

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM
KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VN**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



BÙI XUÂN SƠN HẢI

**NGHIÊN CỨU HIỆU ỨNG CHUYỂN ĐỔI TRẠNG THÁI PHÂN
CỰC CỦA SÓNG ĐIỆN TỪ DỰA TRÊN VẬT LIỆU BIẾN HÓA
TRONG VÙNG TẦN SỐ GHz**

LUẬN VĂN THẠC SĨ NGÀNH VẬT LÝ CHẤT RẮN

Hà Nội - 2022

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM
KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VN**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



BÙI XUÂN SƠN HẢI

**NGHIÊN CỨU HIỆU ỨNG CHUYỂN ĐỔI TRẠNG THÁI PHÂN
CỰC CỦA SÓNG ĐIỆN TỪ DỰA TRÊN VẬT LIỆU BIẾN HÓA
TRONG VÙNG TẦN SỐ GHz**

Chuyên ngành: Vật lý chất rắn
Mã số: 8 44 01 04

LUẬN VĂN THẠC SĨ NGÀNH VẬT LÝ CHẤT RẮN

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:
1. GS.TS VŨ ĐÌNH LÃM
2. PGS.TS BÙI NGUYỄN QUỐC
TRÌNH

Hà Nội – 2022

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đề tài nghiên cứu trong luận văn này là công trình nghiên cứu của tôi dựa trên những tài liệu, số liệu do chính tôi tự tìm hiểu và nghiên cứu dưới sự hướng dẫn của GS.TS Vũ Đình Lãm và PGS.TS. Bùi Nguyên Quốc Trình. Chính vì vậy, các kết quả nghiên cứu đảm bảo trung thực và khách quan. Đồng thời, kết quả này chưa từng xuất hiện trong bất cứ một nghiên cứu nào. Các số liệu, kết quả nêu trong luận văn là trung thực nếu sai tôi hoàn chịu trách nhiệm.

HỌC VIÊN

BÙI XUÂN SƠN HẢI

LỜI CẢM ƠN

Trước tiên, tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành và sâu sắc nhất tới thầy GS.TS. Vũ Đình Lãm và thầy PGS.TS. Bùi Nguyên Quốc Trình cùng TS. Bùi Sơn Tùng, TS. Bùi Xuân Khuyến đã dành thời gian, tâm huyết, luôn tận tình hướng dẫn, định hướng kịp thời và tạo điều kiện thuận lợi nhất để tôi hoàn thành luận văn này.

Tôi xin chân thành cảm ơn các thầy cô và cán bộ tại Học viện Khoa học và Công nghệ đã giảng dạy, trang bị những kiến thức quý báu và tạo điều kiện thuận lợi cho tôi trong suốt quá trình học tập nghiên cứu.

Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến các thầy cô, anh, chị trong nhóm nghiên cứu Metagroup – IMS của GS. TS. Vũ Đình Lãm và nhóm nghiên cứu VJU Lab của PGS.TS. Bùi Nguyên Quốc Trình đã hết lòng giúp đỡ, chia sẻ những khó khăn trong quá trình nghiên cứu và động viên tinh thần trong suốt thời gian tôi làm luận văn.

Cuối cùng, tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành đến gia đình, người thân và bạn bè đã luôn giúp đỡ, động viên, tạo điều kiện tốt nhất để tôi hoàn thành luận văn này.

HỌC VIÊN

BÙI XUÂN SƠN HẢI

MỤC LỤC

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT.....	1
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	2
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ.....	3
MỞ ĐẦU.....	6
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN	8
1.1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA.....	8
1.1.1. Lịch sử hình thành	8
1.1.2. Khái niệm.....	9
1.1.3. Một số hướng nghiên cứu chính về vật liệu biến hóa hiện nay.....	12
1.2. HIỆU ỨNG CHUYỂN ĐỔI TRẠNG THÁI PHÂN CỰC CỦA SÓNG ĐIỆN TỪ TRÊN VẬT LIỆU BIẾN HÓA.....	19
1.2.1. Tính thực tiễn của vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực	19
1.2.2. Cơ chế quá trình chuyển đổi phân cực trên vật liệu biến hóa.....	19
1.3. ỨNG DỤNG CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CHUYỂN ĐỔI TRẠNG THÁI PHÂN CỰC CỦA SÓNG ĐIỆN TỪ.....	21
1.3.1. Ứng dụng trong công nghệ tàng hình	22
1.3.2. Ứng dụng trong ăng ten	23
CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	24
2.1. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHÒNG	24
2.2. PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN	27
CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN	30
3.1 ĐIỀU CHỈNH ĐẶC TÍNH CHUYỂN ĐỔI PHÂN CỰC BẰNG THAM SỐ CẤU TRÚC	30
3.1.1 Cấu trúc đề xuất.....	30
3.1.2. Kết quả khảo sát mô phỏng	31
3.2 ĐIỀU KHIỂN ĐẶC TÍNH CHUYỂN ĐỔI PHÂN CỰC BẰNG ĐIỆN ÁP NGOÀI.....	41
3.2.1. Cấu trúc đề xuất.....	41
3.2.2 Khảo sát sự chuyển đổi giữa đặc tính chuyển đổi phân cực và đặc tính hấp thụ tuyệt đối của cấu trúc đề xuất khi thay đổi điện áp ngoài	43
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	48
DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CÓ LIÊN QUAN ĐẾN HƯỚNG NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN VĂN	50
HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO.....	51
TÀI LIỆU THAM KHẢO	52

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

Tiếng Anh	Chữ viết tắt/ Ký hiệu	Tiếng Việt
Absorption	A	Độ hấp thụ
Computer Simulation Technology	CST	Công nghệ mô phỏng bằng máy tính
Split ring resonator	SRR	Vòng cộng hưởng có rãnh
Electric field	E	Điện trường
Perfect absorption	PA	Hấp thụ tuyệt đối
Left Handed Metamaterials	LHM	Vật liệu biến hóa chiết suất âm
Finite Intergrate Technique	FIT	Kỹ thuật tích phân hữu hạn
Frequency Domain Solver	FDS	Giải theo miền tần số
Polarization conversion ratio	PCR	Tỷ lệ chuyển đổi phân cực
Impedance	Z	Trở kháng
Magnetic field	H	Từ trường
Metamaterials	MMs	Vật liệu biến hóa
Polarization conversion	PC	Chuyển đổi phân cực
Permeability	μ	Độ từ thẩm
Permittivity	ϵ	Độ điện thẩm
Wave vector	k	Vector truyền sóng
Reflection	R	Độ phản xạ
Transient Solver	TS	Giải theo miền thời gian
Transmission	T	Độ truyền qua
Radar Cross Section	RCS	Tiết diện Radar

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 3. 1 Bảng tham số cấu trúc của vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ và sự phân cực của sóng điện từ tới.	31
Bảng 3. 2 Bảng tham số cấu trúc đề xuất vật liệu biến hóa chuyển đổi chủ động giữa chế độ chuyển đổi phân cực sóng điện từ và chế độ hấp thụ tuyệt đối.....	42

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

Hình 1. 1	Giản đồ biểu diễn mối liên hệ giữa ϵ và μ [38-40]	10
Hình 1. 2	Hình ảnh so sánh giữa cấu trúc vật liệu truyền thống và vật liệu biến hóa. Vật liệu truyền thống được cấu tạo từ nguyên tử trong khi vật liệu biến hóa cấu tạo từ các ô cơ sở có vai trò giống như nguyên tử.....	12
Hình 1. 3	Mẫu chế tạo vật liệu biến hóa có chiết suất âm và phổ truyền qua đo được trong thực nghiệm ở vùng tần số GHz	13
Hình 1. 4	(Từ trái qua phải) Hình ảnh của siêu thấu kính trong thực tế chế tạo bởi vật liệu biến hóa chiết suất âm và giản đồ mô tả sự tương tác của sóng điện từ đối với siêu thấu kính LHM làm từ vật liệu biến hóa [45]	14
Hình 1. 5 (a)	Hình ảnh một mô hình cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ và (b) phổ hấp thụ của nó [46]	15
Hình 1. 6	Cơ chế của sự lọc phân cực đối với sóng truyền qua, sóng tới được chuyển đổi từ trạng thái phân cực thẳng thành phân cực elip [54]	17
Hình 1. 7 (a)	Phổ tham số phản xạ đồng trục và vuông góc (b) pha và độ lệch pha tương ứng của hai tham số phản xạ và (c) mô hình một cấu trúc chuyển đổi phân cực dải tần rộng [57].....	18
Hình 1. 8 (a)	Nguyên lý làm việc của bộ chuyển đổi phân cực và (b) Ô cơ sở của 1 cấu trúc vật liệu Meta chuyển đổi phân cực[63]	20
Hình 1. 9 (a)	Cấu trúc và (b)phổ PCR của một mô hình vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng phản xạ trên dải tần rộng [67]	21
Hình 1. 10	Sóng phản xạ được chuyển đổi từ (b)phân cực vuông góc thành (a)phân cực tròn khi PIN diode được bật từ trạng thái OFF qua trạng thái ON [70]	21
Hình 1. 11	Hình ảnh (a)góc nhìn từ trên xuống (b)mặt cắt ngang và (c)ô cơ sở của một cấu trúc bề mặt chuyển đổi phân cực có hiệu ứng chuyển đổi phân cực dải tần rộng ứng dụng trong ăng ten thu nhỏ với hệ số RCS thấp [76]	22
Hình 1. 12 a)	Sơ đồ thành phần cấu trúc và b) hình ảnh thiết kế và thông số chi tiết của một bề mặt vật liệu biến hóa trên một ăng ten được đề xuất [94].....	23

Hình 2. 1 Giao diện của phần mềm mô phỏng CST.....	24
Hình 2. 2 Giao diện làm việc của phần mềm CST.....	26
Hình 2. 3 Cơ chế của sự chuyển đổi phân cực sóng phản xạ trên vật liệu biến hóa	28
Hình 3. 1 Mô hình cấu trúc ô cơ sở của vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ trong vùng tần số GHz được đề xuất	30
Hình 3. 2 Phổ (a) độ phản xạ và (b) PCR của cấu trúc chuyển đổi phân cực với tham số đề xuất	32
Hình 3. 3 (a) Sơ đồ mô tả cơ chế chuyển đổi phân cực. (b) Độ lớn của các hệ số phản xạ thành phần. Pha và độ lệch pha của (c) các sóng phản xạ đồng trục và (d) các sóng phản xạ vuông góc tương ứng với 2 trục x và y khi sóng điện từ tới có thành phần điện trường phân cực theo trục u	33
Hình 3. 4 Phổ (a) R_{vu} và (b) R_{uu} mô phỏng (nét đứt) và tính toán (nét liền)	33
Hình 3. 5 Hình ảnh mô phỏng phân bố điện trường tại mặt trước và sau của cấu trúc tại 3 tần số cộng hưởng (a) 3.16 GHz, (b) 3,775 GHz và (c) 4,975 GHz	34
Hình 3. 6 Sự phụ thuộc của (a) hệ số phản xạ vuông góc (R_{vu}) và (b) tỷ lệ chuyển đổi phân cực (PCR) vào độ rộng d của vành SRR	35
Hình 3. 7 Sự phụ thuộc của (a) hệ số phản xạ vuông góc (R_{vu}) và (b) tỷ lệ chuyển đổi phân cực (PCR) vào độ rộng a của vòng SRR	36
Hình 3. 8 Sự phụ thuộc của (a) hệ số phản xạ vuông góc (R_{vu}) và (b) tỷ lệ chuyển đổi phân cực (PCR) vào kích thước của ô cơ sở	37
Hình 3. 9 Sự phụ thuộc của (a) hệ số phản xạ vuông góc (R_{vu}) và (b) tỷ lệ chuyển đổi phân cực (PCR) vào độ dày lớp điện môi	38
Hình 3. 10 Sự phụ thuộc của (a) hệ số phản xạ vuông góc (R_{vu}) và (b) tỷ lệ chuyển đổi phân cực (PCR) vào độ rộng của rãnh trên vòng cộng hưởng SRR	39
Hình 3. 11 Sự phụ thuộc của (a) hệ số phản xạ vuông góc (R_{vu}) và (b) tỷ lệ chuyển đổi phân cực (PCR) vào vị trí của rãnh trên vòng cộng hưởng SRR	40
Hình 3. 12 Phổ PCR (phóng to) của cấu trúc khảo sát tại 3 giá trị của vị trí rãnh khác nhau	40
Hình 3. 13 Mô hình đề xuất của cấu trúc vật liệu biến hóa chuyển đổi giữa 2 chế độ chuyển đổi phân cực và hấp thụ tuyệt đối	41

Hình 3. 14 Đường đặc trưng C-U của diode SMV 2019-079 LF và sơ đồ mạch điện tương đương của nó [102] 42

Hình 3. 15 Hình ảnh (a) phổ tham số phản xạ đồng trục và vuông góc và (b) PCR của cấu trúc khi khảo sát tại điện áp $U=0V$ và (c);(d) các tham số tương ứng của cấu trúc vật liệu biến hóa tương đương có 1 rãnh ở vòng cộng hưởng 43

Hình 3. 16 Hình ảnh (a) phổ tham số phản xạ đồng trục và vuông góc và (b) PCR của cấu trúc khi khảo sát tại điện áp $U=-5,2V$ và (c)(d) các tham số tương ứng của cấu trúc vật liệu biến hóa tương đương có 2 rãnh ở vòng cộng hưởng 44

Hình 3. 17 Hình ảnh mô phỏng phân bố điện trường tại bề mặt trên và dưới của cấu trúc tại tần số cộng hưởng $f = 3,48 \text{ GHz}$ và $f = 3,6305 \text{ GHz}$ khi điện áp đặt vào diode tương ứng là (a-c) $U=0V$ và (b-d) $U=-5,2V$ 45

Hình 3. 18 Sự phụ thuộc của phổ hấp thụ và PCR theo điện áp cấp vào diode 46

MỞ ĐẦU

Gần đây, vật liệu biến hóa (MM) với các ô đơn vị tuần hoàn với kích thước nhỏ hơn nhiều lần bước sóng chiếu tới đã trở thành một lĩnh vực cực kỳ hấp dẫn trong ngành khoa học vật liệu tiên tiến. Vật liệu nhân tạo này thể hiện nhiều đặc tính và hiệu ứng không tồn tại trong vật liệu tự nhiên, chẳng hạn như chiết suất âm [1, 2], slow light [3, 4], siêu thấu kính [5, 6], áo choàng tàng hình [7, 8] và nhiều hơn nữa. Do các đặc tính đặc biệt của chúng, MMs đã được hứa hẹn cho nhiều ứng dụng thực tế như chuyển mạch quang [9], bộ lọc [10], cảm biến [11-13], thu năng lượng [14, 15], truyền năng lượng không dây [16, 17] và đặc biệt là khả năng hấp thụ tuyệt đối [18, 19]. Trong số các ứng dụng đáng được mong đợi này, thế hệ mới của cấu trúc hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ (PA) đã được Landy và các cộng sự đưa ra bằng thực nghiệm [20] và đã mở ra một con đường mới nhằm đồng bộ các vật liệu tiên tiến với các thiết bị điện tử.

Thêm vào đó, hiện tượng chuyển đổi phân cực, dựa trên MM, là một đặc điểm lợi thế khác có thể được khai thác cho các ứng dụng xa hơn trong tương lai [21, 22]. Hiệu ứng phân cực có thể được coi là một trong những tính chất cơ bản của sóng điện từ (EM), có nhiều ứng dụng quan trọng trong truyền tín hiệu và đo độ nhạy. Chúng cũng được sử dụng cho các mục đích khác nhau, chẳng hạn như radar phân cực kép, đo lường phân cực, vận chuyển sợi quang và truyền thông MIMO (đa đầu vào/đa đầu ra) [23, 24]. Trong số đó, cấu trúc MM chiral sở hữu optical activity có thể xoay mặt phẳng phân cực của sóng điện từ truyền qua. Bên cạnh đó, cấu trúc MM được thiết kế với mục đích chọn lọc phân cực cho thấy một khả năng có thể phản xạ hoặc truyền hoàn hảo sóng điện từ đến, tùy thuộc vào trạng thái phân cực của nó. Trong khi đó, sự chuyển đổi phân cực gần như hoàn toàn có thể đạt được với các MM bất đẳng hướng do sự lệch pha của sóng phản xạ trong hai phân cực trực giao. Cho đến nay, các bộ chuyển đổi phân cực (PC) và PA khác nhau dựa trên MM đã được đề xuất mạnh mẽ để có thể đạt được đơn/đa đỉnh và băng tần rộng [25-28].

Tuy nhiên, các thiết bị dựa trên MM này bị giới hạn ở một chế độ hoạt động duy nhất chỉ cho phép hấp thụ hoặc chuyển đổi phân cực, chứ không phải

cả hai. Với động lực đó, mục tiêu chính của luận văn này là xây dựng chức năng chuyển đổi linh hoạt giữa hai trạng thái PA và PC, có thể dựa trên các cấu trúc MM lai hóa, được điều khiển bằng các tác động ngoại vi hoặc được tích hợp với các linh kiện điện tử ngoại vi.

Do đó, mục tiêu nghiên cứu của luận văn hướng đến việc nghiên cứu nâng cao cũng như tối ưu hiệu suất chuyển đổi trạng thái phân cực sóng điện từ và tìm ra loại cấu trúc có thể đáp ứng được khả năng chuyển đổi một cách linh động giữa hai mode hoạt động PA và PC, nhằm góp phần mở rộng phạm vi ứng dụng trong nhiều lĩnh vực đặc biệt là trong các lĩnh vực thông tin, quân sự. Cụ thể, luận văn cần đạt được hai kết quả sau:

- Nghiên cứu kỹ thuật và mô hình nâng cao hiệu suất chuyển đổi trạng thái phân cực sóng điện từ trong vật liệu biến hóa; Tối ưu hiệu suất chuyển đổi trạng thái phân cực sóng điện từ về biên độ và dải tần số hoạt động.

- Nghiên cứu cấu trúc vật liệu biến hoá có khả năng chuyển đổi chủ động giữa chế độ hấp thụ tuyệt đối và chế độ chuyển đổi phân cực sóng điện từ, thông qua các tác động ngoại vi hoặc tích hợp với các linh kiện điện tử ngoại vi.

Nội dung luận văn bao gồm 4 phần:

Chương 1. TỔNG QUAN

Trình bày lý thuyết cơ bản về vật liệu biến hóa nói chung và vật liệu biến hóa hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ, vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ nói riêng. Các ứng dụng và đề xuất tính thực tiễn của mô hình chuyển đổi giữa 2 chế độ PA và PC

Chương 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Giới thiệu các phương pháp nghiên cứu được sử dụng trong luận văn bao gồm phương pháp tính toán, mô phỏng và thực nghiệm.

Chương 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trình bày các kết quả đã đạt được trong quá trình nghiên cứu.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Đưa ra kết luận và kiến nghị về hướng nghiên cứu trong tương lai.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

1.1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA

1.1.1. Lịch sử hình thành

Vật liệu biến hóa (Metamaterial - MM) là 1 khái niệm được Veselago lần đầu tiên đề xuất vào năm 1968 nói về sự tồn tại của một vật liệu chiết suất âm dựa trên việc vật liệu đó sở hữu đồng thời cả hai yếu tố đó là độ từ thẩm âm và độ điện thẩm âm [29]. Nếu đề xuất này được chứng minh, qua đó bức tranh tổng quát về các giá trị của chiết suất trong mọi môi trường có thể xem là hoàn thiện.

Theo tiếng Hy Lạp thì “meta” có nghĩa là chỉ một sự “vượt trội ra ngoài”, ngầm ám chỉ tới một vật liệu mà sở hữu những đặc tính không thể tìm thấy ở các vật liệu trong tự nhiên. Và đúng là thực tế, những lý thuyết mà Veselago đề cập đến về loại vật liệu này nhận được rất nhiều sự hoài nghi trong một thời gian dài cho đến gần 30 năm sau, vào năm 1996 khi mà Pendry và các đồng sự của ông đưa ra mô hình lưới dây kim loại nhằm giảm tần số Plasma về cỡ GHz thì những nhận định và đề xuất trước đây của Veselago mới lại một lần nữa nhận lại sự quan tâm của giới nghiên cứu [30].

Tiếp tục với thành công vào năm 1996, tới năm 1999 nhóm của Pendry đã thành công trong việc nghiên cứu sự hoạt động mô hình vòng cộng hưởng có rãnh (SRR) (Hình 1.2), qua đó chứng minh mô hình vật liệu nhân tạo có thể đạt được giá trị độ từ thẩm âm [30]. Và vào năm 2000, bằng vào sự kết hợp giữa hai mô hình lưới dây và vòng cộng hưởng có rãnh thì Smith và các đồng sự của ông đã chế tạo thành công vật liệu biến hóa chiết suất âm ($n < 0$), mở ra một ngành nghiên cứu mới về vật liệu biến hóa với rất nhiều các tính chất kỳ diệu còn đang được khai thác nhiều cho đến ngày nay [1].

Cũng vào năm 2000, Pendry cũng đồng thời chứng minh có thể sử dụng vật liệu chiết suất âm để chế tạo siêu thấu kính [5]. Khác với thấu kính thông thường, siêu thấu kính có hình dạng bề mặt phẳng và nhờ vào đặc tính chiết suất âm mà nó sẽ hoạt động như là một thấu kính hội tụ và điều này đã được nhóm nghiên cứu của Zhang kiểm chứng vào năm 2005 [6]. Vào năm 2006, vẫn là Pendry với những công bố đầy tính bất ngờ cho rằng có thể chế tạo

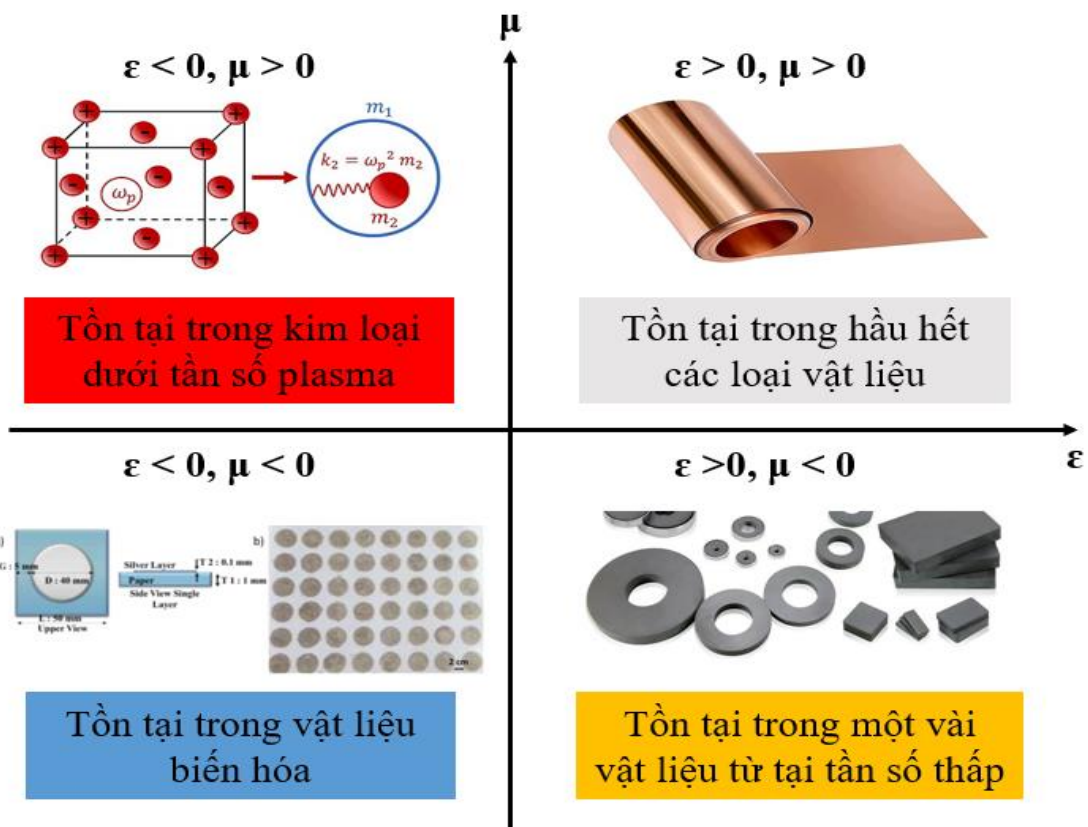
1 lớp vỏ tàng hình cho vật liệu trước sóng điện từ ở vùng tần số GHz bằng cách sử dụng MM. Trong trường hợp này, chiết suất của lớp vật liệu biến hóa sẽ được thay đổi thông qua hiệu chỉnh tham số cấu trúc cộng hưởng để bề cong đường đi của sóng điện từ khi tương tác với vật thể, không gây ra sự phản xạ và có thể xem là tàng hình trước các thiết bị ghi nhận và phát hiện sóng phản xạ.

