

**ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC**

NGUYỄN THỊ HƯƠNG

**NGHIÊN CỨU SỰ CỘNG HƯỞNG TỪ BẬC CAO ĐỂ TẠO RA
CHIẾT SUẤT ÂM TRONG CẤU TRÚC CẶP ĐĨA DỰA
TRÊN SIÊU VẬT LIỆU**

Chuyên ngành: Quang học

Mã số: 8440110

LUẬN VĂN THẠC SĨ VẬT LÝ

Người hướng dẫn khoa học: TS. Nguyễn Thị Hiền

THÁI NGUYÊN - 2019

LỜI CẢM ƠN

Em xin bày tỏ lòng cảm ơn sâu sắc tới cô giáo TS. Nguyễn Thị Hiền - Khoa Vật lý và Công nghệ - Trường Đại học Khoa học Thái Nguyên đã hướng dẫn, chỉ bảo hết sức tận tình, trách nhiệm để em có thể hoàn thành luận văn tốt nghiệp này.

Em xin gửi lời cảm ơn tới các thầy, cô giáo trong Khoa Vật lý và Công nghệ - Trường Đại học Khoa học Thái Nguyên - những người đã trang bị cho em những kiến thức quý báu trong thời gian em học tập, nghiên cứu tại trường.

Để thực hiện đề tài này, em xin cảm ơn sự hỗ trợ kinh phí từ đề tài nafosted “Chế tạo và nghiên cứu siêu vật liệu đa dải tần dựa trên các mô hình tương tác”, mã số: 103.99-2018.35

Cuối cùng, em xin gửi lời cảm ơn chân thành đến bạn bè, người thân - những người luôn bên cạnh động viên, giúp đỡ trong thời gian em học tập và thực hiện luận văn tốt nghiệp này.

Thái Nguyên, tháng 09 năm 2018

Học viên

Nguyễn Thị Hương

MỤC LỤC

LỜI CẢM ƠN	i
MỤC LỤC	ii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VIẾT TẮT	iv
DANH MỤC CÁC HÌNH	v
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ SIÊU VẬT LIỆU	3
1.1. Giới thiệu chung về siêu vật liệu.....	3
1.2. Tổng quan về siêu vật liệu có chiết suất âm	5
1.2.1. Vật liệu có độ điện thẩm âm	8
1.2.2. Vật liệu có độ từ thẩm âm	9
1.2.3. Siêu vật liệu có chiết suất âm đơn và kép	13
1.3. Phương pháp xác định cộng hưởng điện và cộng hưởng từ trong cấu trúc cặp dây bị cắt.....	16
1.4. Một số phương pháp để tạo ra vật liệu có chiết suất âm.....	21
1.4.1. Phương pháp tạo vật liệu có chiết suất âm của Kante	21
1.4.2. Phương pháp dựa trên cộng hưởng bậc cao	22
1.4.3. Siêu vật liệu có chiết suất âm dựa trên cấu trúc kết hợp và cấu trúc lưới cá.....	25
CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	30
2.1. Lựa chọn cấu trúc và vật liệu	30
2.2. Phương pháp tính toán	32
2.2.1. Phương pháp tính toán dựa trên mô hình mạch LC ứng với cấu trúc cặp đĩa	32
2.2.2. Phương pháp tính toán dựa trên thuật toán của Chen	33
2.3. Phương pháp mô phỏng	34
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN	38

3.1. Nghiên cứu sử dụng cộng hưởng bậc cao để tạo ra chiết suất âm trong cấu trúc cặp đĩa ở vùng GHz.....	39
3.1.1. Nghiên cứu ảnh hưởng của phân cực sóng điện từ đến vùng chiết suất âm được tạo ra	44
3.1.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số cấu trúc đến vùng chiết suất âm được tạo ra.....	45
3.1.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của tổn hao điện môi và tổn hao ohmic đến vùng chiết suất âm được tạo ra.....	49
3.2. Nghiên cứu sử dụng cộng hưởng bậc cao để tạo ra chiết suất âm trong cấu trúc cặp đĩa ở vùng quang học.....	51
KẾT LUẬN	54
HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO	55
CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ	56
TÀI LIỆU THAM KHẢO	57

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VIẾT TẮT

Ký hiệu	Tên đầy đủ	Tên Tiếng Việt
SRR	Split - Ring Resonator	Vòng cộng hưởng
CW	Cut - Wire	Dây kim loại bị cắt
CWP	Cut - Wire Pair	Cặp dây bị cắt
Meta	Metamaterial	Siêu vật liệu
LH	Left - Handed	Quy tắc bàn tay trái
RH	Right - Handed	Quy tắc bàn tay phải
LHMs	Left - Handed	Vật liệu tuân theo quy tắc bàn tay trái
<i>FOM</i>	figure of merit	Hệ số phẩm chất
FN	fishnet	Cấu trúc dạng lưới cá
DP	dish pair	Cặp đĩa tròn
DN	dishnet	Lưới đĩa
CST	Computer Simulation Technology	Phần mềm mô phỏng

