hoang T.T., Ngo Q.M., Hiep L.T.H., and Lam V.D., 2021, Optimal frequency for magnetic resonant wireless power transfer in conducting medium, *Sci Rep*, 11(1), pp. 18690.
 111. Wang S., Jiang C., Tao X., Chen F., Rong C., Lu C., Zeng Y., Liu X., Liu R., Wei B., and Liu M., 2020, Enhancing the Stability of Medium Range and Misalignment Wireless Power Transfer System by Negative Magnetic Metamaterials, *Materials*, 13(24), pp. 5695.
 112. Ranaweera A.L.A.K., Moscoso C.A., and Lee J.-W., 2015, Anisotropic metamaterial for efficiency enhancement of mid-range wireless power transfer under coil misalignment, *J Phys Appl Phys*, 48(45), pp. 455104.
 113. Pham T.S., Bui H.N., and Lee J.-W., 2019, Wave propagation control and switching for wireless power transfer using tunable 2-D magnetic metamaterials, *J Magn Magn Mater*, 485, pp. 126–135.
 114. Pham T.S., Ranaweera A.K., Lam V.D., and Lee J.-W., 2016, Experiments on localized wireless power transmission using a magneto-inductive wave two-dimensional metamaterial cavity, *Appl Phys Express*, 9(4), pp. 044101.
 115. Shan D., Wang H., Cao K., and Zhang J., 2022, Wireless power transfer system with enhanced efficiency by using frequency reconfigurable metamaterial, *Sci Rep*, 12(1), pp. 331.

116. Wang H., Chen Y.-S., and Zhao Y., 2021, A wearable metasurface for high efficiency, free-positioning omnidirectional wireless power transfer, *New J Phys*, 23(12), pp. 125003.
117. Ali R., Zamir B., and Shah H.A., 2018, Transverse electric surface waves in a plasma medium bounded by magnetic materials, *Results Phys*, 8, pp. 243–248.
118. Zhang H., Wang H., and Huang A., 2018, Megahertz magneto-inductive waveguide for electromagnetic energy transmission in radio-frequency identification system, *IEICE Electron Express*, 15(15), pp. 20180663–20180663.
119. Li G., Guo Z., Ren J., Sun Y., Jiang H., Li Y., and Chen H., 2021, Reconfigurable magnetic near-field distributions based on the coding metasurfaces in MHz band, *Opt Express*, 29(9), pp. 13908.
120. Puccetti G., Stevens C., Reggiani U., and Sandrolini L., 2015, Experimental and Numerical Investigation of Termination Impedance Effects in Wireless Power Transfer via Metamaterial, *Energies*, 8(3), pp. 1882–1895.
121. Chan C W T and Stevensy C, 2011, Two-dimensional magneto-inductive wave data structures, 1071–1075.
122. Ranaweera A.L.A.K., Pham T.S., Bui H.N., Ngo V., and Lee J.-W., 2019, An active metasurface for field-localizing wireless power transfer using dynamically reconfigurable cavities, *Sci Rep*, 9(1), pp. 11735.
123. Soukoulis C.M. and Wegener M., 2011, Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials, *Nat Photonics*, 5(9), pp. 523–530.
124. Kaina N., Causier A., Bourlier Y., Fink M., Berthelot T., and Lerosey G., 2017, Slow waves in locally resonant metamaterials line defect waveguides, *Sci Rep*, 7(1), pp. 15105.
125. Ahmadvand A., 2021, Tunneling Plasmonics: Vacuum Rabi Oscillations in Carbon Nanotube Mediated Electromigrated Nanojunctions, *J Phys Chem C*, 125(1), pp. 782–791.
126. Francs G.C.D., Barthes J., Bouhelier A., Weeber J.C., Dereux A., Cuche A., and Girard C., 2016, Plasmonic Purcell factor and coupling efficiency to surface plasmons. Implications for addressing and controlling optical nanosources, *J Opt*, 18(9), pp. 094005.