Nối tiếp thành công này, một loạt các nghiên cứu về các ứng dụng thú vị của vật liệu biến hóa liên tục được công bố sau đó và đáng kể nhất phải kể tới công trình của N. I. Landy vào năm 2008 với đề xuất mô hình vật liệu biến hóa hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ (metamaterial perfect absorber – MPA) [20]. Lĩnh vực này đã được phát triển rất nhanh chóng sau đó cả về lý thuyết và thực nghiệm, MPA thể hiện đặc tính ưu việt của chúng khi mà kích thước độ dày vật lý của loại vật liệu này nhỏ hơn rất nhiều ($\lambda/30$ cho tới nhỏ hơn hàng nghìn lần) so với bước sóng hoạt động, đây là vượt trội hơn rất nhiều so với các vật liệu truyền thống vốn có độ dày lớn hơn nhiều (cỡ $\lambda/4$), ở thí nghiệm của Landy ở kích cỡ ô cơ sở vào khoảng $\lambda/30$ đã thu được độ hấp thụ cỡ 96% trong mô phỏng và 88% trong thực nghiệm tại vùng tần số 11,48 GHz và 11,5 GHz tương ứng. Với các đặc tính vượt trội này, MPA cho thấy những tiềm năng ứng dụng to lớn và đã được quan tâm nghiên cứu rộng rãi cho các ứng dụng thực tế ở vùng tần MHz cho tới vùng quang học [11, 31-37].

Không chỉ dừng lại đây, MM đã tiếp tục phát triển rộng khắp. Đến nay, có thể kể đến các hướng nghiên cứu như vật liệu biến hoá hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ, vật liệu biến hoá chuyển đổi đặc tính phân cực sóng điện từ, v.v...

1.1.2. Khái niệm

Trong điện từ học, độ điện thẩm ϵ và độ từ thẩm μ là hai thông số đặc trưng mô tả ảnh hưởng của trường điện từ tác động lên vật chất. Hình 1.1 là một giản đồ phân loại vật liệu dựa trên hai thông số cơ bản là độ điện thẩm và độ từ thẩm của chúng.



Hình 1.1 Giản đồ biểu diễn mối liên hệ giữa ϵ và μ [38-40]

Ở góc phần tư thứ nhất là các vật liệu có đồng thời cả hai giá trị độ điện thẩm và độ từ thẩm dương, tương ứng với hầu hết các vật liệu điện môi. Ở góc phần tư thứ hai là các kim loại, vật liệu sắt điện hoặc các bán dẫn pha tạp có độ điện thẩm âm ở các tần số dưới tần số plasma. Vùng góc phần tư thứ tư là các vật liệu có độ từ thẩm âm, thường là các vật liệu từ ở vùng tần số thấp (cỡ MHz) và ở góc phần tư thứ ba là vùng của các vật liệu có đồng thời hai giá trị từ thẩm và điện thẩm cùng âm, một loại vật liệu chưa từng tìm thấy trong tự nhiên.

Để hiểu rõ hơn về cơ chế lan truyền của sóng điện từ trong vật liệu biến hóa, chúng ta sẽ xuất phát từ hệ phương trình Maxwell đã được rút gọn trong môi trường điện từ tự do (môi trường mà mật độ điện tích và mật độ dòng điện đều bằng không):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.4)$$

Với $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$ và $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ là độ cảm ứng điện và độ cảm ứng từ. Biểu diễn từ trường và điện trường dưới dạng sóng phẳng:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)}, \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}_0 e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)} \quad (1.5)$$

Thay $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$ và $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ vào bốn phương trình (1.1) đến (1.4) theo biểu diễn (1.5) ta được:

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\frac{\omega}{c} \epsilon \mathbf{E} \quad (1.6)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \frac{\omega}{c} \mu \mathbf{H} \quad (1.7)$$

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1.8)$$

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1.9)$$

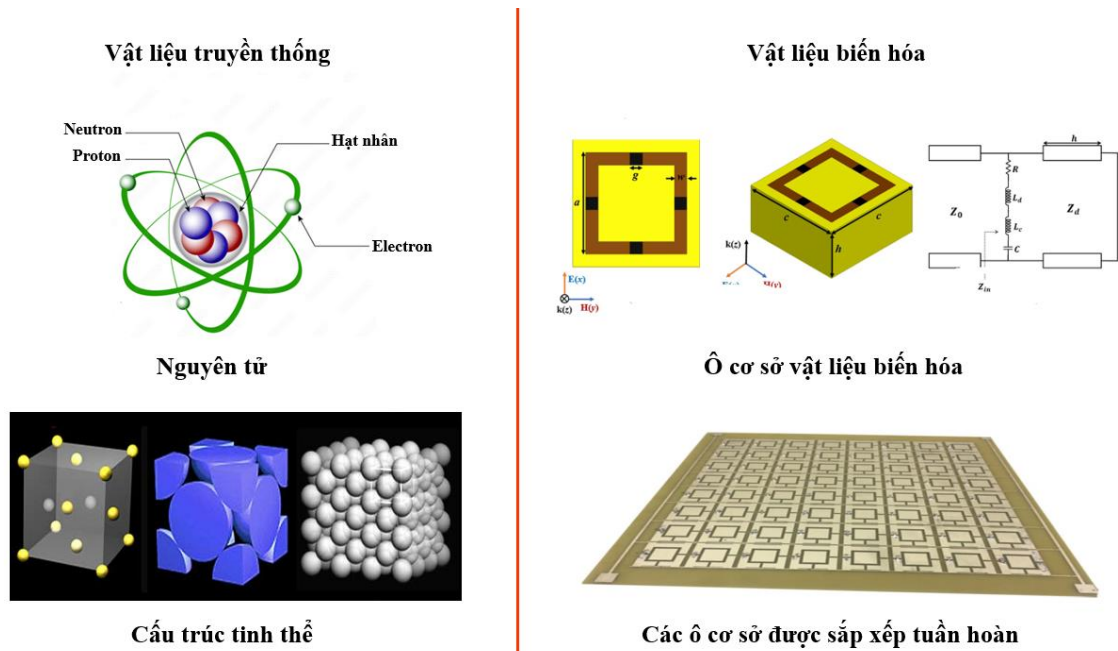
Vector Poynting \mathbf{S} sẽ xác định hướng của năng lượng được lan truyền đi trong một môi trường:

$$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.10)$$

Ở phương trình (1.6) và (1.7), nếu như ϵ và μ cùng mang giá trị dương thì theo quy tắc bàn tay phải, vector sóng \mathbf{k} sẽ có hướng đi ra từ nguồn phát xạ còn nếu như ϵ và μ đồng thời mang giá trị âm thì theo quy tắc bàn tay trái, vector sóng \mathbf{k} sẽ có hướng ngược lại với hướng phát xạ điện từ. Đây được xem là ý tưởng khởi nguồn để chế tạo thế hệ vật liệu chiết suất âm đầu tiên.

Mặc dù vậy, với sự phát triển theo năm tháng, MM không còn chỉ bị giới hạn trong các khái niệm về vật liệu có độ điện thẩm âm, từ thẩm âm và chiết suất âm. Một cách khái quát, MM có thể được định nghĩa là một vật liệu tổ hợp vĩ mô có cấu trúc vi mô nhân tạo có khả năng tạo ra các tính chất điện từ phức tạp, dị thường và thậm chí không tồn tại trong các vật liệu trong tự nhiên. Vật liệu biến hóa được xây dựng dựa trên những ô cơ sở đóng vai trò như những giá

nguyên tử sắp xếp tuần hoàn theo một định hướng nhất định trong không gian. Những ô cơ sở này thực chất là những cấu trúc cộng hưởng điện từ nhỏ hơn rất nhiều lần so với bước sóng điện từ hoạt động, mỗi cấu trúc ô cơ sở tương đương với một mạch dao động LC (hình 1.2). Thông qua việc cấu trúc hóa những ô cơ sở này từ hình dáng cho tới định lượng các tham số, vật liệu có thể đạt được những tính chất đặc trưng khác nhau khi tương tác với sóng điện từ, đáng kể là có rất nhiều tính chất mới lạ chưa từng được ghi nhận ở các vật liệu tồn tại sẵn trong tự nhiên đã xuất hiện trên vật liệu biến hóa này. Trong đó phải kể đến tính chất chiết suất âm, nghịch đảo định luật Snell [41], nghịch đảo định luật Doppler [42].... Các đặc tính của vật liệu biến hóa được tạo nên chủ yếu bởi hình dạng, cấu trúc của chúng hơn là bởi chất liệu cấu thành. Hình 1.2 thể hiện so sánh giữa vật liệu thông thường cấu thành bởi nguyên tử đặc trưng thành phần theo định hướng cấu trúc mạng tinh thể và mô hình ô cơ sở MM cấu thành từ những mạch cộng hưởng điện từ được sắp xếp tuần hoàn.



Hình 1.2 Hình ảnh so sánh giữa cấu trúc vật liệu truyền thống và vật liệu biến hóa. Vật liệu truyền thống được cấu tạo từ nguyên tử trong khi vật liệu biến hóa cấu tạo từ các ô cơ sở có vai trò giống như nguyên tử

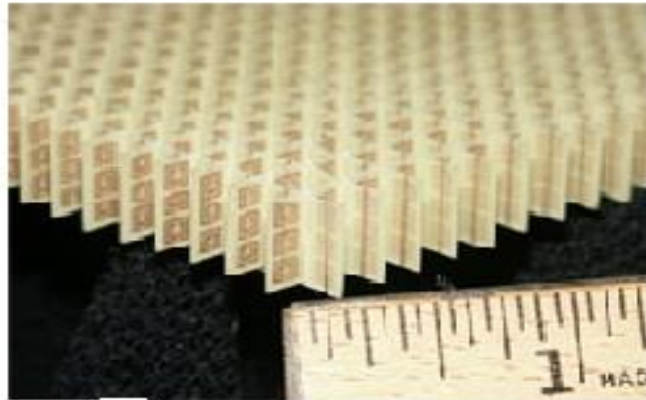
1.1.3. Một số hướng nghiên cứu chính về vật liệu biến hóa hiện nay

Các ứng dụng của vật liệu biến hóa ngày nay được nhìn thấy trong nhiều

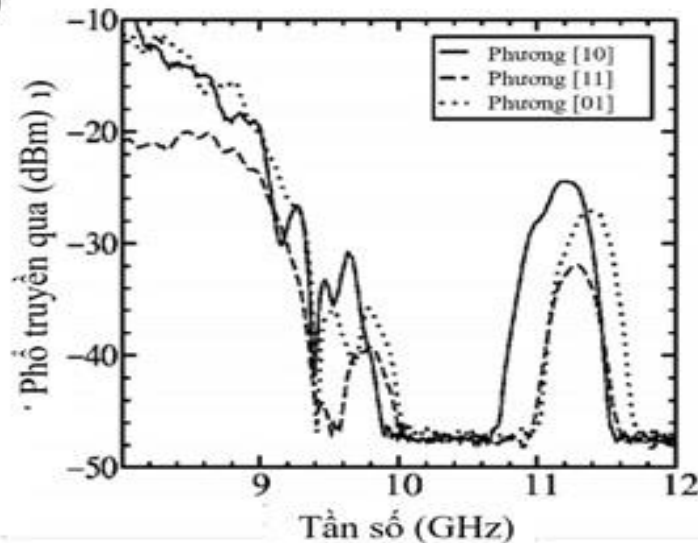
lĩnh vực khác nhau bao gồm an toàn công cộng, chế tạo cảm biến, giao tiếp ở tần số cao phục vụ trong lĩnh vực quân sự, cải tiến cảm biến siêu âm, điều khiển hấp thụ sóng cho ăng ten có độ nhạy cao và điều khiển từ xa ứng dụng trong ngành hàng không vũ trụ [43, 44].

1.1.3.1. Vật liệu biến hóa có chiết suất âm

(a)



(b)

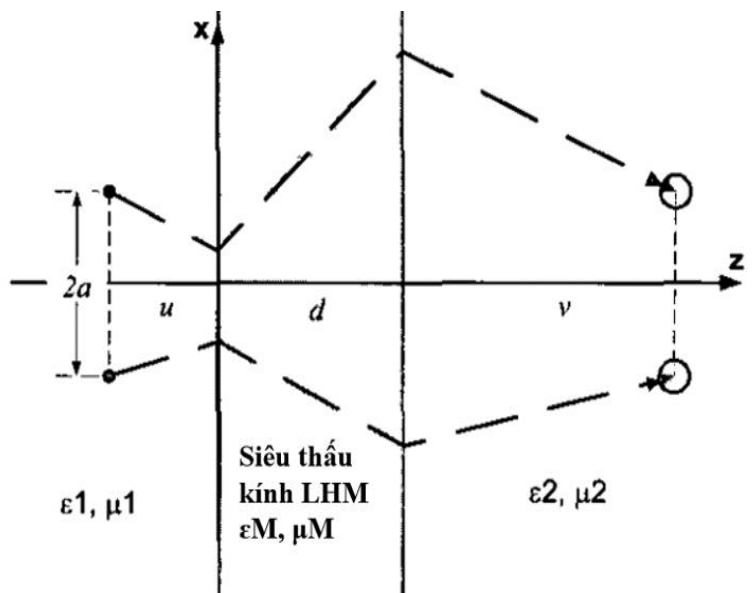
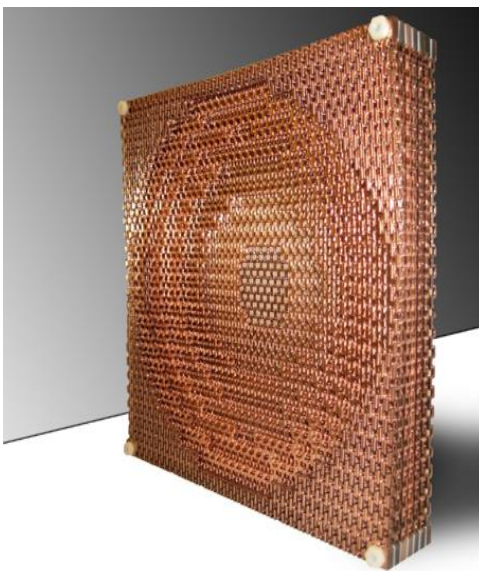


Hình 1.3 Mẫu chế tạo vật liệu biến hóa có chiết suất âm và phổ truyền qua đo được trong thực nghiệm ở vùng tần số GHz

Vật liệu biến hóa chiết suất âm là vật liệu được đề xuất nghiên cứu đầu tiên trong kỷ nguyên phát triển vật liệu biến hóa, nó trở nên thu hút đặc biệt bởi những tính chất đặc thù kỳ dị mà không thể tìm thấy ở vật liệu có sẵn trong tự nhiên. Ban đầu, dựa trên ý tưởng của Veselago là sẽ đi tìm và chế tạo ra vật liệu có đồng thời hai giá trị đặc trưng là độ từ thẩm và độ điện thẩm đều âm trên

cùng một dải tần, thế nhưng điều tưởng chừng như phi lý vào thời gian đó đã không thu hút được nhiều sự quan tâm từ giới nghiên cứu cho đến khi những kết quả về sự cấu trúc hóa lại các vật liệu tự nhiên có thể tạo ra được môi trường có độ điện thẩm và từ thẩm âm của Pendry và các đồng sự công bố, những hướng nghiên cứu mới thực sự trở nên hứa hẹn và nhận được nhiều sự quan tâm hơn. Và tới năm 2005, nhóm của Smith đã thành công chế tạo và kiểm chứng vật liệu chiết suất âm được tạo bởi mô hình lưới dây kim loại và vòng cộng hưởng có rãnh, cấu trúc mà trước đó đã được đề đạt bởi chính Pendry (Hình 1.3).

Kết quả thực nghiệm sau đó đã cho thấy mô hình lưới dây kim loại (vốn có vai trò tạo ra độ điện thẩm âm) kết hợp cùng vòng cộng hưởng có rãnh đã biến vùng không truyền qua trong cấu trúc đơn của vòng cộng hưởng trở thành vùng truyền qua, qua đó chứng minh một cách mạnh mẽ cho giả thuyết trước đó của Veselago. Tuy nhiên sau này giả thuyết trên đã được mở rộng ra khi mà hoàn toàn có thể chế tạo vật liệu chiết suất âm mà không cần đồng thời cả giá trị điện thẩm lẫn từ thẩm đều âm.

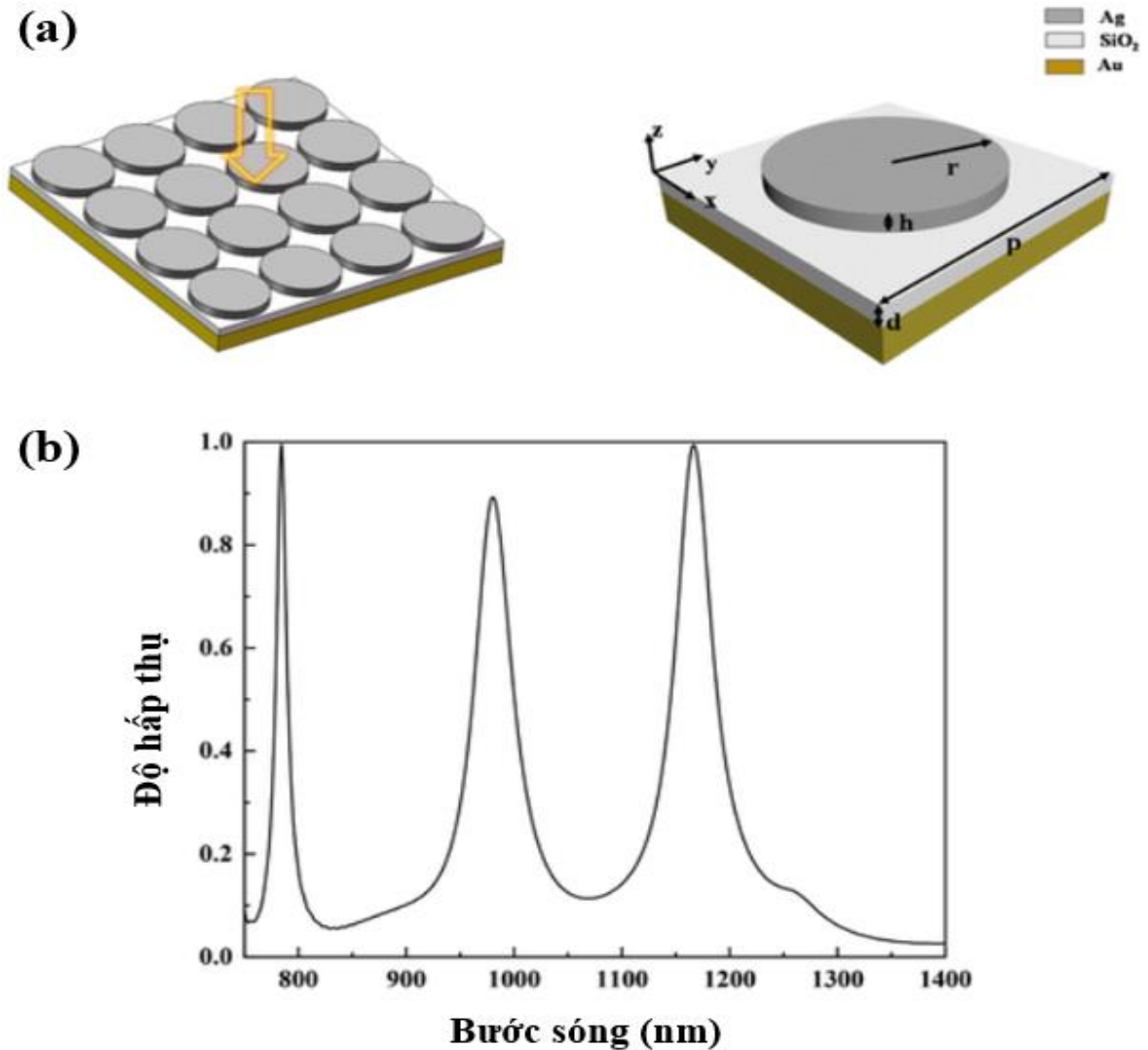


Hình 1.4 (Từ trái qua phải) Hình ảnh của siêu thấu kính trong thực tế chế tạo bởi vật liệu biến hóa chiết suất âm và giản đồ mô tả sự tương tác của sóng điện từ đối với siêu thấu kính LHM làm từ vật liệu biến hóa [45]

Với những tính chất kéo theo vô cùng thú vị của vật liệu chiết suất âm đã

hứa hẹn những ứng dụng góp phần cải tiến trong rất nhiều lĩnh vực, ví dụ như là chế tạo ra siêu thấu kính trong quang học [45] (Hình 1.4).

1.1.3.2. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ



Hình 1.5 (a) Hình ảnh một mô hình cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ và (b) phổ hấp thụ của nó [46]

Vật liệu biến hóa có khả năng hấp thụ năng lượng sóng điện từ chiếu tới bề mặt vật liệu được đề xuất và chế tạo lần đầu tiên bởi nhóm nghiên cứu của Smith. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ vốn được tạo nên từ 1 mạng lưới các cấu trúc cộng hưởng điện từ nên nó hoạt động dựa trên nguyên lý hấp thụ cộng hưởng. Ngay ở mẫu vật liệu đầu tiên được chế tạo vào năm 2008, nó đã cho thấy những ưu việt về đặc tính và tính tiện lợi khi đã hấp thụ 88% năng lượng điện từ chỉ ở kích thước độ dày vật liệu vào cỡ 1/30 bước sóng hoạt động,

tức nhỏ hơn rất nhiều so với các cấu trúc hấp thụ đã được đề xuất trước đây như màn Salisbury hoặc bộ Jaumann [47] và càng vượt trội khi so với các vật liệu hấp thụ sóng điện từ có trong tự nhiên. Vì những ưu điểm đó nên hướng nghiên cứu hiện đang được các nhà khoa học quan tâm sâu sắc bởi do kích cỡ nhỏ gọn nên có thể dễ dàng hơn trong việc chọn dải tần hấp thụ khi thiết kế và đồng thời khả năng hấp thụ cũng cao hơn.