DANH MỤC CÁC HÌNH

- Hình 1.1. Hình ảnh so sánh giữa cấu trúc vật liệu truyền thống và siêu vật liệu 3
- Hình 1.2. Nguyên tắc hoạt động của siêu thấu kính dựa trên siêu vật liệu có chiết suất âm, nó hoạt động như một thấu kính hội tụ và có khả năng khôi phục không chỉ thành phần truyền qua mà cả thành phần dập tắt nên độ phân giải tăng lên rất nhiều so với thấu kính thông thường 4
- Hình 1.3. Nguyên lý hoạt động của áo choàng tàng hình, nhờ cách sắp xếp các lớp siêu vật liệu có chiết suất khác nhau (hình a) một cách hợp lý xung quanh vật thể cần giấu, ánh sáng có thể bị bẻ cong không phản xạ (hình b) vì vậy vật thể được “tàng hình” 5
- Hình 1.4. Biểu đồ biểu diễn mối liên hệ giữa ϵ và μ 6
- Hình 1.5 a) Vật liệu có chiết suất âm hoạt động ở tần số GHz; b) Phổ phản xạ và truyền qua của vật liệu có cấu trúc ở hình (a). Tính chất chiết suất âm ($n < 0$) của vật liệu thể hiện ở vùng tần số 4.7 đến 5.2 GHz..... 7
- Hình 1.6. (a) Cấu trúc lưới dây kim loại mỏng sắp xếp tuần hoàn và (b) độ thâm hiệu dụng của lưới dây bạc theo tần số với $r = 5 \mu\text{m}$, $a = 40 \text{ mm}$ và độ dẫn của bạc là $\sigma = 6,3 \times 10^7 \text{ Sm}^{-1}$ 9
- Hình 1.7. Sơ đồ cấu trúc của vòng cộng hưởng có rãnh (Split Ring Resonator – SRR) và các cấu trúc SRR trong dãy tuần hoàn 10
- Hình 1.8. Nguyên lý hoạt động của SRR để tạo ra $\mu < 0$ 11
- Hình 1.9. Dạng tổng quát của độ từ thâm hiệu dụng cho mô hình SRR với giả thiết là vật liệu không có tổn hao 12
- Hình 1.10. a) Cấu trúc SRR và phân cực của sóng điện từ, b) Sự biến đổi từ cấu trúc SRR thành cấu trúc cặp dây bị cắt (cut-wire pair - CWP)..... 12

Hình 1.11. a) Cấu trúc SRR; cấu trúc dây kim loại bị cắt (CW), định hướng của điện trường ngoài, b) Mô hình mạch điện LC tương đương.	13
Hình 1.12. Giản đồ giải thích phần thực âm của chiết suất. Các mũi tên cho thấy vị trí của độ điện thẩm ϵ và độ từ thẩm μ trong mặt phẳng phức.	13
Hình 1.13. a) Ô cơ sở của cấu trúc CWP; b) Phổ truyền qua của cấu trúc CWP và cấu trúc CWP nối tắt.....	17
Hình 1.14. Cấu trúc nối tắt của cặp dây bị cắt.	17
Hình 1.15. Sự phụ thuộc của độ từ thẩm vào tần số.	18
Hình 1.16. Mô hình phân bố dòng điện tại tần số cộng hưởng từ và cộng hưởng điện của cấu trúc CWP.....	19
Hình 1.17. (a) Cấu trúc đơn lớp CWP. (b) Ô cơ sở tương ứng.....	20
Hình 1.18. (a), (b) Mạch điện LC tương ứng của cấu trúc CWP. Ở đó đốm 1 và 2 là tương đương nhau do tính tuần hoàn của cấu trúc. (c), (d) Mạch điện tương ứng với trường hợp cộng hưởng từ và cộng hưởng điện.	20
Hình 1.19. a) Cấu trúc bất đối xứng của cặp dây bị cắt, b) Giản đồ lai hoá tương ứng.	22
Hình 1.20. Từ trái sang phải lần lượt là kết quả mô phỏng và thực nghiệm phổ truyền qua, phản xạ, phần thực của chiết suất và phần ảo của chiết suất.....	22
Hình 1.21. Giản đồ lai hóa của cấu trúc do nhóm Soukoulis đề [18] có thể tạo ra chiết suất âm $n < 0$ do sự chồng chập của mode bất đối xứng bậc nhất với mode đối xứng bậc hai.	23
Hình 1.22. Phổ truyền qua mô phỏng của cấu trúc CWP và nối tắt CWP.	24
Hình 1.23. a) Ô cơ sở và b) mẫu chế tạo tương ứng theo công nghệ mạch in điện tử của cấu trúc CB.....	25