MA mở ra rất nhiều hướng nghiên cứu với các ứng dụng tiềm năng như cảm biến [48], ứng dụng trong pin mặt trời hiệu suất cao [49] hay tàng hình ảnh nhiệt trong lĩnh vực quốc phòng [50], đặc biệt là các ứng dụng trong lĩnh vực năng lượng đang rất được quan tâm hiện nay vì tính thời sự của nó.

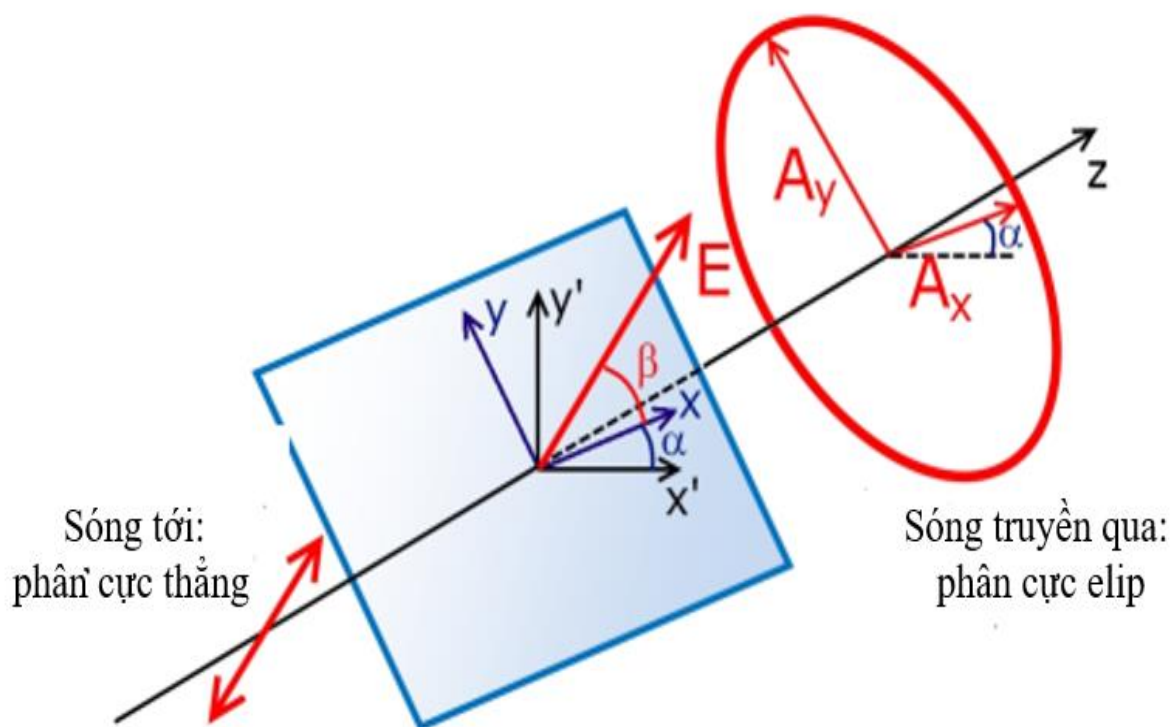
1.1.3.3. Vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ

Điều khiển chuyển đổi sự phân cực của sóng điện từ là một kỹ thuật rất quan trọng vì đây là một trong những đặc tính cơ bản của sóng điện từ và đã được ứng dụng rất rộng rãi trong cuộc sống hiện tại. Trong đó việc chuyển đổi sự phân cực của sóng điện từ thông qua cấu trúc hóa bề mặt vật liệu biến hóa (metamaterial) đã và đang dần trở nên phổ biến và thể hiện là một phương pháp đạt hiệu quả cao [51].

Vật liệu biến hóa có khả năng thực hiện hai loại hiệu ứng chuyển đổi phân cực đó là chuyển đổi phân cực sóng truyền qua vật liệu [52] và chuyển đổi sóng phân cực sóng phản xạ [53]. Có thể đạt được hiệu ứng chuyển đổi phân cực sóng phản xạ thông qua việc hiệu chỉnh 1 lớp kim loại liên tục ở mặt dưới cùng của vật liệu để ngăn chặn sóng truyền qua vật liệu, sóng điện từ sau khi đi qua lớp điện môi sẽ thực hiện phản xạ một lần nữa tại bề mặt lớp này, sóng phản xạ được thu nhận ở nguồn thu đặt phía trước vật liệu ghi nhận sóng đã bị chuyển đổi phân cực so với sóng tới. Đối với trường hợp của sóng truyền qua, tín hiệu được đặt ở phía sau tấm vật liệu ghi nhận sự chuyển đổi phân cực diễn ra đối với sóng này.

Hình 1.6 mô tả cơ chế của sự chuyển đổi phân cực từ phân cực thẳng thành phân cực elip diễn ra đối với sóng truyền qua. Có một cách giải thích đó là sóng tới lan truyền theo trục z sau khi tương tác với vật liệu biến hóa có tính dị

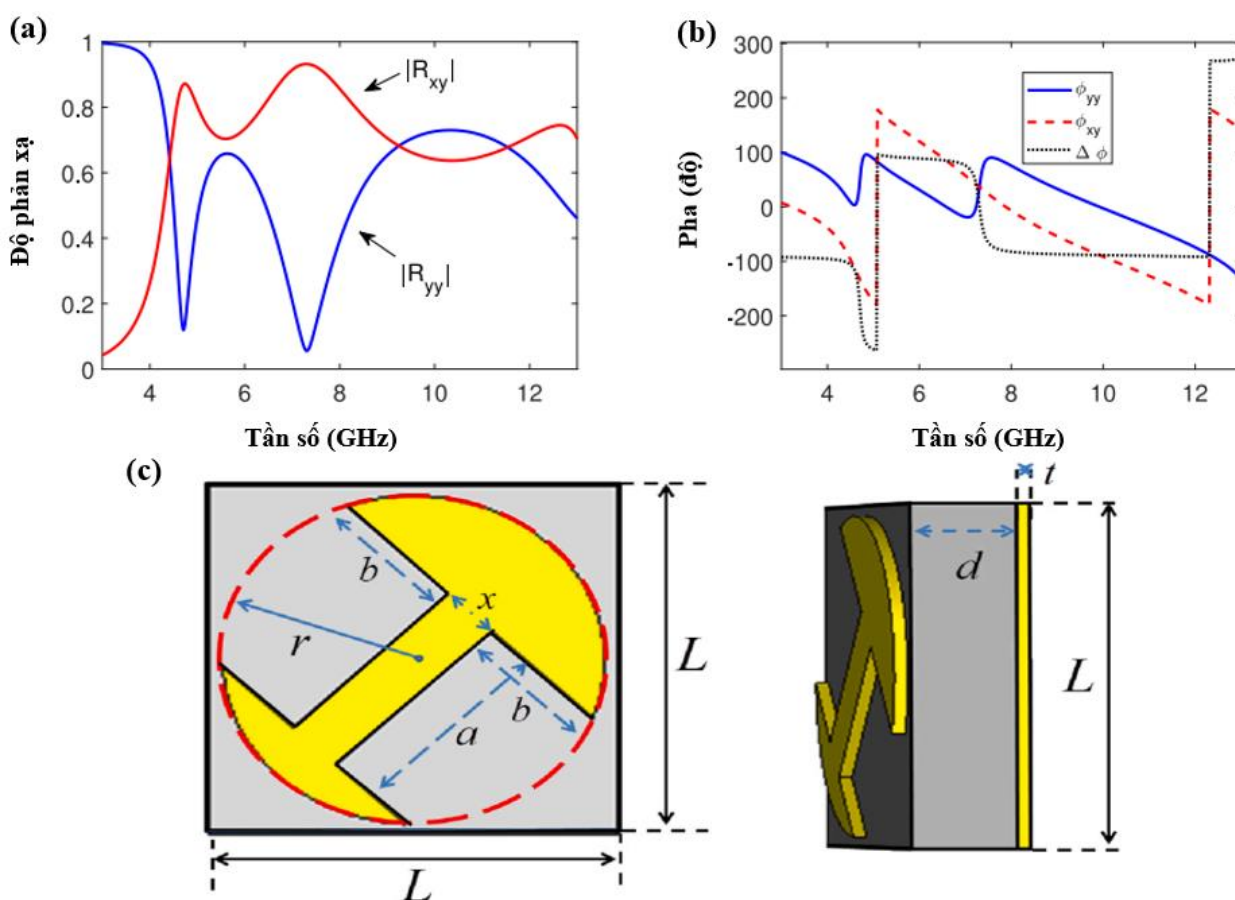
hướng đôi (bianisotropic metamaterial), tức là tồn tại hai tham số chuyển đổi phân cực elip riêng (two elliptical polarizations) và vật liệu tồn tại hai tham số hấp thụ và phản xạ riêng biệt (elliptical dichroism). Sóng tới bị chuyển đổi thành 2 thành phần phân cực elip riêng và thành phần sóng nào có độ truyền qua cao hơn sẽ tham gia quyết định chính sự phân cực của sóng truyền qua [54]



Hình 1.6 Cơ chế của sự lọc phân cực đối với sóng truyền qua, sóng tới được chuyển đổi từ trạng thái phân cực thẳng thành phân cực elip [54]

Ở trường hợp của sóng phản xạ thì sự chuyển đổi phân cực được quyết định bởi độ lớn và sự lệch pha của 2 sóng phản xạ thành phần (phản xạ đồng trục và phản xạ vuông góc). Chuyển đổi phân cực từ phân cực thẳng thành phân cực thẳng xảy ra khi độ lệch pha giữa 2 sóng phản xạ thành phần là cùng pha hoặc ngược pha với nhau và phân cực elip đạt được khi độ lệch pha là các giá trị còn lại. Có một trường hợp đặc biệt của phân cực elip đó là phân cực tròn, sự chuyển đổi từ phân cực elip thành phân cực tròn đạt được khi có thêm điều kiện là 2 sóng phản xạ thành phần phải vuông pha với nhau và có cùng độ lớn [51, 55, 56]. Ở trường hợp tỷ lệ chuyển đổi phân cực sóng phản xạ đạt 100% (PCR=100%) tức sóng tới bị chuyển đổi một cách hoàn hảo trở thành phân cực

vuông góc so với sóng tới, ta nói sóng phản xạ phân cực vuông góc hoàn toàn với sóng tới. Đây cũng là một phần hướng nghiên cứu của luận văn và sẽ được trình bày kỹ hơn ở những phần sau.



Hình 1.7 (a) Phổ tham số phản xạ đồng trục và vuông góc (b) pha và độ lệch pha tương ứng của hai tham số phản xạ và (c) mô hình một cấu trúc chuyển đổi phân cực dải tần rộng [57]

Sóng điện từ tới tương tác với vật liệu biến hóa được chuyển đổi dưới 3 hình thức là phản xạ, hấp thụ và truyền qua. Biểu thức viết dưới dạng năng lượng có dạng:

$$A^2 + T^2 + |R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2 = 1 \quad (1.11)$$

Trong đó A là độ hấp thụ, T là độ truyền qua và R_{xy} , R_{yy} tương ứng là hệ số chuyển đổi phân cực vuông góc và đồng trục của sóng phản xạ. Và tỷ lệ chuyển đổi phân cực sóng phản xạ của vật liệu biến hóa được xác định bởi công thức:

$$\text{PCR} = \frac{|R_{xy}|^2}{|R_{yy}|^2} \quad (1.12)$$

Với PCR (Polarization conversion ratio) là tỷ lệ chuyển đổi phân cực sóng điện từ, trong trường hợp không xảy ra hiện tượng truyền qua thì nó được xác định bởi hệ số tỷ lệ giữa năng lượng sóng phản xạ phân cực vuông góc và năng lượng của sóng phản xạ đồng trục.

1.2. HIỆU ỨNG CHUYỂN ĐỔI TRẠNG THÁI PHÂN CỰC CỦA SÓNG ĐIỆN TỪ TRÊN VẬT LIỆU BIẾN HÓA

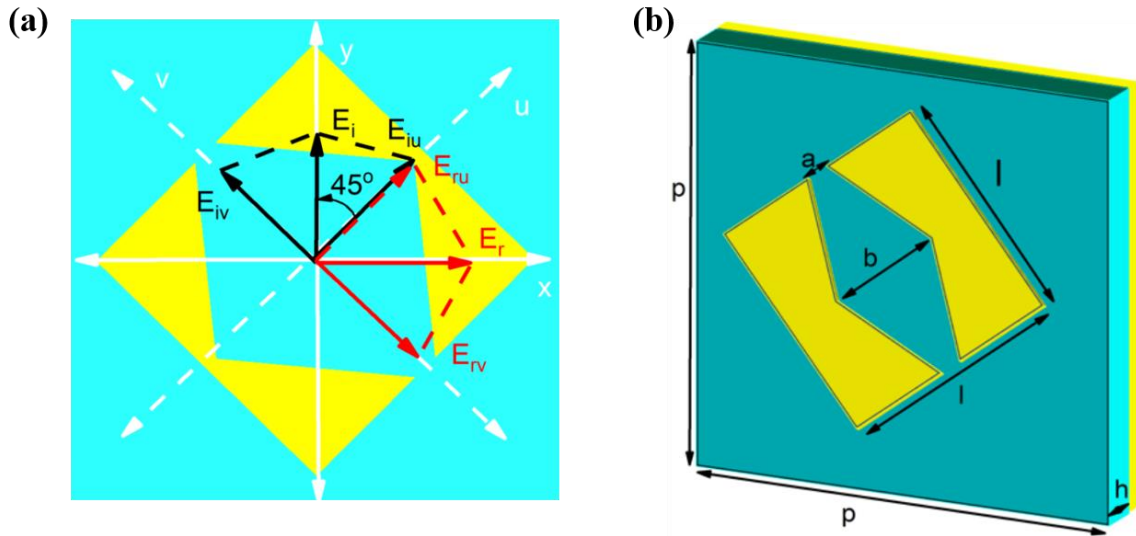
1.2.1. *Tính thực tiễn của vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực*

Sự phân cực sóng điện từ đóng vai trò quan trọng trong việc truyền tải thông tin quan trọng cho quá trình xử lý tín hiệu điện từ, thể hiện tiềm năng to lớn trong việc phát triển về mặt ứng dụng của các thiết bị quang tử. Vì vậy hiệu ứng chuyển đổi phân cực rất được quan tâm và đặc biệt quan trọng ở nhiều lĩnh vực như liên lạc viba, viễn thám, các ứng dụng hiển thị hình ảnh, v.v.... Ví dụ, một bộ chuyển đổi phân cực có thể được sử dụng để giảm thiểu tác động của hiệu ứng Faraday gây ra bởi tầng điện ly ở hệ thống vệ tinh hoặc có thể được ứng dụng trong thiết kế ăng ten để tạo sóng phân cực mong muốn. Một bộ chuyển đổi thông thường có thể được chế tạo bằng cách sử dụng những tấm khối dạng sóng (bulk wave plates), được làm từ những vật liệu dị hướng (anisotropic) như là những tinh thể lưỡng chiết tự nhiên, vật liệu dị hướng và plasma từ hóa [58, 59]. Các thiết bị loại này thường được sử dụng trong những thiết bị hoạt động ở dải tần bước sóng rộng, như là trong quang học. Tuy nhiên, ở điều kiện bước sóng ngắn, các bộ chuyển đổi làm từ vật liệu dị hướng lại có nhược điểm về giới hạn kích thước cũng như băng thông khiến chúng không thuận lợi trong việc thu nhỏ và tích hợp trên thiết bị. Và hướng tiếp cận việc chuyển đổi phân cực bằng vật liệu biến hóa có cấu trúc siêu mỏng, nhỏ và thu được hiệu ứng mong muốn trên dải tần số rộng trở nên được quan tâm rất nhiều [60-62].

1.2.2. *Cơ chế quá trình chuyển đổi phân cực trên vật liệu biến hóa*

Nguyên lý làm việc của bộ chuyển đổi phân cực được mô tả trong hình 1.8 với sóng tới là sóng điện từ có thành phần điện trường phân cực dọc theo

phương u và lấy một mô hình cấu trúc vật liệu biến hóa như trong hình làm ví dụ.

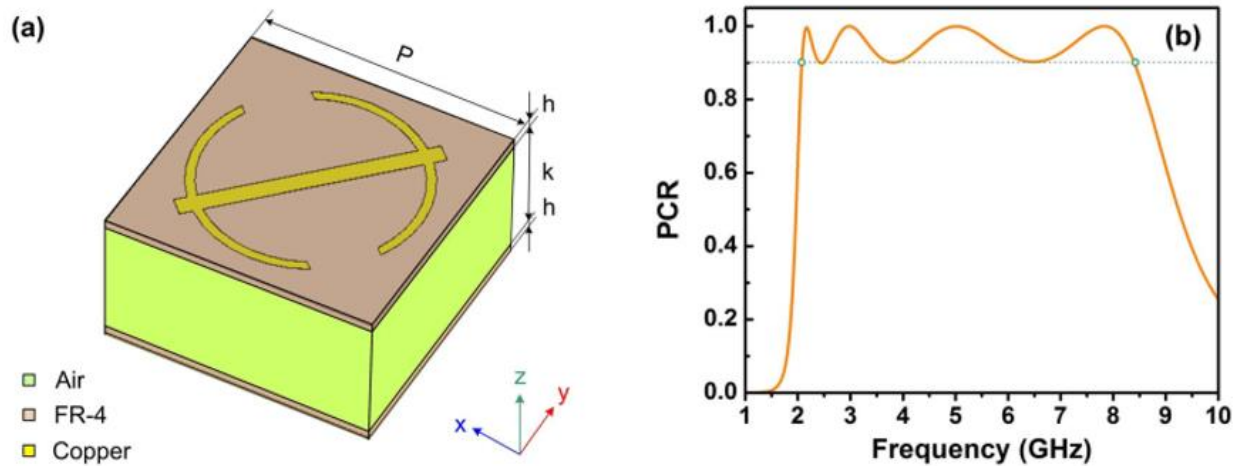


Hình 1.8 (a) Nguyên lý làm việc của bộ chuyển đổi phân cực và (b) Ô cơ sở của 1 cấu trúc vật liệu Meta chuyển đổi phân cực [63]

Sóng tới được phân tách thành hai thành phần vuông góc $\vec{E}_i = \vec{u}E_{iu}e^{j\theta} + \vec{v}E_{iv}e^{j\theta}$ và sóng phản xạ là $E_r = \vec{u}E_{ru} + \vec{v}E_{rv} = \vec{u}r_uE_{iu}e^{j\theta} + \vec{v}r_vE_{iv}e^{j\theta}$ như trên hình mô tả. Ở đây, r đóng vai trò là hệ số phản xạ trong khi u và v biểu thị hai hướng được quay ngược chiều kim đồng hồ 45 độ từ hai trục x và y tương ứng. Do tính dị hướng của cấu trúc nên sẽ xuất hiện sự lệch pha (Δ_α) giữa r_u và r_v [64]. Nếu $|r_u| \approx |r_v|$ và $\Delta_\alpha \approx 180$ độ thì sự phân cực của sóng phản xạ sẽ dọc theo phương x hay nói cách khác, có thể thực hiện quay phân cực một góc 90 độ [65]. Sự quay phân cực và độ lệch pha này có thể được kiểm soát bằng việc thiết kế cấu trúc của vật liệu biến hóa [66].

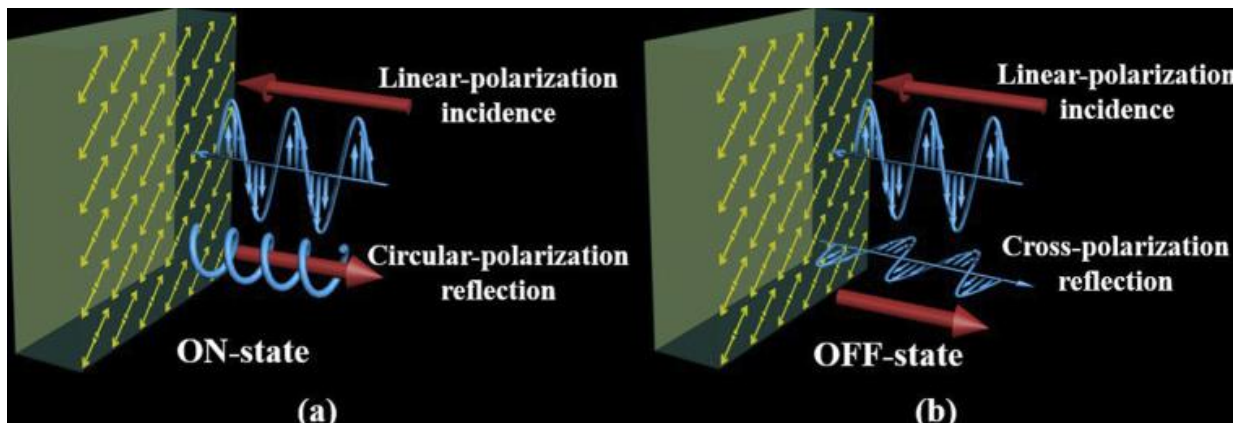
Tuy nhiên, rất khó để loại cấu trúc vật liệu kể trên có thể giữ được hiệu suất chuyển đổi cao trong dải tần rộng [67]. Tuy rằng dải tần hoạt động có thể được mở rộng bằng cách xếp nhiều lớp vật liệu biến hóa để đạt được cộng hưởng đơn trong mỗi lớp ở các tần số lân cận [68, 69], cách làm này lại đồng thời khiến cấu trúc trở nên cồng kềnh hơn và việc vật liệu bao gồm quá nhiều lớp sẽ gây khó cho quy trình chế tạo và tích hợp bộ chuyển đổi trên thiết bị. Tuy nhiên, vấn đề này vẫn có thể được khắc phục chỉ bởi việc cấu trúc hóa cấu trúc

vật liệu MM, đặc biệt là ở lớp kim loại trên cùng của vật liệu.



Hình 1.9 (a) Cấu trúc và (b) phổ PCR của một mô hình vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng phản xạ trên dải tần rộng [67]

Tích hợp lên vật liệu biến hóa truyền thống các thiết bị, linh kiện ngoại vi nhằm điều khiển, thay đổi các đặc tính phân cực của sóng phản xạ cũng như truyền qua cũng đang là một hướng nghiên cứu mới đầy tiềm năng vì có thể điều khiển tính chất này một cách linh hoạt mà không cần cấu trúc hóa lại vật liệu. Hình 1.9 thể hiện sự chuyển đổi từ phân cực vuông góc thành phân cực tròn của sóng phản xạ dựa trên một mô hình cấu trúc vật liệu MM khi PIN diode tích hợp trên vật liệu vận hành từ mode OFF qua mode ON [70].



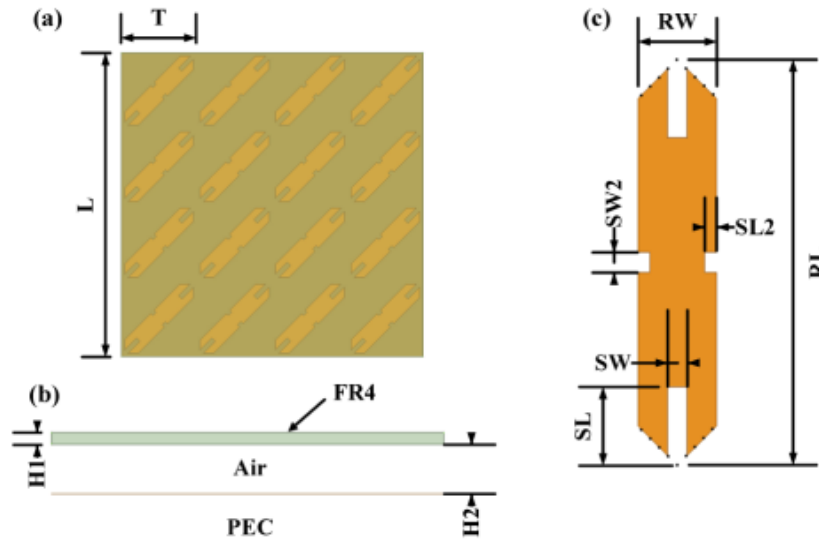
Hình 1.10 Sóng phản xạ được chuyển đổi từ (b) phân cực vuông góc thành (a) phân cực tròn khi PIN diode được bật từ trạng thái OFF qua trạng thái ON [70]

1.3. ỨNG DỤNG CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CHUYỂN ĐỔI TRẠNG THÁI PHÂN CỰC CỦA SÓNG ĐIỆN TỪ

Vì những đặc tính đặc thù khi chuyển đổi, xoay phân cực đối với sóng điện từ chiếu tới nên thể hệ vật liệu biến hóa này đang thể hiện những ứng dụng lớn trong các lĩnh vực như truyền tải, thu nhận thông tin cũng như trong các lĩnh vực trinh sát, thám báo của quân sự. Có thể kể ra các ứng dụng như sau:

1.3.1. Ứng dụng trong công nghệ tàng hình

Với việc phát triển nhanh chóng của công nghệ tàng hình, việc giảm tiết diện Radar (RCS-Radar Cross Section) đã thu hút rất nhiều sự chú ý [71]. Điều này ban đầu được tiếp cận bằng cách sử dụng các vật liệu hấp thụ thông thường. Tuy nhiên những loại vật liệu này vấp phải những hạn chế như là chỉ hoạt động trong một vùng dải tần hẹp và sự phức tạp, cồng kềnh của cấu trúc đã ảnh hưởng đến khả năng tích hợp nó trên thiết bị, giảm đi tính ứng dụng của nó. Với sự ra đời của lĩnh vực nghiên cứu vật liệu biến hóa sau này đã mang đến cho công nghệ tàng hình một cách tiếp cận mới đó là sử dụng vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ và biến đổi chúng thành năng lượng nhiệt để đạt được RCS thấp [20, 72-75].



Hình 1.11 Hình ảnh (a) góc nhìn từ trên xuống (b) mặt cắt ngang và (c) ô cơ sở của một cấu trúc bề mặt chuyển đổi phân cực có hiệu ứng chuyển đổi phân cực dải tần rộng ứng dụng trong ăng ten thu nhỏ với hệ số RCS thấp [77]

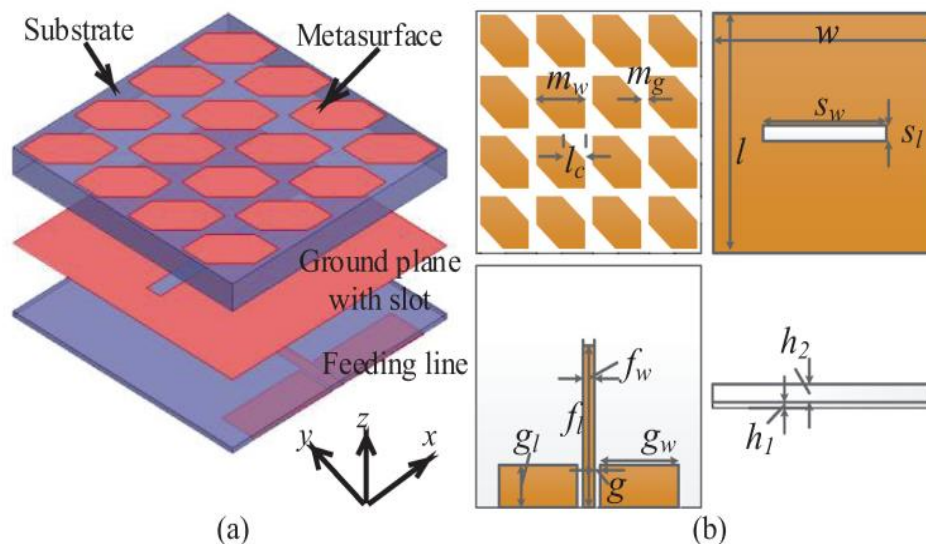
Một cách tiếp cận khác để giảm RCS cũng trên nền vật liệu biến hóa đó là làm lệch hướng năng lượng tán xạ ra khỏi hướng tán xạ ngược bằng cách cấu trúc hóa mô hình ô cơ sở bởi các dây dẫn từ tính nhân tạo (Artificial Magnetic

Conductors-AMC) và các dây dẫn hoàn hảo (Perfect Conductors-PEC) với cấu hình ô bàn cờ để giảm RCS trong một dải hẹp, tận dụng độ lệch pha giữa chúng [76].

Để mở rộng băng thông, người ta sử dụng cấu trúc hỗn hợp bao gồm hai cấu trúc AMC với độ lệch pha phản xạ $180^\circ \pm 30^\circ$ được thiết kế để giảm RCS băng thông rộng [78, 79]. Ngoài ra, một số bề mặt làm từ vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực đã được thiết kế để giảm RCS [80-84] khi bố trí một cách hợp lý các phần tử trên bề mặt với đặc tính chuyển đổi phân cực, phân cực của sóng tán xạ là trực giao với phân cực của sóng tới và gây ra giao thoa triệt tiêu theo hướng tán xạ ngược lại.

1.3.2. Ứng dụng trong ăng ten

Vật liệu biến hóa đã được sử dụng trong lĩnh vực ăng ten nhằm cải thiện khả năng hoạt động, nâng cao hiệu suất của ăng ten như nâng cao băng thông, tăng hiệu quả ghi nhận tín hiệu và giảm kích cỡ của nhiều loại ăng ten [85-89]. Cụ thể, bằng cách tích hợp các vật liệu biến hóa hai chiều phẳng vào ăng ten khe microstrip thông thường, các nhà nghiên cứu đã thu được băng tần rộng phân cực tuyến tính độ lợi cao cấu hình thấp (LP) [90, 91] và cả ăng ten phân cực tròn [92, 93].



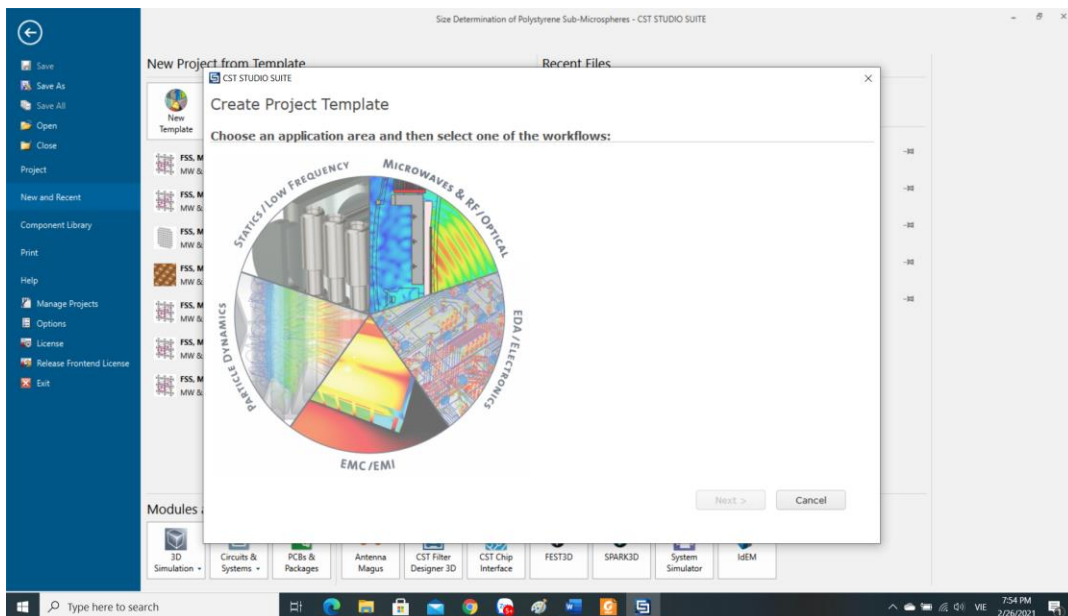
Hình 1.12 a) Sơ đồ thành phần cấu trúc và b) hình ảnh thiết kế và thông số chi tiết của một bề mặt vật liệu biến hóa trên một ăng ten được đề xuất [94]

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Luận văn sử dụng kết hợp các phương pháp mô phỏng, tính toán lý thuyết và kiểm chứng bằng thực nghiệm nhằm đem lại kết quả chính xác nhất có thể. Xuất phát từ ý tưởng thông qua các cơ sở lý thuyết, cấu trúc vật liệu biến hóa được đề xuất sẽ được mô phỏng các thông số và kết quả bằng phần mềm CST. Và để giải thích cơ chế hiện tượng chuyển đổi phân cực, luận văn sẽ trình bày phương pháp tính toán bằng lý thuyết để so sánh và kiểm chứng với kết quả mô phỏng.

2.1. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

Luận văn sử dụng phần mềm mô phỏng CST (Computer Simulation Technology) để xây dựng mô hình cấu trúc và lấy thông số các phổ truyền qua, hấp thụ, phản xạ và tỷ lệ chuyển đổi phân cực của mẫu cấu trúc vì tính hiệu quả và độ chính xác cao của phần mềm đã được nghiệm thu qua rất nhiều công bố. Chương trình mô phỏng tương tác với trường điện từ dựa trên kỹ thuật tích phân hữu hạn (finite integration technique) được đề xuất lần đầu tiên bởi Weiland [95].



Hình 2.1 Giao diện của phần mềm mô phỏng CST

Về bản chất, FIT tạo ra các phương trình Maxwell mới bằng cách biến đổi từ phương trình Maxwell và các phương trình tán sắc từ liên tục đến rời rạc bằng cách đặt một điện áp trên cạnh các lưới và lưới kép, nó đảm bảo các tính chất vật

lý của hệ được duy trì trong không gian rời rạc và có nghiệm duy nhất. Và các phương trình này có dạng tích phân, cụ thể như sau:

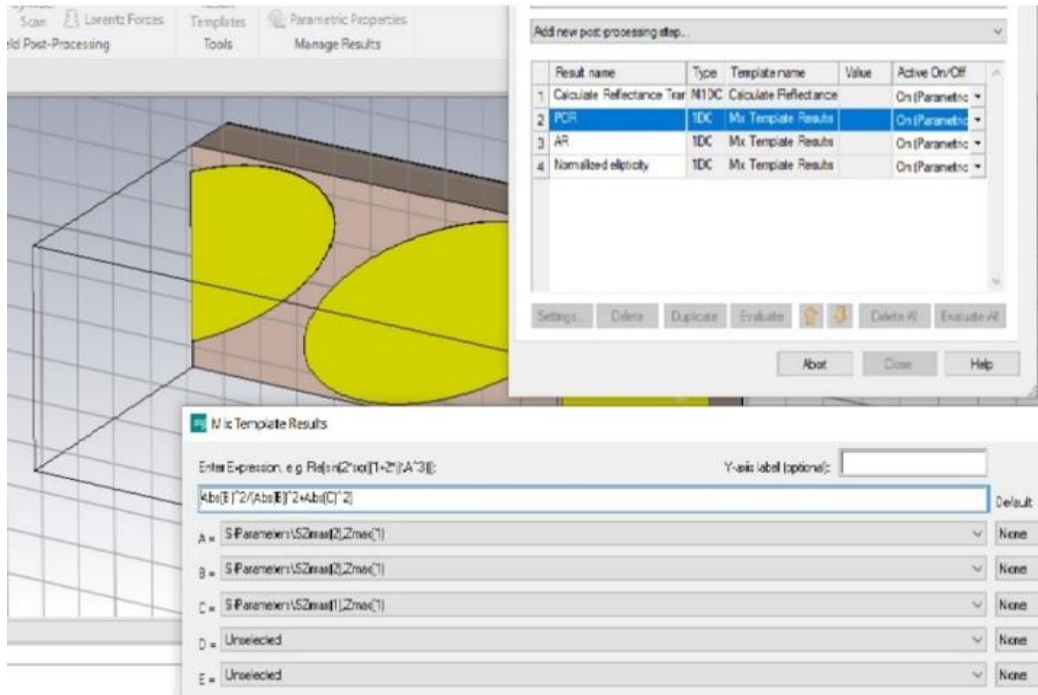
$$\oint_{\partial A} \mathbf{E} ds = - \int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} dA \quad (2.1)$$

$$\oint_{\partial V} \mathbf{D} d\mathbf{A} = - \int_V \rho dV \quad (2.2)$$

$$\oint_{\partial A} \mathbf{H} ds = - \int_A \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) dA \quad (2.3)$$

$$\oint_{\partial V} \mathbf{B} d\mathbf{A} = 0 \quad (2.4)$$

Sau đó, hệ thống sẽ vi phân các cấu trúc không đồng nhất thành các vi cấu trúc đồng nhất bằng cách tạo ra một hệ thống lưới phù hợp từ chia tách miền lớn ra thành nhiều phần nhỏ, hoặc các lưới. Chi tiết có thể xem tại mục Online Help/Advanced trong phần mềm. CST cung cấp cho người dùng các phương pháp giải khác nhau với các đặc tính riêng biệt: Transient Solver (TS) và Frequency Domain Solver (FDS). Cách giải (TS) thực hiện mô phỏng các thông số tương tác của cấu trúc thông qua giải các phương trình Maxwell trong một vùng tần số rộng với chỉ một lần tính toán duy nhất nên thời gian thực hiện phép giải ngắn và không tốn nhiều dung lượng máy tính. Tuy nhiên, phương pháp này chỉ hiệu quả trên vật liệu có điều kiện kích thước lớn. Ngược lại, phương pháp (FDS) lại phù hợp đối với các cấu trúc nhỏ có tính tuần hoàn hoạt động trong dải tần hẹp. Vậy nên luận văn lựa chọn sử dụng cách giải FDS vì những thuận lợi của nó đối với các cấu trúc vật liệu biến hóa với các ô cơ sở được sắp xếp tuần hoàn trong vùng tần số THz



Hình 2.2 Giao diện làm việc của phần mềm CST

Các tham số đầu vào cần nhập để thực hiện mô phỏng tính chất điện từ của cấu trúc bao gồm: lựa chọn vật liệu (có thể nhập trực tiếp các thông số vật liệu mong muốn hoặc sử dụng dữ liệu từ ngân hàng sẵn có của CST), thiết kế cấu trúc mong muốn với các tham số cụ thể hoặc nhập dưới dạng biến số khởi chạy với nhiều giá trị khác nhau. Bước cuối cùng trước khi thực hiện mô phỏng là chỉnh tần số hoạt động, điều kiện biên và khoảng cách từ các nguồn đến cấu trúc. Cấu trúc vật liệu biến hóa được đặt giữa nguồn phát và nguồn thu. Sau đó thực hiện mô phỏng, với đầu ra chứa các tham số tán xạ bao gồm hệ số truyền qua S_{21} và hệ số phản xạ S_{11} . Từ những dữ liệu này, độ phản xạ R , độ truyền qua T và độ hấp thụ A , tỷ lệ chuyển đổi phân cực PCR,... được xác định theo bằng cách nhập các công thức vào Result Templates:

$$R(\omega) = |S_{11}|^2 \quad (2.5)$$

$$T(\omega) = |S_{21}|^2. \quad (2.6)$$

$$A(\omega) = 1 - T - R. \quad (2.7)$$

$$\text{PCR} = \frac{|r_{xy}|^2}{|r_{xy}|^2 + |r_{yy}|^2} \quad (2.8)$$

Các thông số khác như dòng bề mặt, phân bố điện - từ trường và mật độ

tổn hao năng lượng cũng được biểu thị rõ ràng, phản ánh rõ những hiệu ứng do tương tác của sóng điện từ tới đối với cấu trúc vật liệu biến hóa. Từ đó có thể nghiệm ra cơ chế hoạt động của vật liệu và các tính chất điện từ của chúng.

2.2. PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN

Phần này sẽ trình bày phương pháp tính toán bằng lý thuyết hai hệ số phản xạ đồng trục và vuông góc R_{vu} và R_{uu} dựa theo các hệ số phản xạ đồng trục và vuông góc thành phần (R_{xx}, R_{yy}) và (R_{xy}, R_{yx}) tương ứng với hai phương x và y của sóng phản xạ nhằm nêu bật lên cơ chế của hiện tượng chuyển đổi phân cực sóng phản xạ diễn ra trên vật liệu biến hóa.

Sóng điện từ truyền tới E_i được phân tích thành 2 thành phần vuông góc E_{ix} và E_{iy} tương ứng với 2 trục x và y tương ứng. Sóng tới và sóng phản xạ được biểu diễn bởi công thức:

$$E_i = \hat{x}E_{ix}e^{i\varphi} + \hat{y}E_{iy}e^{i\varphi} \quad (2.9)$$

và

$$E_r = \hat{x}E_{rx} + \hat{y}E_{ry} \quad (2.10)$$

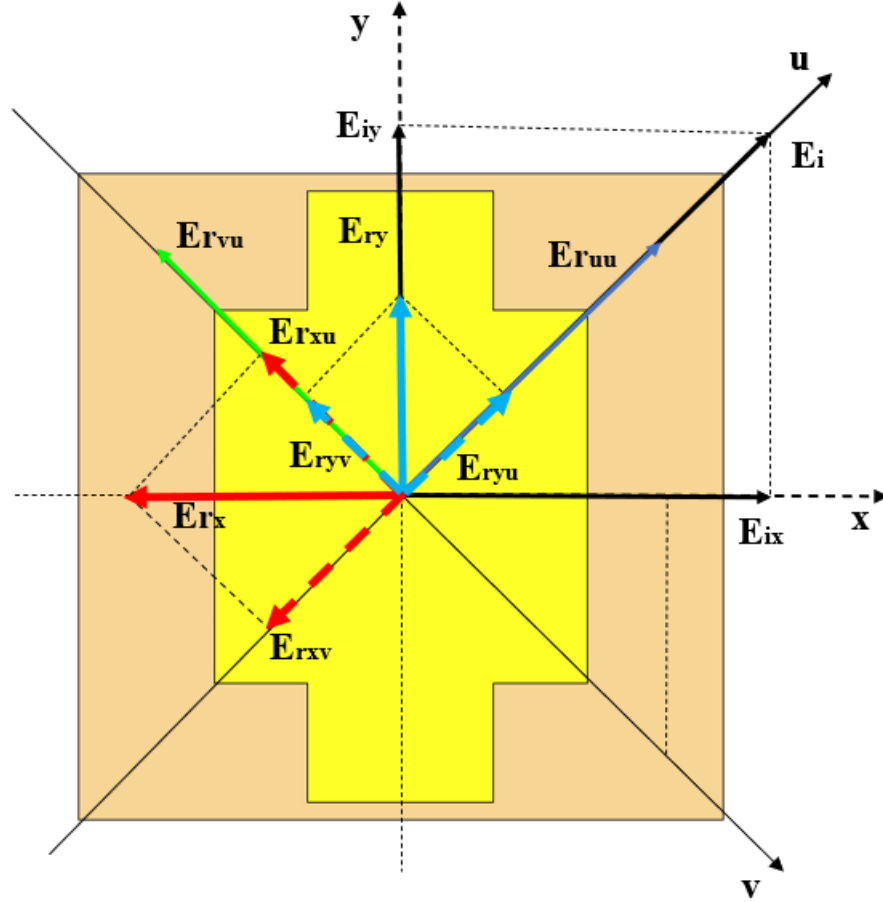
$$= \hat{x}(R_{xx}E_{ix}e^{i\varphi_{xx}} + R_{xy}E_{iy}e^{i\varphi_{xy}}) + \hat{y}(R_{yy}E_{iy}e^{i\varphi_{yy}} + R_{yx}E_{ix}e^{i\varphi_{yx}}) \quad (2.11)$$

với \hat{x} và \hat{y} là các vector đơn vị, (R_{xx}, R_{yy}) và (R_{xy}, R_{yx}) lần lượt là bộ giá trị của thông số phản xạ đồng trục và vuông góc của thành phần sóng tới ứng với trục x và y với các giá trị góc pha $(\varphi_{xx}, \varphi_{yy})$, $(\varphi_{xy}, \varphi_{yx})$ và độ lệch pha $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$ tương ứng của 2 cặp góc pha đã nêu.

Để đi sâu và làm rõ cơ chế chuyển đổi, một giản đồ chi tiết về phân tích sóng được trình bày trên hình 2.3 để phục vụ cho việc tính toán ra các giá trị của R_{vu} và R_{uu} dựa trên giá trị của các tham số phản xạ thành phần R_{xx} , R_{yy} , R_{yx} và R_{xy} .

Dựa theo khảo sát về nhiều công trình nghiên cứu đã được công bố về vật liệu biến hóa có khả năng chuyển đổi phân cực trên dải tần số rộng thì hai tham số phản xạ vuông góc thành phần là rất nhỏ (R_{yx} và $R_{xy} \sim 0$) [51, 63, 67, 96] và gần như không tham gia đáng kể vào hiệu ứng chuyển đổi nên để đơn giản hóa việc tính toán, người ta có thể loại bỏ hai tham số R_{yx} và R_{xy} , công thức (2.11)

trở thành:



Hình 2.3 Cơ chế của sự chuyển đổi phân cực sóng phản xạ trên vật liệu biến hóa

$$E_r = \hat{x}(R_{xx}E_{ix}e^{i\phi_{xx}}) + \hat{y}(R_{yy}E_{iy}e^{i\phi_{yy}}) \quad (2.12)$$

Phân tách vector sóng phản xạ E_r lên hai trục thành phần u và v ta được công thức:

$$E_r = (R_{xx}E_{ix}e^{i\phi_{xx}}) * \cos\alpha_{vx}\hat{v} - (R_{yy}E_{iy}e^{i\phi_{yy}}) * \cos\alpha_{vy}\hat{v} + (R_{xx}E_{ix}e^{i\phi_{xx}}) * \cos\alpha_{ux}\hat{u} + (R_{yy}E_{iy}e^{i\phi_{yy}}) * \cos\alpha_{uy}\hat{u} \quad (2.13)$$

với α_{vx} , α_{vy} và α_{ux} , α_{uy} lần lượt là góc hợp bởi trục x và y với hai trục v và u tương ứng

Dấu “-” giữa số hạng thứ nhất và số hạng thứ hai là bởi giá trị của $\overrightarrow{E_{rx}}$ luôn ngược dấu với vector chiều của nó lên trục v trong khi $\overrightarrow{E_{ry}}$ lại luôn cùng dấu với vector chiều của nó lên trục v, và dấu “+” giữa số hạng thứ ba và số hạng thứ tư là do hai vector $\overrightarrow{E_{rx}}$ và $\overrightarrow{E_{ry}}$ luôn cùng dấu với vector chiều của nó lên trục v (hình 2.3).

Và phương trình sóng phản xạ dao động trên trục v và u được tính bởi hai công thức sau:

$$\overrightarrow{E_{rvu}} = (R_{xx}E_{ix}e^{i\varphi_{xx}}) * \cos\alpha_{vx}\hat{v} - (R_{yy}E_{iy}e^{i\varphi_{yy}}) * \cos\alpha_{vy}\hat{v} \quad (2.14)$$

$$\overrightarrow{E_{ruu}} = (R_{xx}E_{ix}e^{i\varphi_{xx}}) * \cos\alpha_{ux}\hat{u} + (R_{yy}E_{iy}e^{i\varphi_{yy}}) * \cos\alpha_{uy}\hat{u} \quad (2.15)$$

Bắt đầu với trường hợp của $\overrightarrow{E_{rvu}}$, với, trong trường hợp khảo sát của chúng tôi thì thành phần điện trường của sóng tới phân cực trên trục hợp với trục y một góc 45° nên $\alpha_{vx} = \alpha_{vy} = 45^\circ$, công thức (2.15) trở thành:

$$\overrightarrow{E_{rvu}} = (R_{xx}E_i e^{i\varphi_{xx}}) * \cos\varphi \cos\alpha_{vx}\hat{v} - (R_{yy}E_i e^{i\varphi_{yy}}) * \cos\varphi \cos\alpha_{vy}\hat{v} \quad (2.16)$$

$$= \frac{E_i}{2} (R_{xx}e^{i\varphi_{xx}} - R_{yy}e^{i\varphi_{yy}})\hat{v} \quad (2.17)$$

Khai triển công thức trên dưới dạng hàm lượng giác:

$$\overrightarrow{E_{rvu}} = \frac{E_i}{2} [R_{xx}(\cos\varphi_{xx} + i\sin\varphi_{xx}) - R_{yy}(\cos\varphi_{yy} + i\sin\varphi_{yy})]\hat{v} \quad (2.18)$$

$$= \frac{E_i}{2} [(R_{xx}\cos\varphi_{xx} - R_{yy}\cos\varphi_{yy}) + i(R_{xx}\sin\varphi_{xx} - R_{yy}\sin\varphi_{yy})]\hat{v} \quad (2.19)$$

Suy ra biên độ của sóng phản xạ trên phương v là:

$$\begin{aligned} |\overrightarrow{E_{rvu}}| &= \\ &= \sqrt{[\left(\frac{E_i}{2}\right)^2 (R_{xx}\cos\varphi_{xx} - R_{yy}\cos\varphi_{yy})^2 + \left(\frac{E_i}{2}\right)^2 (R_{xx}\sin\varphi_{xx} - R_{yy}\sin\varphi_{yy})^2]} \\ &= E_i \sqrt{\frac{(R_{xx}^2 + R_{yy}^2 - 2R_{xx}R_{yy}\cos(\Delta\varphi_1))}{2}} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Với $\Delta\varphi_1$ là độ lệch pha giữa hai sóng phản xạ đồng trục của 2 sóng thành phần E_{ix} và E_{iy} .

Và hệ số phản xạ trên trục v sẽ là:

$$R_{vu} = \frac{\sqrt{(R_{xx}^2 + R_{yy}^2 - 2R_{xx}R_{yy}\cos(\Delta\varphi_1))}}{2} \quad (2.21)$$

Tính toán tương tự cho tham số phản xạ đồng trục:

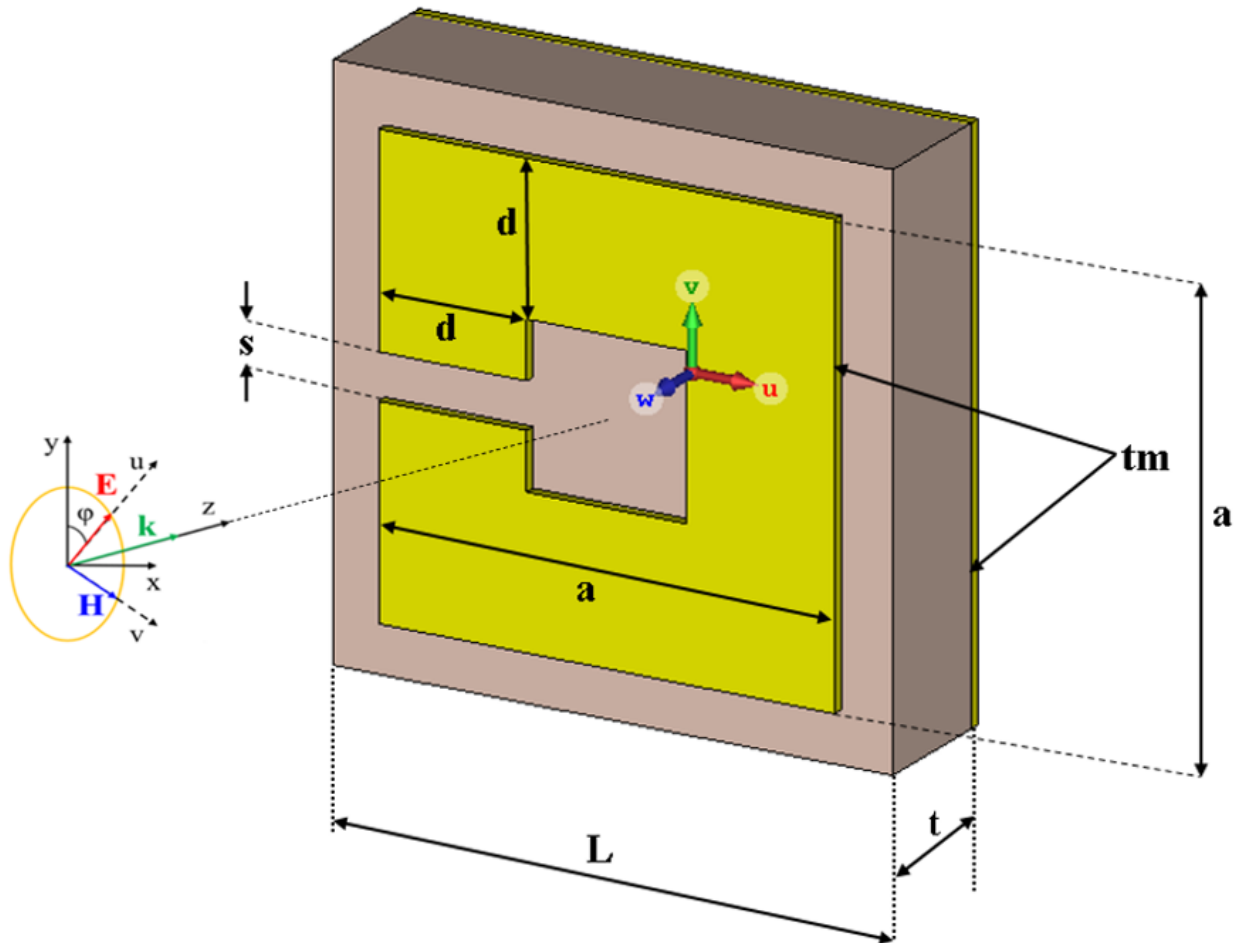
$$R_{uu} = \frac{\sqrt{(R_{xx}^2 + R_{yy}^2 + 2R_{xx}R_{yy}\cos(\Delta\varphi_1))}}{2} \quad (2.22)$$

Công thức (2.21) và (2.22) sẽ được sử dụng để tính toán phổ hệ số phản xạ đồng trục và vuông góc trong so sánh với kết quả mô phỏng ở chương 3.

CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 ĐIỀU CHỈNH ĐẶC TÍNH CHUYỂN ĐỔI PHÂN CỰC BẰNG THAM SỐ CẤU TRÚC

3.1.1 Cấu trúc đề xuất



Hình 3.1 Mô hình cấu trúc ô cơ sở của vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ trong vùng tần số GHz được đề xuất

Hình 3.1 trình bày mô hình ô cơ sở của vật liệu biến hóa được đề xuất. Vật liệu biến hóa được nghiên cứu có 3 lớp, bao gồm lớp kim loại đồng được cấu trúc hóa nằm phía trên cùng, lớp điện môi FR-4 có tổn hao và một lớp kim loại đồng với kích thước giống như ô cơ sở nằm dưới cùng. Lớp đồng liên tục này đóng vai trò ngăn không cho sóng điện từ truyền qua vật liệu. Trong mô phỏng, độ dẫn điện của đồng là $\sigma = 5,8 \text{ MS/m}$. Hệ số điện môi và hệ số tổn hao của FR-4 tương ứng là 4,3 và 0,025. Giá trị cụ thể của các tham số cấu trúc đề xuất được trình bày trong bảng 3.1.

Tham số	Giá trị	Chú thích
<i>Theta</i>	0 độ	Góc tới của sóng điện từ
<i>Phi</i>	45 độ	Góc phân cực của điện trường
<i>L</i>	24,5 mm	Chiều dài ô cơ sở
<i>T</i>	5,5 mm	Bề dày lớp điện môi
<i>t_m</i>	0,035 mm	Bề dày lớp kim loại
<i>a</i>	14,5 mm	Kích thước của SRR
<i>d</i>	6,25 mm	Độ rộng vành của SRR
<i>x</i>	0	Độ dịch chuyển vị trí của rãnh trên SRR khỏi vị trí trung tâm ban đầu
<i>s</i>	0,5 mm	độ rộng của rãnh trên SRR

Bảng 3.1 Bảng tham số cấu trúc của vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ và sự phân cực của sóng điện từ tới.

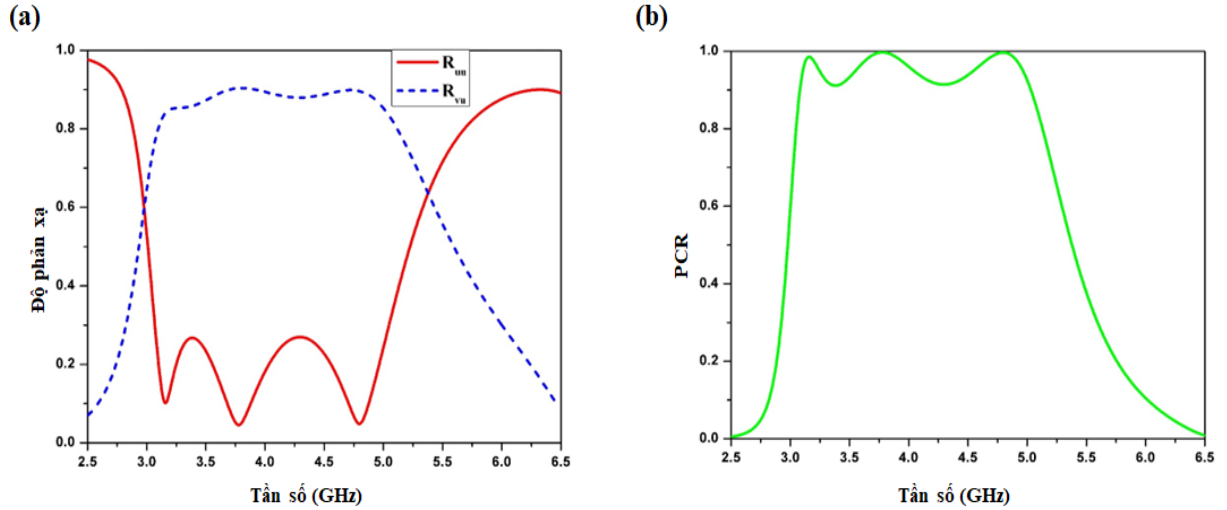
3.1.2. Kết quả khảo sát mô phỏng

3.1.2.1. Phổ hệ số chuyển đổi phân cực và PCR của bộ tham số cấu trúc đề xuất

Hệ số chuyển đổi phân cực vuông góc R_{vu} đạt giá trị độ lớn $\sim 90\%$ trong dải tần từ 3,18 GHz tới 4,8 GHz trong khi phổ PCR của cấu trúc vật liệu đề xuất đạt giá trị độ lớn trên 90% trong vùng tần số từ 3,08 GHz đến 5,03 GHz và có đỉnh chuyển đổi hấp thụ tại 3 tần số 3,18 GHz, 3,775 GHz và 4,795 GHz, nơi mà chuyển đổi phân cực chéo trực xảy ra lần lượt là 97,5%, 99,8% và 99,6% đối với sóng phản xạ (hình 3.2).

Phổ PCR thể hiện tỷ lệ theo phần trăm năng lượng sóng điện từ bị chuyển đổi phân cực vuông góc so với phương ban đầu đối với sóng phản xạ. Như ở phổ trên ta thấy hiệu ứng chuyển đổi phân cực ở mức trên 90% diễn ra trên 1 dải

tần rộng cỡ 2 GHz.



Hình 3.2 Phổ (a) độ phản xạ và (b) PCR của cấu trúc chuyển đổi phân cực với tham số đề xuất

$$\text{Công thức PCR: } \text{PCR} = \frac{|R_{vu}|^2}{(|R_{vu}|^2 + |R_{uu}|^2)} \quad (3.1)$$

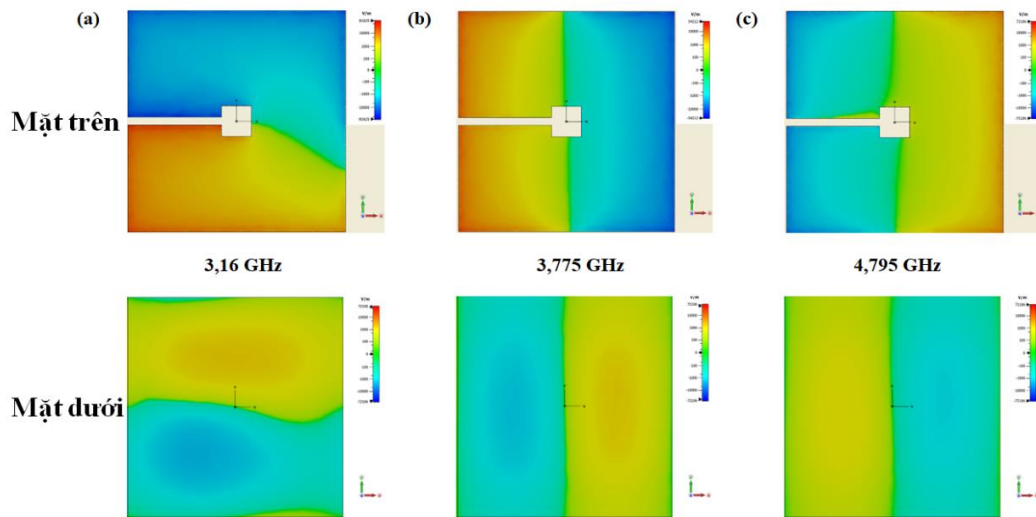
Với $|R_{vu}|^2$ và $|R_{uu}|^2$ lần lượt là 2 hệ số phản xạ vuông góc và phản xạ đồng trục của sóng phản xạ.

3.1.2.2. Cơ chế của hiệu ứng chuyển đổi phân cực

Hình 3.3(c) và 3.3(d) chỉ ra rằng ở cả 3 đỉnh cộng hưởng của phổ chuyển đổi phân cực thì độ lệch pha giữa R_{xx} và R_{yy} ($\Delta\phi_1$) cũng như R_{xy} và R_{yx} ($\Delta\phi_2$) lần lượt xấp xỉ bằng 180 độ và 0 độ, điều này chỉ ra rằng chuyển đổi phân cực trong trường hợp này là chuyển đổi từ trạng thái phân cực tuyến tính ban đầu thành một trạng thái phân cực tuyến tính với góc phân cực đã bị xoay đi so với góc phân cực ban đầu.

Từ các kết quả tính toán đã trình bày ở chương trước, phổ phản xạ của R_{vu} và R_{uu} được vẽ dựa theo công thức (2.21) và công thức (2.22) trình bày trên Hình 3.4. Bên cạnh đó, phổ phản xạ đồng trục và vuông góc của vật liệu biến hóa cũng được mô phỏng và so sánh với kết quả tính toán. Kết quả phổ tính toán gần như trùng khớp với phổ mô phỏng đã chứng minh rằng mô hình tính toán trong nghiên cứu là phù hợp với bản chất cơ chế của hiện tượng chuyển đổi phân cực sóng điện từ của cấu trúc vật liệu biến hóa.

mặt đã chỉ ra rằng chiều di chuyển của các điện tích tại bề mặt trước và sau của cấu trúc là ngược chiều nhau, tức là đỉnh cộng hưởng được gây ra bởi hiện tượng cộng hưởng từ. Tại tần số $f = 3,16$ GHz thì chiều di chuyển của điện tích hướng dọc theo trục y . Tại hai tần số $f = 3,775$ GHz và $f = 4,975$ GHz thì chiều di chuyển của điện tích hướng dọc theo trục x và ngược chiều nhau tại hai tần số cộng hưởng.

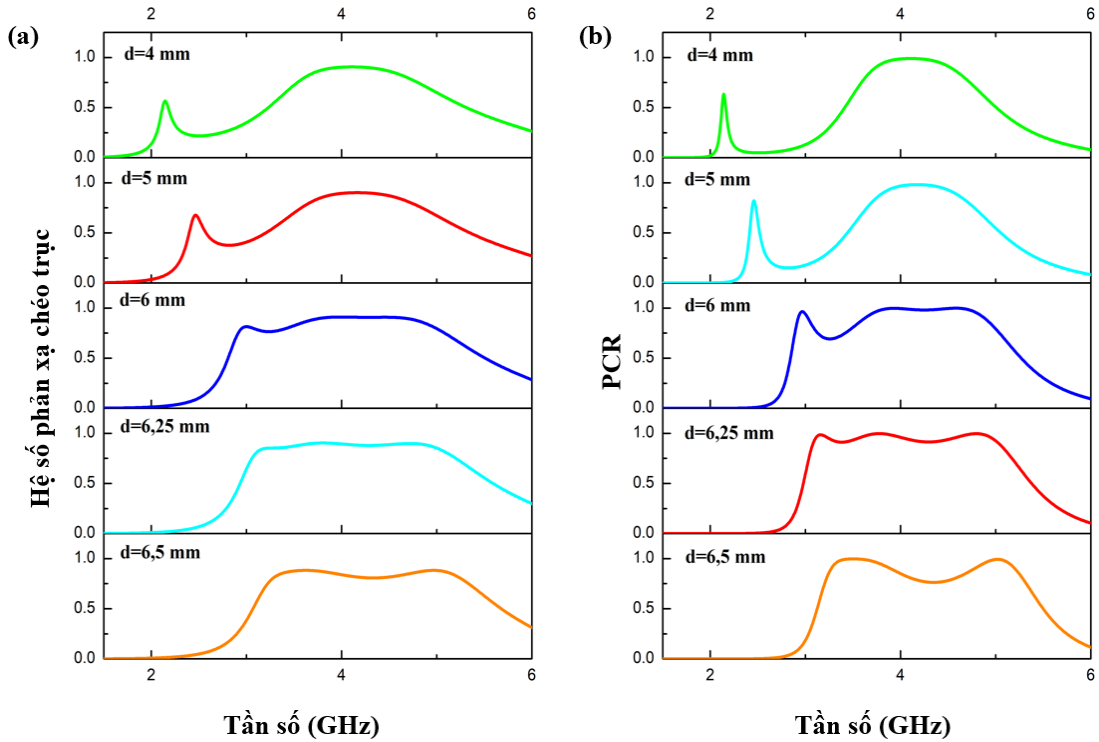


Hình 3.5 Hình ảnh mô phỏng phân bố điện trường tại mặt trước và sau của cấu trúc tại 3 tần số cộng hưởng (a) 3.16 GHz, (b) 3,775 GHz và (c) 4,975 GHz

3.1.2.3. Khảo sát tính chất chuyển đổi phân cực của cấu trúc với các giá trị tham số khác nhau

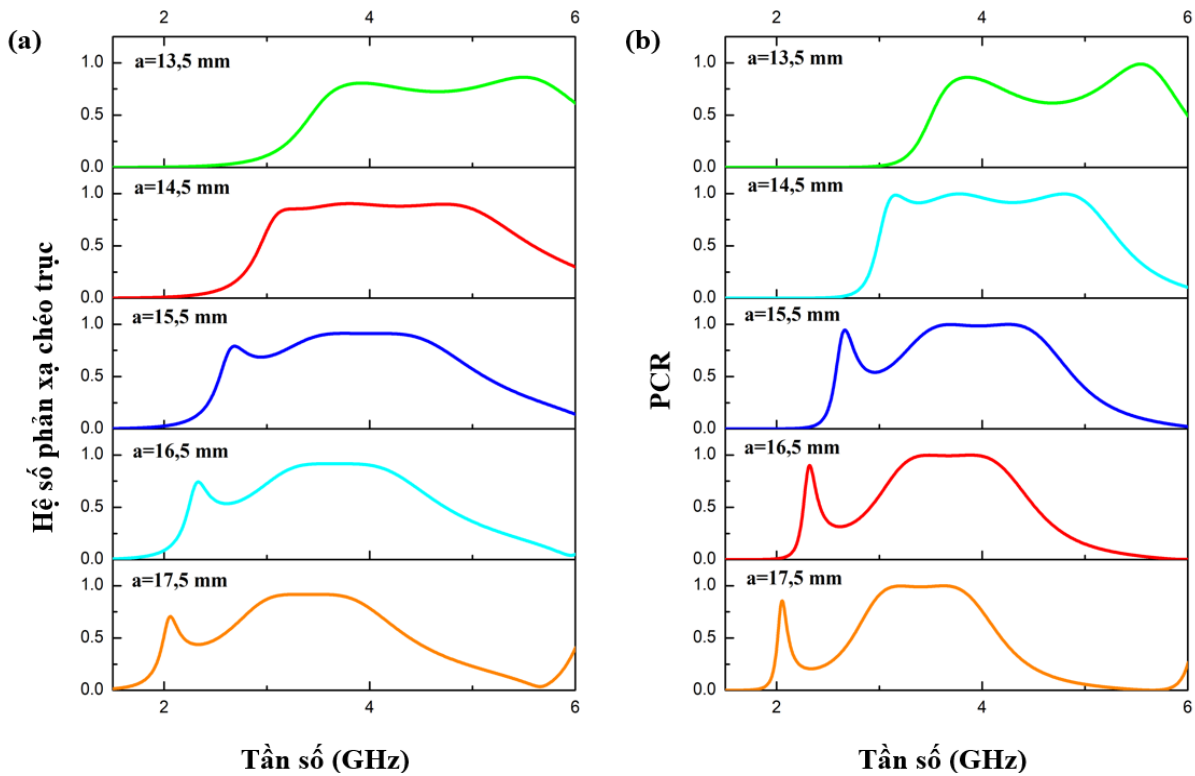
Hình 3.6 cho thấy sự phụ thuộc rõ rệt của phổ phản xạ vuông góc vào độ rộng vành d của SRR. Ở độ rộng vành lớn hơn 6,25 mm thì hệ số phản xạ vuông góc duy trì giá trị tương đối ổn định ở khoảng trên dưới 75% trong dải tần từ 3,6 GHz tới 5,75 GHz và PCR đạt giá trị lớn nhất 98% tại 5,5 GHz. Với các giá trị của d dưới từ 5 mm tới 3 mm thì hiệu ứng chuyển đổi phân cực diễn ra trong dải tần không quá 1 GHz. Ở độ rộng vành cộng hưởng là $d = 6,25$ mm cho giá trị của hệ số phản xạ vuông góc ($R_{vu} \sim 90\%$) và PCR (90% đến 100%) cao vượt trội và đồng thời hiệu ứng chuyển đổi phân cực ở trường hợp này cũng diễn ra trên dải tần rộng hơn rõ rệt so với các giá trị tham số khác được khảo sát với độ rộng vùng tần số hoạt động khoảng 2 GHz. Đỉnh cộng hưởng có xu hướng gia tăng về độ lớn và dịch chuyển về vùng tần số cao khi giá trị của d tăng, điều này cũng

trùng khớp với kết quả khảo sát trước đó của Aydin và các cộng sự vào năm 2005 [97]. Aydin đã giải thích theo mô hình phân tích của Sauivac [98] rằng khi độ rộng vành của SRR tăng lên sẽ làm giảm độ tự cảm và điện dung của mạch LC tương đương cấu trúc, vì vậy một SRR với độ rộng vành nhỏ sẽ có tần số cộng hưởng thấp hơn.



Hình 3.6 Sự phụ thuộc của (a) hệ số phản xạ vuông góc (R_{vu}) và (b) tỷ lệ chuyển đổi phân cực (PCR) vào độ rộng vành của SRR

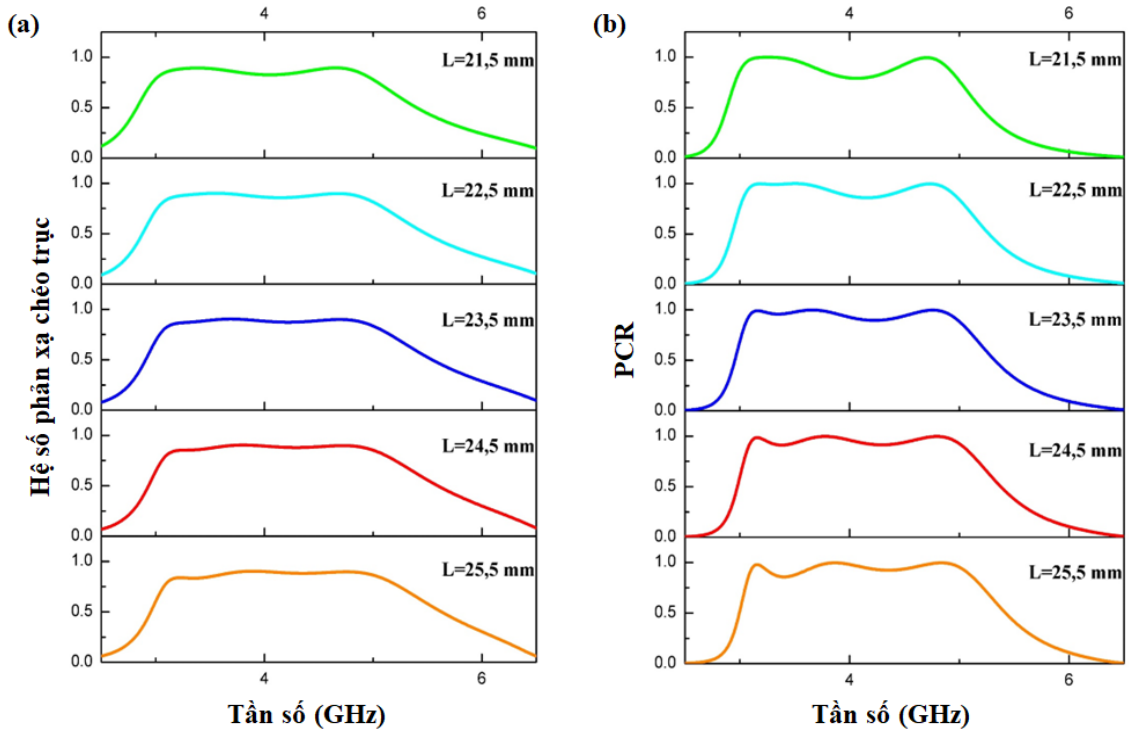
Kết quả khảo sát về sự ảnh hưởng của kích thước của SRR, a , lên tính chất điện từ của vật liệu biến hóa được trình bày trên Hình 3.7. Khi giá trị của a giảm thì đỉnh của phổ hệ số phản xạ R_{vu} có xu hướng dịch về phía tần số cao mà vẫn duy trì độ lớn của đỉnh ở mức 90%. Phổ phản xạ vuông góc và PCR đạt dải tần chuyển đổi phân cực rộng nhất ở ngưỡng 2 GHz khi giá trị $a = 14,5$ mm. Tần số cộng hưởng có xu hướng dịch chuyển về vùng tần số cao theo sự giảm dần của tham số a chứng tỏ tích số giữa độ tự cảm và điện dung của mạch điện tương đương với cấu trúc đã giảm xuống, những nghiên cứu khảo sát trước đó về ảnh hưởng của tham số SRR lên phổ cộng hưởng cũng có kết quả tương tự [97]. Có thể giải thích là do giá trị của độ tự cảm bị giảm do kích thước của vòng cộng hưởng kim loại nhỏ hơn.



Hình 3.7 Sự phụ thuộc của (a) hệ số phản xạ vuông góc (R_{vu}) và (b) tỷ lệ chuyển đổi phân cực (PCR) vào kích thước của SRR

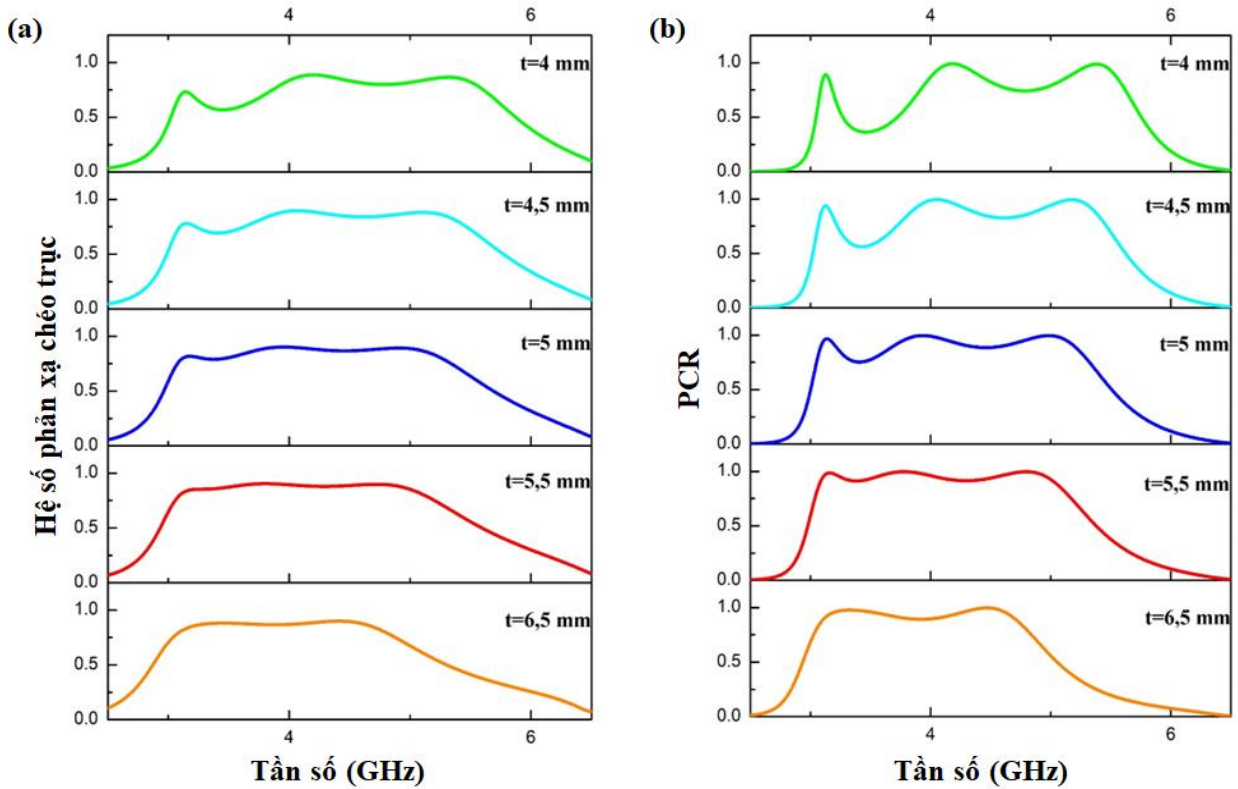
Ở kết quả khảo sát sự phụ thuộc của phổ phản xạ vào tham số L , khi kích thước ô cơ sở được tăng lên thì độ lớn của tham số phản xạ vuông góc R_{vu} cũng được tăng lên trong khi dải tần hoạt động của hiệu ứng chuyển đổi phân cực gần như không thay đổi (Hình 3.8a). Giá trị độ lớn của tham số phản xạ và PCR là tối ưu nhất tại $L = 24,5$ mm khi dải tần mà tỷ lệ chuyển đổi phân cực vuông góc (PCR) đạt trên 90% là rộng nhất (Hình 3.8b). Kết quả quan sát thấy phù hợp với các nghiên cứu trước đây, ở đó, kích thước ô cơ sở của vật liệu biến hóa chủ yếu ảnh hưởng đến biên độ của cộng hưởng từ và ít ảnh hưởng đến tần số của cộng hưởng từ [99, 100].

Trong các công trình đã công bố, độ dày lớp điện môi của vật liệu biến hóa không chỉ ảnh hưởng đến tần số cộng hưởng mà còn ảnh hưởng đến cả biên độ cộng hưởng [101-103]. Đối với vật liệu biến hóa có hiệu ứng chuyển đổi phân cực được đề xuất, độ dày lớp điện môi cũng đóng vai trò quan trọng do tham số này ảnh hưởng trực tiếp đến giá trị điện dung của tụ điện hình thành giữa hai lớp kim loại trên và dưới.



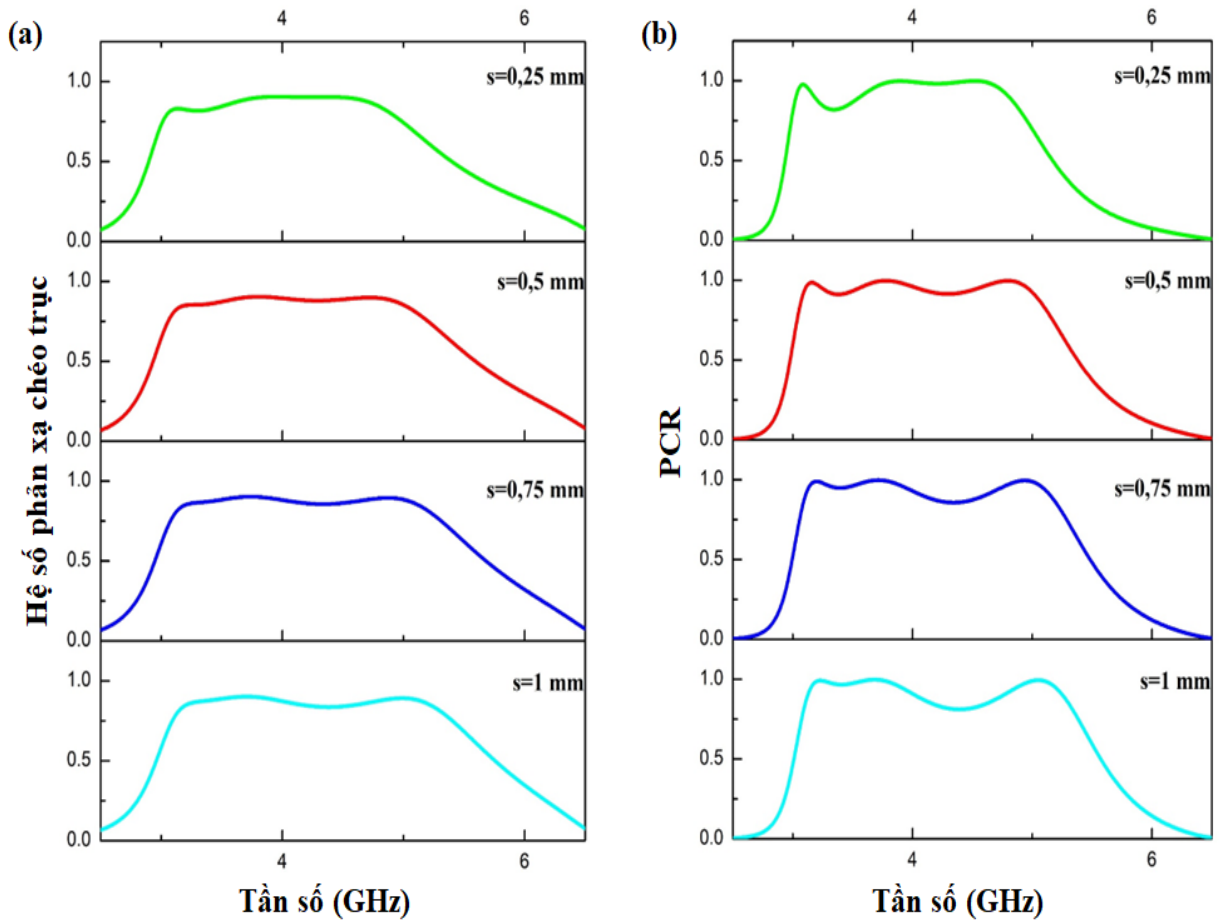
Hình 3.8 Sự phụ thuộc của (a) hệ số phản xạ vuông góc (R_{vu}) và (b) tỷ lệ chuyển đổi phân cực (PCR) vào chiều dài ô cơ sở

Kết quả mô phỏng trên Hình 3.9 đã thể hiện rõ sự thay đổi mạnh mẽ của phổ khi tăng giảm độ dày của lớp điện môi. Khi khảo sát tăng dần t từ 4 mm đến 5,5 mm thì đỉnh cộng hưởng thứ nhất gần như không dịch chuyển nhưng lại tăng lên rõ rệt về biên độ. Đồng thời, đỉnh cộng hưởng thứ 2 và thứ 3 dịch chuyển dần về vùng tần số thấp hơn, độ lớn của giá trị phổ giữa các đỉnh cũng được tăng lên hình thành nên 1 dải tần rộng nơi mà sóng điện từ bị chuyển đổi phân cực thành vuông góc ở tỷ lệ cao. Giá trị tham số R_{vu} và PCR lớn nhất thu được khi thực hiện khảo sát tại giá trị độ dày điện môi $t = 5,5$ mm. Khi t tiếp tục tăng lên trên 5,5 mm thì các đỉnh thứ 2 và thứ 3 tiếp tục có xu hướng dịch chuyển tiếp về vùng tần số thấp gây thu hẹp dải tần hoạt động của vật liệu biến hóa.



Hình 3.9 Sự phụ thuộc của (a) hệ số phản xạ vuông góc (R_{vu}) và (b) tỷ lệ chuyển đổi phân cực (PCR) vào độ dày lớp điện môi

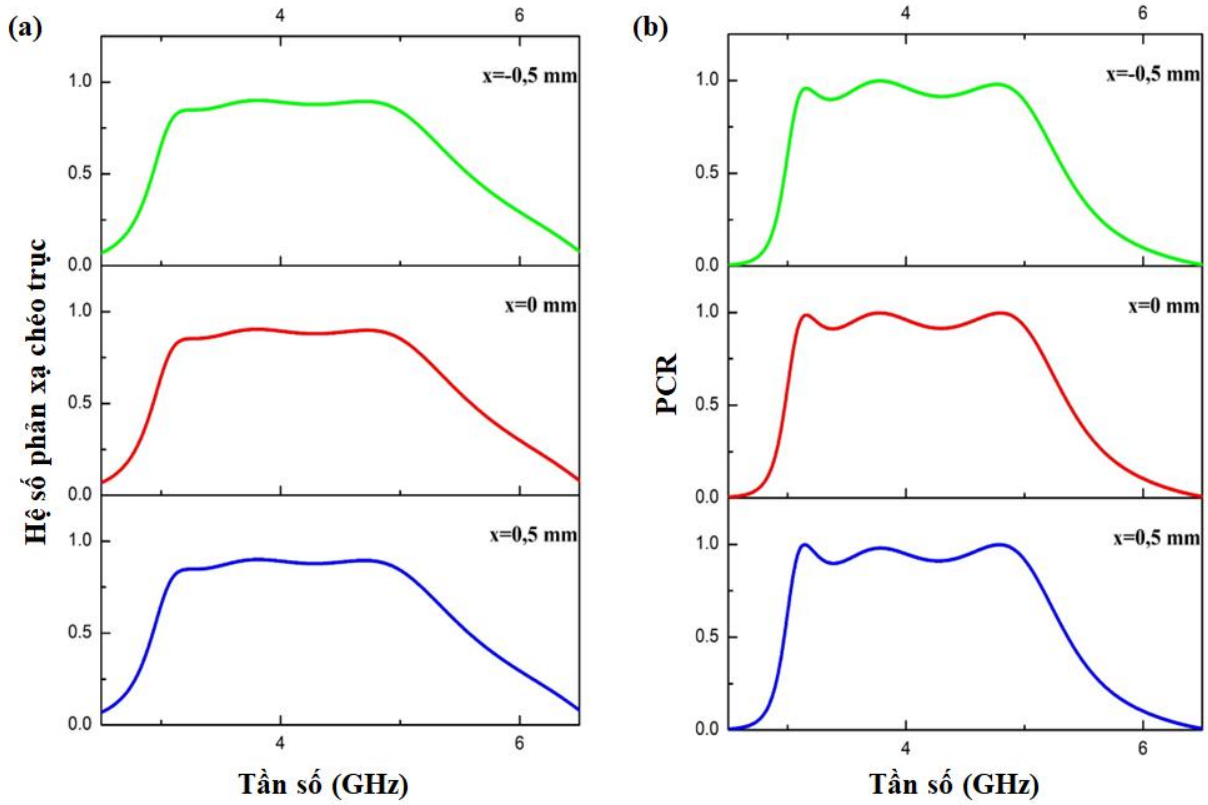
Hình 3.10 trình bày ảnh hưởng của tham số s (độ rộng của rãnh trên SRR) lên hiệu ứng chuyển đổi phân cực sóng điện từ. Có thể thấy rõ tham số s gây ra nhiều thay đổi ở phổ PCR hơn và gần như không làm thay đổi phổ R_{vu} . Điều đó cho thấy tham số này tác động nhiều lên hệ số phản xạ đồng trục R_{uu} hơn là lên hệ số phản xạ vuông góc R_{vu} , nghiên cứu trước đó đã chỉ ra rằng rằng ở cấu trúc SRR 1 rãnh, độ rộng của rãnh có rất ít ảnh hưởng tới phổ phản xạ cũng như truyền qua của vật liệu [97]. Khi độ rộng của rãnh được tăng lên thì phổ PCR tại vùng tần số nằm giữa đỉnh cộng hưởng thứ nhất và đỉnh cộng hưởng thứ 2 được tăng lên đồng thời tại vùng tần số nằm giữa đỉnh cộng hưởng thứ 2 và đỉnh cộng hưởng thứ 3 thì giá trị PCR có xu hướng hạ thấp dần xuống. Tại giá trị $s = 0,5$ mm thì phổ đạt được sự đồng đều nhất về độ lớn của PCR và duy trì trên 90% trong vùng tần số nằm giữa đỉnh cộng hưởng thứ nhất và đỉnh cộng hưởng thứ ba, cho thấy đây là giá trị cho ra phổ chuyển đổi phân cực tối ưu nhất khi phần trăm chuyển đổi phân cực cao và diễn ra trên dải tần rộng nhất.



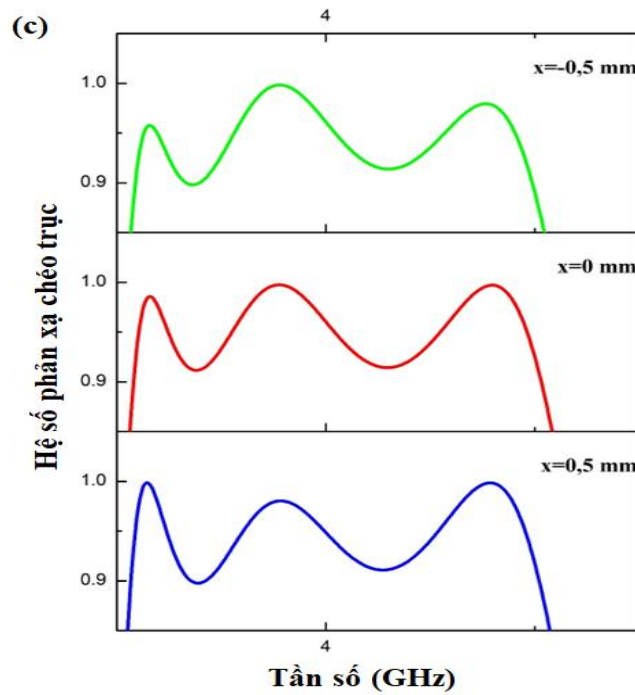
Hình 3.10 Sự phụ thuộc của (a) hệ số phản xạ vuông góc (R_{vu}) và (b) tỷ lệ chuyển đổi phân cực (PCR) vào độ rộng của rãnh trên SRR

Quan sát thấy khi khảo sát phổ phản xạ vuông góc tại 3 vị trí khác nhau của rãnh trên vòng cộng hưởng thì phổ hệ số phản xạ vuông góc R_{vu} và phổ tỷ lệ chuyển đổi phân cực PCR không có sự thay đổi đáng kể (hình 3.11). Điều này có thể được giải thích vì dịch chuyển của rãnh so với vị trí trung tâm ban đầu là quá nhỏ so với kích thước của cấu trúc nên việc thay đổi vị trí của khe rãnh không gây ra quá nhiều thay đổi tới sơ đồ mạch LC tương đương cũng như giá trị tổng trở kháng của mạch.

Tuy nhiên khi lấy cận cảnh vùng tần số nơi diễn ra hiệu ứng chuyển đổi phân cực mạnh mẽ nhất của cả 3 trường hợp khảo sát thì phổ PCR tại giá trị $x = 0$ vẫn cho thấy được sự tối ưu hơn cả khi có tỷ lệ chuyển đổi luôn đạt trên 92% trong vùng tần số 3,1 GHz tới 5 GHz cũng như độ cao của các đỉnh cộng hưởng là đồng đều hơn so với trường hợp khảo sát của 2 giá trị còn lại (hình 3.12).



Hình 3.11 Sự phụ thuộc của (a) hệ số phản xạ vuông góc (R_{vw}) và (b) tỷ lệ chuyển đổi phân cực (PCR) vào độ dịch chuyển của rãnh trên SRR so với vị trí trung tâm ban đầu

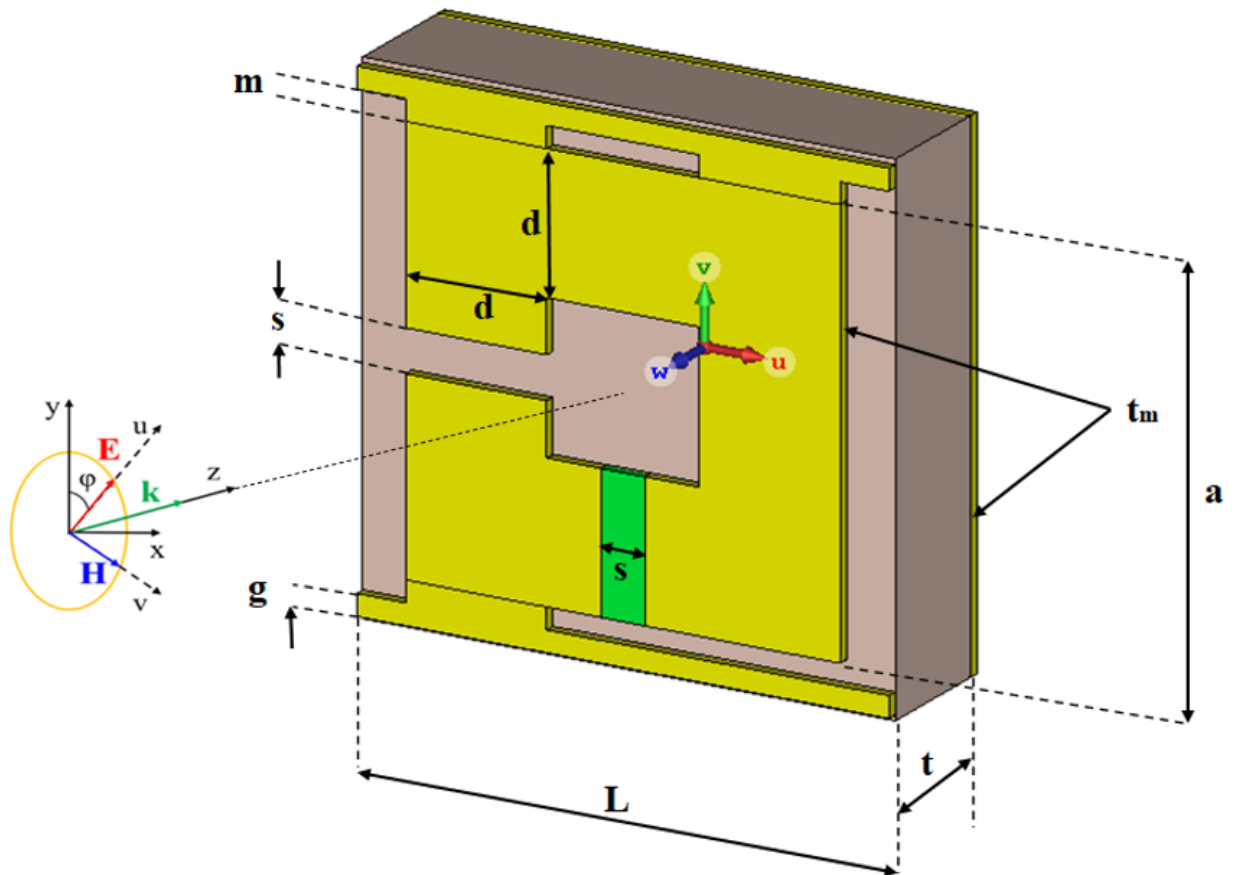


Hình 3.12 Phổ PCR (phóng to) của cấu trúc khảo sát tại 3 giá trị độ dịch chuyển của rãnh khỏi vị trí trung tâm khác nhau

3.2 ĐIỀU KHIỂN ĐẶC TÍNH CHUYỂN ĐỔI PHÂN CỰC BẰNG ĐIỆN ÁP NGOÀI

3.2.1. Cấu trúc đề xuất

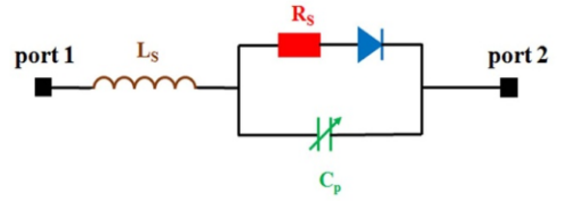
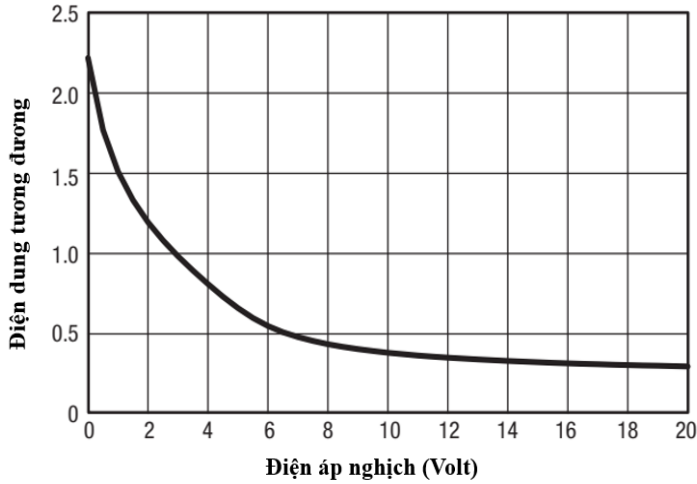
Cấu trúc đề xuất về cơ bản vẫn là cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh đã trình bày ở mục tiêu 1 của luận văn nhằm mục đích đạt được hiệu ứng chuyển đổi phân cực sóng điện từ khi thành phần điện trường của sóng tới phân cực một góc 45° so với trục y , và tích hợp thêm một varactor diode nhằm mục đích thay đổi tính chất mạch LC tương đương của cấu trúc khi cấp vào một điện áp ngược nhằm đạt được hiệu ứng hấp thụ tuyệt đối (PA mode). Để đạt được điều này, chúng tôi đã thiết kế thêm 2 đường “feeding line” để cấp điện từ nguồn ngoài vào cho diode nằm trong cấu trúc (hình 3.13).



Hình 3.13 Mô hình đề xuất của cấu trúc vật liệu biến hóa chuyển đổi giữa 2 chế độ chuyển đổi phân cực và hấp thụ tuyệt đối

Diode mà luận văn sử dụng là diode biến dung SMV2019-079LF được sản xuất bởi Skywork. Mạch điện RLC tương đương và đường đặc trưng C-U

của diode như ở hình 3.14



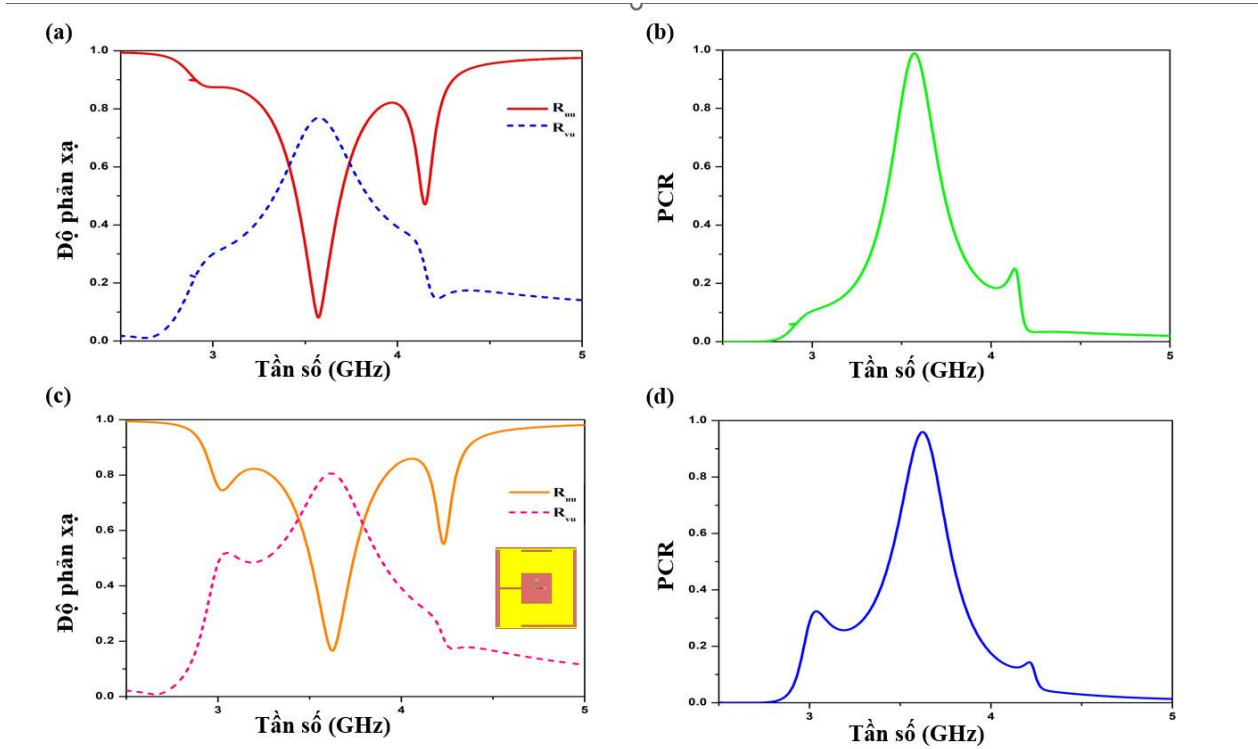
Hình 3.14 Đường đặc trưng C-U của diode SMV 2019-079 LF và sơ đồ mạch điện tương đương của nó [104]

Giá trị cụ thể của bộ tham số cấu trúc đề xuất đề xuất được trình bày trong bảng 3.2:

Tham số	Giá trị	Chú thích
θ	0 độ	Góc tới của sóng điện từ
ϕ	45 độ	Góc phân cực của điện trường
L	24,5 mm	Chiều dài ô cơ sở
t	2,5 mm	Độ dày lớp điện môi
t_m	0,035 mm	Độ dày lớp kim loại
a	22 mm	Kích thước của SRR
d	6,5 mm	Độ rộng vành của SRR
x	0	Độ dịch chuyển của rãnh trên SRR khỏi vị trí trung tâm ban đầu
s	0,5 mm	Độ rộng của rãnh trên SRR

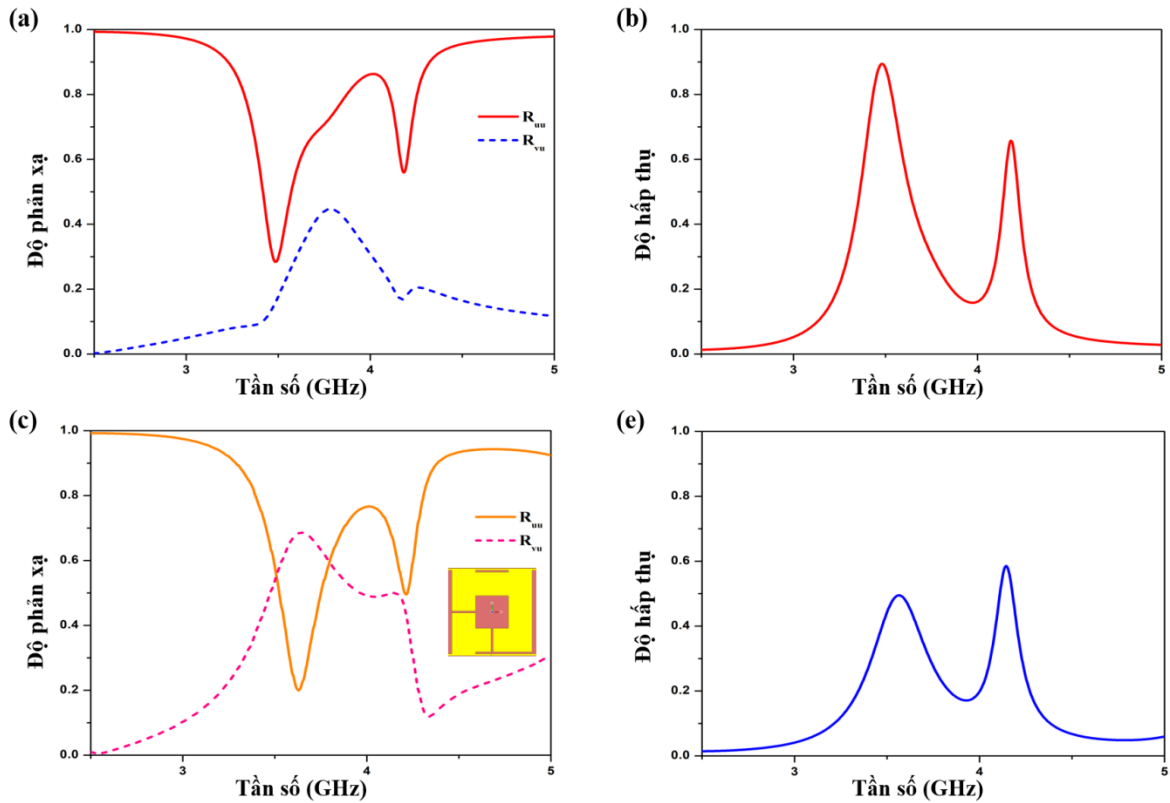
Bảng 3.2 Bảng tham số cấu trúc đề xuất vật liệu biến hóa chuyển đổi chủ động giữa chế độ PC và chế độ PA

3.2.2 Khảo sát sự chuyển đổi giữa đặc tính chuyển đổi phân cực và đặc tính hấp thụ tuyệt đối của cấu trúc đề xuất khi thay đổi điện áp ngoài



Hình 3.15 Hình ảnh (a) phổ tham số phản xạ đồng trục và vuông góc và (b) PCR của cấu trúc khi khảo sát tại điện áp $U=0V$ và (c);(d) các tham số tương ứng của cấu trúc vật liệu biến hóa tương đương có 1 rãnh ở vòng cộng hưởng

Khảo sát trên mô hình cấu trúc đề xuất, khi điện áp ngược đặt vào diode có giá trị là $U = 0 V$, vật liệu hoạt động ở chế độ PC với hệ số phản xạ phân cực vuông góc $R_{vu} = 0,77$, như trên Hình 3.15(a), và tỷ lệ chuyển đổi phân cực PCR đạt 99,7%, như trên Hình 3.15(b), tại tần số $f = 3,61 GHz$. Đối với cấu trúc vật liệu biến hóa tương đương mà không tích hợp diode và có 1 rãnh, phổ tham số phản xạ và PCR là gần như tương tự với phổ của cấu trúc có tích hợp diode khi $R_{vu} = 0,8$, như trên Hình 3.15(c), và PCR đạt 96%, như trên Hình 3.15(d). Kết quả này chứng minh rằng tại điện áp ngược đặt vào $U = 0 V$ thì cấu trúc đề xuất hoạt động tương đương với một cấu trúc vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ có một rãnh ở vòng cộng hưởng, ở đó, phổ hệ số phản xạ đồng trục và vuông góc được tạo ra chủ yếu bởi đặc trưng bất đối xứng của cấu trúc vật liệu biến hóa khi so với phương của điện trường tới.

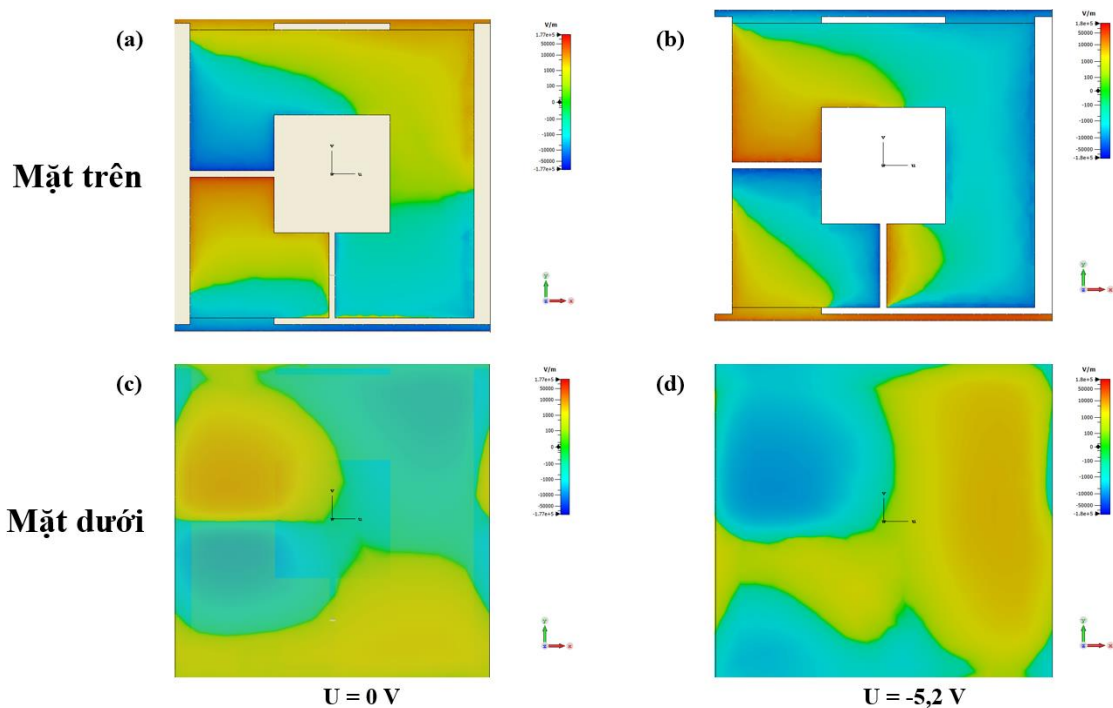


Hình 3.16 Hình ảnh (a) phổ tham số phản xạ đồng trục và vuông góc và (b) PCR của cấu trúc khi khảo sát tại điện áp $U = -5,2V$ và (c)(d) các tham số tương ứng của cấu trúc vật liệu biến hóa tương đương có 2 rãnh ở vòng cộng hưởng

Trên Hình 3.16(a), khi thực hiện khảo sát mô phỏng với điện áp ngược cấp vào diode biến dung là $U = -5,2V$ thì đỉnh phổ hệ số phản xạ phân cực vuông góc R_{vu} và giá trị thấp nhất của phổ phản xạ đồng trục đã không còn nằm tại cùng một tần số như ở trường hợp khảo sát tại $0V$. Điều đó đồng nghĩa với tỷ lệ chuyển đổi phân cực vuông góc PCR đã suy giảm. Trong Hình 3.16(b), có thể quan sát thấy cường độ của đỉnh hấp thụ được tăng cường, đạt tới 90%. Điều này thể hiện rằng khi cấp điện áp vào diode thì mô hình mạch LC tương đương của cấu trúc đã bị thay đổi về mô hình và giá trị trở kháng của vật liệu cũng bị thay đổi, dẫn đến cấu trúc lúc này hoạt động ở chế độ hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ với tỷ lệ hấp thụ cao ở mức 90%.

Ở cấu trúc tương đương như trên Hình 3.16(c), khi vòng cộng hưởng có 2 rãnh nằm vuông góc với nhau thì độ hấp thụ có tăng lên so với cấu trúc 1 rãnh và tần số hấp thụ của cấu trúc tương đương cũng gần như trùng khớp với tần số

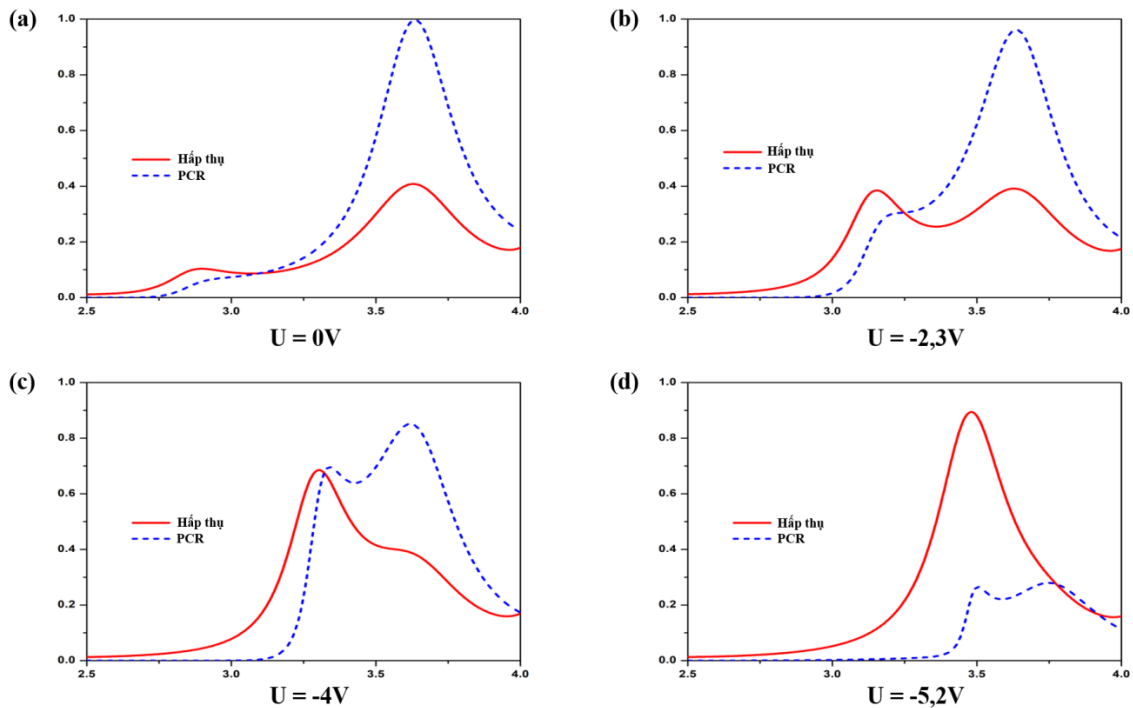
hấp thụ của cấu trúc đề xuất. Tuy nhiên, độ hấp thụ chỉ đạt mức 50%, như trên Hình 3.16(d), và đỉnh của phổ R_{vu} vẫn duy trì giá trị ở mức khá cao xấp xỉ 0,71. Điều đó có thể được lập luận rằng, do thiết kế đường cấp điện của cấu trúc, vật liệu biến hóa tương đương vẫn còn tính bất đối xứng khi có hai rãnh và khiến cho phổ phản xạ đồng trục không thể bị triệt tiêu hoàn toàn. Chỉ khi điện áp được đặt vào diode đã làm thay đổi điện dung của linh kiện ngoại vi này, qua đó tác động mạnh lên cấu trúc cũng như tổng trở của toàn mạch dẫn đến hiệu ứng tương tác sóng điện từ của vật liệu đã bị thay đổi từ đặc tính chuyển đổi đổi phân cực sóng điện từ trở thành hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ.



Hình 3.17 Hình ảnh mô phỏng phân bố điện trường tại bề mặt trên và dưới của cấu trúc tại tần số cộng hưởng $f = 3,48 \text{ GHz}$ và $f = 3,6305 \text{ GHz}$ khi điện áp đặt vào diode tương ứng là (a-c) $U = 0V$ và (b-d) $U = -5,2V$

Sự thay đổi về đặc tính chuyển đổi phân cực và hấp thụ có thể được quan sát thấy rõ qua sự thay đổi về phân bố điện trường ở bề mặt trên và dưới của cấu trúc tại hai chế độ như ở trên Hình 3.17. Dựa vào hình ảnh phân bố điện trường trên 2 mặt của cấu trúc, có thể thấy chiều dòng điện mặt trên và dưới của vật liệu là song song ngược chiều nhau một cách hoàn hảo, điều này chứng tỏ đỉnh cộng hưởng trong cả hai trường hợp chuyển đổi phân cực và hấp thụ tuyệt đối đều

được gây ra bởi hiện tượng cộng hưởng từ. Khi ở chế độ hấp thụ, phân bố điện trường trong vật liệu biến hóa có tính đối xứng theo phương của điện trường tới (phương chéo) và chiều dịch chuyển của điện trường cảm ứng gần như song song với phương này. Trong khi đó, vật liệu biến hóa ở chế độ chuyển đổi phân cực lại có phân bố điện trường bất đối xứng hơn. Các điện trường cảm ứng có xu hướng dịch chuyển theo chiều song song với trục x hoặc trục y .



Hình 3.18 Sự phụ thuộc của phổ hấp thụ và PCR theo điện áp cấp vào diode

Hình 3.18 cho thấy sự biến thiên của phổ hấp thụ cũng như phổ PCR khi điện áp ngược cấp vào diode biến dung thay đổi. Quan sát thấy khi tăng điện áp lên từ từ thì đỉnh chuyển đổi phân cực giảm xuống dần tại vùng tần số 3,63 GHz đồng thời một đỉnh hấp thụ và một đỉnh chuyển đổi phân cực dâng lên dần tại vùng tần số khoảng 3,1 GHz. Tuy nhiên sự tăng lên cùng nhau này chỉ duy trì tới giá trị 70% đối với cả hai phổ, sau đó đỉnh PCR lại giảm độ lớn và đỉnh hấp thụ tiếp tục gia tăng và khiến cấu trúc chuyển dần tính chất trở thành vật liệu hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ với hiệu suất hấp thụ đạt 90% tại tần số 3,48 GHz. Kết quả nghiên cứu cho thấy, cấu trúc vật liệu biến hóa đề xuất sở hữu cả hai cộng hưởng đặc trưng liên quan đến hiệu ứng chuyển đổi phân cực và hiệu ứng hấp

thụ. Bằng cách tối ưu tính bất đối xứng hoặc đối xứng của cấu trúc thông qua thay đổi giá trị của diode bằng điện áp ngoài, vật liệu biến hóa sẽ thể hiện ra tính chất điện từ đặc trưng là chuyển đổi phân cực hoặc hấp thụ sóng điện từ.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Luận văn “*Nghiên cứu hiệu ứng chuyển đổi trạng thái phân cực của sóng điện từ dựa trên vật liệu biến hóa trong vùng tần số GHz*” được thực hiện tại Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

KẾT LUẬN

Các kết quả chính đã thực hiện được trong luận văn được tóm lược như sau:

- Đã đề xuất được mô hình cấu trúc vật liệu biến hóa thực hiện được chuyển đổi phân cực sóng phản xạ với kết quả mô phỏng diễn ra trên dải tần rộng từ 3,08 đến 5,03 GHz, giá trị PCR luôn đạt trên 90% trong dải tần trên và thu được 3 đỉnh hấp thụ tại những tần số 3,18 GHz, 3,775 GHz và 4,795 GHz đạt PCR lần lượt là 97,5%, 99,8% và 99,6% đối, tức là gần như toàn bộ sóng phản xạ đều được chuyển đổi phân cực trở thành phân cực vuông góc so với sóng tới.
- Đã đề xuất được mô hình cấu trúc vật liệu biến hóa có khả năng chuyển đổi chủ động giữa chế độ chuyển đổi phân cực (PC) và chế độ hấp thụ tuyệt đối (PA) thông qua việc tích hợp lên cấu trúc đã đề xuất trước đó một diode biến dung và điều chỉnh điện áp ngược đặt vào diode để thu được hai chế độ hoạt động tương ứng. Ở chế độ PC, tỷ lệ chuyển đổi phân cực đạt 99,7% tại tần số 3,61 GHz và ở chế độ PA, độ hấp thụ đạt 90% tại tần số 3,48 GHz. Nghiên cứu cũng chỉ rõ, hai chế độ PC và PA là hai đặc trưng vốn có của vật liệu biến hóa đề xuất. Bằng cách tối ưu tính đối xứng của vật liệu thông qua điều khiển giá trị của diode, đặc trưng PC hoặc PA có thể được biểu hiện ra theo mong muốn.

KIẾN NGHỊ

Việc nghiên cứu tối ưu hiệu ứng chuyển đổi phân cực trên dải rộng nói chung và của vật liệu biến hóa nói riêng là một hướng nghiên cứu tiềm năng, có tính ứng dụng cao trong nhiều lĩnh vực đặc biệt là trong lĩnh vực giao tiếp truyền tín hiệu thông tin từ xa ứng dụng mạnh mẽ trong quân sự. Kết quả nghiên cứu của đề tài luận văn cũng đóng góp vào quá trình nghiên cứu mà mở ra hướng

nghiên cứu sau này thông qua việc cấu trúc hóa vật liệu biến hóa để đạt được sự tối ưu trong đặc tính chuyển đổi phân cực của vật liệu.

Bên cạnh đó, việc đề xuất một mô hình có khả năng chuyển đổi chủ động giữa hai chế độ hoạt động cơ bản là chuyển đổi phân cực và hấp thụ của vật liệu biến hóa cũng sẽ đóng góp rất lớn cho các lĩnh vực đặc thù yêu cầu sự tích hợp đa chế độ trên thiết bị thu phát thông tin, đặc biệt là trong lĩnh vực quân sự. Thông qua nghiên cứu bước đầu này, học viên sẽ tiếp tục hoàn thiện và kiểm chứng vật liệu biến hóa đề xuất bằng thực nghiệm trong thời gian tới. Kết quả nghiên cứu của luận án cũng là nền tảng để tiếp tục phát triển các vật liệu biến hóa có khả năng chuyển đổi chủ động giữa hai chế độ chuyển đổi phân cực và hấp thụ không chỉ trong dải tần số hẹp mà còn trên cả một dải tần số rộng. Nhờ đó, vật liệu sẽ có khả năng ứng dụng cao hơn trong thực tế.

**DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CÓ LIÊN QUAN
ĐẾN HƯỚNG NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN VĂN**

Nguyen Van Ngoc, Nguyen Thi Hien, Duong Thi Ha, Bui Son Tung, **Bui Xuan Son Hai**, Vu Dinh Lam & Bui Xuan Khuyen, *A Rectangle-quartet Metamaterial for Dual-band Perfect Absorption in the Visible Region*. Communications in Physics, 2022. **32**(2): p. 169.

HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

- Triển khai chế tạo mẫu dựa trên tham số cấu trúc đã mô phỏng trong luận văn kết hợp khảo sát đo đạc để có được kết quả toàn diện trên cả hai phương diện mô phỏng và thực nghiệm. Qua đó dự kiến công bố nghiên cứu trên các tạp chí khoa học trong nước cũng như quốc tế.
- Tiếp tục mô phỏng tối ưu hóa bề dày lớp điện môi ở cấu trúc vật liệu MM chuyển đổi phân cực sóng điện từ trên dải tần rộng thông qua cấu trúc hóa mô hình nhằm đáp ứng tính dễ dàng hơn trong công tác chế tạo mẫu thực nghiệm.
- Thực hiện khảo sát mô phỏng cũng như đo đạc thực nghiệm trên các dòng diode khác nhau để tối ưu nhất có thể độ hấp thụ ở chế độ PA của cấu trúc vật liệu biến hóa tích hợp diode biến dung.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Smith, D.R., et al., *Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity*. Physical Review Letters, 2000. **84**(18): p. 4184.
2. Shalaev, V.M., *Optical negative-index metamaterials*. Nature photonics, 2007. **1**(1): p. 41-48.
3. Thuy, V., et al., *Highly dispersive transparency in coupled metamaterials*. Journal of Optics, 2010. **12**(11): p. 115102.
4. Mousavi, S.H., et al., *Gyromagnetically induced transparency of metasurfaces*. Physical Review Letters, 2014. **112**(11): p. 117402.
5. Pendry, J.B., *Negative refraction makes a perfect lens*. Physical review letters, 2000. **85**(18): p. 3966.
6. Fang, N., et al., *Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens*. Science, 2005. **308**(5721): p. 534-537.
7. Schurig, D., et al., *Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies*. Science, 2006. **314**(5801): p. 977-980.
8. Pawlik, G., et al., *Infrared cylindrical cloak in nanosphere dispersed liquid crystal metamaterial*. Optics Letters, 2012. **37**(11): p. 1847-1849.
9. Chen, H.-T., et al., *Ultrafast optical switching of terahertz metamaterials fabricated on ErAs/GaAs nanoisland superlattices*. Optics Letters, 2007. **32**(12): p. 1620-1622.
10. Baqir, M., et al., *Graphene-over-graphite-based metamaterial structure as optical filter in the visible regime*. Optik, 2019. **180**: p. 832-839.
11. Tung S. Bui, Thang D. Dao, Luu H. Dang, Lam D. Vu, Akihiko Ohi, Toshihide Nabatame, YoungPak Lee, Tadaaki Nagao & Chung V. Hoang, *Metamaterial-enhanced vibrational absorption spectroscopy for the detection of protein molecules*. Scientific Reports, 2016. **6**(1): p. 1-7.
12. Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Young Joon Yoo, Joo Yull

- Rhee, Ki Won Kim, Vu Dinh Lam and Young Pak Lee, *Reversibly-propagational metamaterial absorber for sensing application*. Modern Physics Letters B, 2018. **32**(04): p. 1850044.
13. Liu, N., et al., *Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor*. Nano Letters, 2010. **10**(7): p. 2342-2348.
 14. Hedayati, M.K., et al., *Design of a perfect black absorber at visible frequencies using plasmonic metamaterials*. Advanced Materials, 2011. **23**(45): p. 5410-5414.
 15. Bagmanci, M., et al., *Solar energy harvesting with ultra-broadband metamaterial absorber*. International Journal of Modern Physics B, 2019. **33**(08): p. 1950056.
 16. Sun, K., et al., *An overview of metamaterials and their achievements in wireless power transfer*. Journal of Materials Chemistry C, 2018. **6**(12): p. 2925-2943.
 17. Huu Nguyen Bui, Thanh Son Pham, Jie-Seok Kim, Jong-Wook Lee, *Field-focused reconfigurable magnetic metamaterial for wireless power transfer and propulsion of an untethered microrobot*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020. **494**: p. 165778.
 18. Li, W. and J. Valentine, *Metamaterial perfect absorber based hot electron photodetection*. Nano letters, 2014. **14**(6): p. 3510-3514.
 19. Kim, J., K. Han, and J.W. Hahn, *Selective dual-band metamaterial perfect absorber for infrared stealth technology*. Scientific Reports, 2017. **7**(1): p. 1-9.
 20. Landy, N.I., et al., *Perfect metamaterial absorber*. Physical Review Letters, 2008. **100**(20): p. 207402.
 21. Khan, M.I., Q. Fraz, and F.A. Tahir, *Ultra-wideband cross polarization conversion metasurface insensitive to incidence angle*. Journal of Applied Physics, 2017. **121**(4): p. 045103.
 22. Tuan, T.S., V.D. Lam, and N.T.Q. Hoa, *Simple design of a copolarization wideband metamaterial absorber for C-band applications*.

Journal of Electronic Materials, 2019. **48**(8): p. 5018-5027.

23. Mookiah, P. and K.R. Dandekar, *Metamaterial-substrate antenna array for MIMO communication system*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009. **57**(10): p. 3283-3292.
24. Glybovski, S.B., et al., *Metasurfaces: From microwaves to visible*. Physics Reports, 2016. **634**: p. 1-72.
25. Bui Xuan Khuyen, Bui Son Tung, Young Joon Yoo, Young Ju Kim, Ki Won Kim, Liang-Yao Chen, Vu Dinh Lam & Young Pak Lee, *Miniaturization for ultrathin metamaterial perfect absorber in the VHF band*. Scientific Reports, 2017. **7**(1): p. 1-7.
26. Kim, Y.J., et al., *Ultrathin microwave metamaterial absorber utilizing embedded resistors*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017. **50**(40): p. 405110.
27. Grady, N.K., et al., *Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction*. Science, 2013. **340**(6138): p. 1304-1307.
28. Pfeiffer, C., et al., *High performance bianisotropic metasurfaces: asymmetric transmission of light*. Physical review letters, 2014. **113**(2): p. 023902.
29. Pendry, J.B., et al., *Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures*. Physical Review Letters, 1996. **76**(25): p. 4773.
30. Pendry, J.B., et al., *Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena*. IEEE Transactions on Microwave Theory and techniques, 1999. **47**(11): p. 2075-2084.
31. Zhang, Y., et al., *A flexible metamaterial absorber with four bands and two resonators*. Journal of Alloys and Compounds, 2017. **705**: p. 262-268.
32. Wang, W., et al., *Experimental demonstration of an ultra-flexible metamaterial absorber and its application in sensing*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017. **50**(13): p. 135108.

33. Liu, X., et al., *Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters*. Physical Review Letters, 2011. **107**(4): p. 045901.
34. Yagitani, S., et al., *Imaging radio-frequency power distributions by an EBG absorber*. IEICE Transactions on Communications, 2011. **94**(8): p. 2306-2315.
35. Costa, F., S. Genovesi, and A. Monorchio, *A chipless RFID based on multiresonant high-impedance surfaces*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012. **61**(1): p. 146-153.
36. Costa, F., et al., *Low-cost metamaterial absorbers for sub-GHz wireless systems*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013. **13**: p. 27-30.
37. Yoo, Y., et al., *Flexible and elastic metamaterial absorber for low frequency, based on small-size unit cell*. Applied Physics Letters, 2014. **105**(4): p. 041902.
38. Hossain, M.B., et al., *Modified Coptic Cross Shaped Split-Ring Resonator Based Negative Permittivity Metamaterial for Quad Band Satellite Applications with High Effective Medium Ratio*. 2022. **15**(9): p. 3389.
39. Hamonangan, F.R., et al., *Using Hand Painting in the Fabrication of a Negative Refractive Index Metamaterial Based on Circular Shape with Paper as the Dielectric*. 2022.
40. BOURAS, K., A. LABIAD, and M. BOUZOUAD, *Multiband Metamaterial Absorber with a Negative Permeability*.
41. Ziolkowski, R.W., *Pulsed and CW Gaussian beam interactions with double negative metamaterial slabs*. Optics Express, 2003. **11**(7): p. 662-681.
42. Chen, J., et al., *Observation of the inverse Doppler effect in negative-index materials at optical frequencies*. Nature Photonics, 2011. **5**(4): p. 239-242.

43. Tommila, J., et al., *Moth-eye antireflection coating fabricated by nanoimprint lithography on 1 eV dilute nitride solar cell*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2013. **21**(5): p. 1158-1162.
44. Simovski, C.R., et al., *Wire metamaterials: physics and applications*. Advanced Materials, 2012. **24**(31): p. 4229-4248.
45. Fang, N. and X. Zhang. *Imaging properties of a metamaterial superlens*. in *Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Nanotechnology*. 2002. IEEE.
46. Liang, J., et al., *Multiband-switchability and high-absorptivity of a metamaterial perfect absorber based on a plasmonic resonant structure in the near-infrared region*. 2022. **12**(48): p. 30871-30878.
47. Wu, S., et al., *Enhanced rotation of the polarization of a light beam transmitted through a silver film with an array of perforated S-shaped holes*. Physical review letters, 2013. **110**(20): p. 207401.
48. Prakash, D. and N. Gupta, *Applications of metamaterial sensors: a review*. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2021: p. 1-15.
49. Rufangura, P. and C. Sabah, *Perfect metamaterial absorber for applications in sustainable and high-efficiency solar cells*. Journal of Nanophotonics, 2018. **12**(2): p. 026002.
50. Watts, C.M., X. Liu, and W.J. Padilla, *Metamaterial electromagnetic wave absorbers*. Advanced materials, 2012. **24**(23): p. OP98-OP120.
51. Majeed, A., et al., *A high-efficiency dual-band linear-to-circular polarization converter based on rectangular-slot reflective metasurface*. 2022. **12**(18): p. 9172.
52. Habashi, A., et al., *A dual-broadband h-shaped metasurface for cross-polarization and asymmetric transmission with high stable incidence angle*. 2022. **143**: p. 154021.
53. Deng, G., et al., *A miniaturized and wide-angle 3D metamaterial*

for reflective polarization conversion. 2022. **133**: p. 113017.

54. Markovich, D.L., et al., *Metamaterial polarization converter analysis: limits of performance*. 2013. **112**(2): p. 143-152.

55. Nguyen, T.K.T., et al., *Simple design of efficient broadband multifunctional polarization converter for X-band applications*. 2021. **11**(1): p. 1-12.

56. Ozturk, G. and M.F.J.O.C. Corapsiz, *Ultra-thin reflective linear and circular polarization converter for Ku band applications*. 2022. **516**: p. 128268.

57. Tutar, F. and G.J.O.M. Ozturk, *An effective metasurface-based linear and circular polarization converter for C-and X-band applications*. 2022. **128**: p. 112355.

58. Masson, J.-B. and G. Gallot, *Terahertz achromatic quarter-wave plate*. Optics letters, 2006. **31**(2): p. 265-267.

59. Chen, C.-Y., et al., *Room temperature terahertz phase shifter based on magnetically controlled birefringence in liquid crystals*. Applied physics letters, 2003. **83**(22): p. 4497-4499.

60. Xu, H.-X., et al., *Dual-mode transmissive metasurface and its applications in multibeam transmitarray*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017. **65**(4): p. 1797-1806.

61. Shi, J., et al., *Dual-band asymmetric transmission of linear polarization in bilayered chiral metamaterial*. Applied Physics Letters, 2013. **102**(19): p. 191905.

62. Mei, Z.L., et al., *High-efficiency and wide-bandwidth linear polarization converter based on double U-shaped metasurface*. AIP Advances, 2017. **7**(12): p. 125323.

63. Ahmad, T., et al., *Ultrawideband Cross-Polarization Converter Using Anisotropic Reflective Metasurface*. 2022. **11**(3): p. 487.

64. Khan, B., et al., *Asymmetric polarization converting metasurface for microwave applications*. 2022. **12**(9): p. 3403-3415.

65. Agarwal, M.J.O., *Cross-polar reflective linear polarization rotator using anisotropic ultrathin metamaterial*. 2022. **260**: p. 169121.
66. Li, Z., et al., *High performance broadband asymmetric polarization conversion due to polarization-dependent reflection*. *Plasmonics*, 2015. **10**(6): p. 1703-1711.
67. Nguyen, T.M., et al., *Ultra-Wideband and Lightweight Electromagnetic Polarization Converter Based on Multiresonant Metasurface*. 2022. **10**: p. 92097-92104.
68. Singh, R., et al., *Terahertz metamaterial with asymmetric transmission*. *Physical Review B*, 2009. **80**(15): p. 153104.
69. Cheng, Y.Z., et al., *Broadband transparent metamaterial linear polarization transformer based on triple-split-ring resonators*. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2013. **27**(14): p. 1850-1858.
70. Qin, Z., et al., *Polarization meta-converter for dynamic polarization states shifting with broadband characteristic*. 2022. **30**(11): p. 20014-20025.
71. Ren, Z., et al., *Ultra-Broadband RCS Reduction Based on Optimized Coding "Whale-Shaped" Polarization Conversion Metasurface With Angular Stability*. 2022. **10**: p. 50479-50486.
72. Li, L., Y. Yang, and C. Liang, *A wide-angle polarization-insensitive ultra-thin metamaterial absorber with three resonant modes*. *Journal of Applied Physics*, 2011. **110**(6): p. 063702.
73. Shi, Y., et al., *Design of broadband metamaterial-based ferromagnetic absorber*. *Mater. Sci.*, 2018. **2**(2): p. 1-7.
74. Zhang, L., et al., *Broadband transparent absorber based on indium tin oxide-polyethylene terephthalate film*. *IEEE Access*, 2019. **7**: p. 137848-137855.
75. Shi, Y., et al., *A design of ultra-broadband metamaterial absorber*. *Waves in Random and Complex Media*, 2017. **27**(2): p. 381-391.
76. Paquay, M., et al., *Thin AMC structure for radar cross-section*

reduction. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007. **55**(12): p. 3630-3638.

77. Shi, Y., H.X. Meng, and H.J. Wang, *Polarization conversion metasurface design based on characteristic mode rotation and its application into wideband and miniature antennas with a low radar cross section*. Optics Express, 2021. **29**(5): p. 6794-6809.

78. Chen, W., C.A. Balanis, and C.R. Birtcher, *Checkerboard EBG surfaces for wideband radar cross section reduction*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015. **63**(6): p. 2636-2645.

79. Shi, Y., et al., *Characteristic mode cancellation method and its application for antenna RCS reduction*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019. **18**(9): p. 1784-1788.

80. Jia, Y., et al., *A dual-patch polarization rotation reflective surface and its application to ultra-wideband RCS reduction*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017. **65**(6): p. 3291-3295.

81. Zaker, R. and A. Sadeghzadeh, *A low-profile design of polarization rotation reflective surface for wideband RCS reduction*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019. **18**(9): p. 1794-1798.

82. Lu, Y., et al., *Ultrawideband monostatic and bistatic RCS reductions for both copolarization and cross polarization based on polarization conversion and destructive interference*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019. **67**(7): p. 4936-4941.

83. Liu, Y., et al., *Wideband RCS reduction of a slot array antenna using polarization conversion metasurfaces*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015. **64**(1): p. 326-331.

84. Sun, S., et al., *Ultrawideband high-efficiency 2.5-dimensional polarization conversion metasurface and its application in RCS reduction of antenna*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019. **18**(5): p. 881-885.

85. Zhu, N., R.W. Ziolkowski, and H. Xin, *A metamaterial-inspired,*

electrically small rectenna for high-efficiency, low power harvesting and scavenging at the global positioning system L1 frequency. Applied Physics Letters, 2011. **99**(11): p. 114101.

86. Xu, H.-X., et al., *A metamaterial antenna with frequency-scanning omnidirectional radiation patterns.* Applied Physics Letters, 2012. **101**(17): p. 173501.

87. Germain, D., et al., *Phase-compensated metasurface for a conformal microwave antenna.* Applied Physics Letters, 2013. **103**(12): p. 124102.

88. Pushpakaran, S.V., et al., *An experimental verification of metamaterial coupled enhanced transmission for antenna applications.* Applied Physics Letters, 2014. **104**(6): p. 064102.

89. Papari, G. and A. Andreone, *Equivalent model for the phase dynamics of a metamaterial inspired patch antenna.* Journal of Applied Physics, 2016. **119**(8): p. 084505.

90. Liu, W., Z.N. Chen, and X. Qing, *60-GHz thin broadband high-gain LTCC metamaterial-mushroom antenna array.* IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014. **62**(9): p. 4592-4601.

91. Liu, W., et al., *Realization of broadband cross-polarization conversion in transmission mode in the terahertz region using a single-layer metasurface.* Optics letters, 2015. **40**(13): p. 3185-3188.

92. Zhu, H., et al., *Linear-to-circular polarization conversion using metasurface.* IEEE transactions on antennas and propagation, 2013. **61**(9): p. 4615-4623.

93. Wu, Z., et al., *Metasurface superstrate antenna with wideband circular polarization for satellite communication application.* IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015. **15**: p. 374-377.

94. Huang, Y., et al., *Polarization conversion of metasurface for the application of wide band low-profile circular polarization slot antenna.* 2016. **109**(5): p. 054101.

95. Weiland, T., *A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields*. *Archiv Elektronik und Uebertragungstechnik*, 1977. **31**: p. 116-120.
96. Sun, X., et al., *Reconfigurable broadband polarisation conversion metasurface based on VO₂*. 2022. **50**: p. 101012.
97. Aydin, K., et al., *Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonator parameters and designs*. 2005. **7**(1): p. 168.
98. Sauviac, B., C.R. Simovski, and S.A.J.E. Tretyakov, *Double split-ring resonators: Analytical modeling and numerical simulations*. 2004. **24**(5): p. 317-338.
99. Zhu, Y., et al., *Independently tunable all-dielectric synthetic multi-spectral metamaterials based on Mie resonance*. 2022. **12**(32): p. 20765-20770.
100. Hasan, M., M. Faruque, and M.J.B.o.t.P.A.o.S.T.S. Islam, *Parametric studies on split S-shaped composite meta atom for X-band communication*. 2017(4).
101. Sebastian, A., et al., *Complex permittivity measurement technique using metamaterial broadside coupled split ring resonator*. 2022. **132**(10): p. 105104.
102. Xie, Y., et al., *Polarization-insensitive dielectric metamaterial absorber for near-unity UV-light trapping in monolayer graphene*. 2022. **503**: p. 127459.
103. Hengbo, X.J.O.M., *Design, simulation, and measurement of a multiband tunable metamaterial filter*. 2022. **127**: p. 112253.
104. Skyworks Data Sheet, Skyworks Solutions, Inc., available at <https://www.skyworksinc.com/en/Products/Diodes/SMV2019-Series>