Hình 1.24. a) Phổ truyền qua thực nghiệm và b) mô phỏng của cấu trúc CWP, CB và các dây kim loại liên tục. c) Độ điện thẩm, độ từ thẩm và chiết suất từ dữ liệu mô phỏng của cấu trúc CB tương ứng	27
Hình 1.25. (a) Ô cơ sở và (b) mẫu chế tạo của siêu vật liệu chiết suất âm sử dụng cấu trúc FN.	28
Hình 1.26. (a) Phổ truyền qua thực nghiệm và mô phỏng của cấu trúc CB và FN, Kết quả tính toán phần thực của (b) độ điện thẩm, (c) độ từ thẩm (d) chiết suất và (e) hệ số phẩm chất FOM cho thấy cấu trúc FN có ưu điểm hơn cấu trúc CB.....	29
Hình 2.1. Quá trình biến đổi siêu vật liệu từ cấu trúc SRR sang CWP và đến DP.	30
Hình 2.2. Ô cơ sở của cấu trúc cặp đĩa và phân cực của sóng điện từ.....	31
Hình 2.3. a) Ô cơ sở của siêu vật liệu có cấu trúc đĩa, gồm 3 lớp: hai lớp kim loại hai bên và lớp điện môi ở giữa, b) mạch tương đương LC của cấu trúc.....	32
Hình 2.4. Giao diện mô phỏng CST.....	36
Hình 2.5. Mô phỏng: (a) phân bố dòng điện mặt bên, (b) dòng mặt trước, dòng mặt sau năng lượng trên đĩa tròn, (c) phân bố năng lượng điện.....	36
Hình 3.1. a) Ô cơ sở của cấu trúc cặp đĩa. b) Phổ truyền qua mô phỏng của cấu trúc cặp đĩa và nối tắt cặp đĩa.....	40
Hình 3.2. (a), (b), (c) Phân bố dòng tại các tần số cộng hưởng và (d), (e), (f) phân bố năng lượng từ tại tần số cộng hưởng thứ nhất ($f = 22$ GHz) và thứ ba ($f = 49,64$ GHz) và phân bố năng lượng điện tại tần số cộng hưởng thứ hai ($f = 45,9$ GHz).	41
Hình 3.3. Phần thực của các tham số hiệu dụng trường điện từ (a) độ từ thẩm quanh vùng tần số 22 GHz (b) độ điện thẩm quanh vùng	

tần số 45,9 GHz và (c) độ từ thẩm, điện thẩm và chiết suất quanh vùng tần số 49,64 GHz.(d)Giản đồ pha xung quanh vùng cộng hưởng thứ ba (tần số 49,64 GHz).....	43
Hình 3.4. Ảnh hưởng của phân cực sóng điện từ đến phổ truyền qua của cấu trúc cặp đĩa.....	44
Hình 3.5. Ảnh hưởng của bán kính đĩa đến phổ truyền qua của cấu trúc cặp đĩa (a) quanh vùng tần số 22 GHz (b) quanh vùng tần số 45.9GHz và 49.64 GHz (c) phần thực chiết suất	46
Hình 3.6. Ảnh hưởng của hằng số mạng a_x của cấu trúc cặp đĩa đến phổ truyền (a) quanh vùng tần số 22 GHz (b) quanh vùng tần số 45.9GHz và 49.64 GHz và (c) phần thực của chiết suất.....	47
Hình 3.7. Ảnh hưởng của hằng số mạng a_y của cấu trúc cặp đĩa đến phổ truyền (a) quanh vùng tần số 22 GHz (b) quanh vùng tần số 45.9GHz và 49.64 GHz và (c) phần thực của chiết suất.....	48
Hình 3.8. Ảnh hưởng của tổn hao điện môi của cấu trúc cặp đĩa đến phổ truyền (a) quanh vùng tần số 22 GHz (b) quanh vùng tần số 45.9 GHz và 49.64 GHz. (c) Ảnh hưởng của vật liệu kim loại đến phổ truyền qua quanh vùng tần số khảo sát.	49
Hình 3.9. (a) Phổ truyền qua (phía trên) và phần thực chiết suất (phía dưới) (b) Phần thực độ từ thẩm, điện thẩm của cấu trúc lưới đĩa khi hoạt động ở vùng hồng ngoại.....	51
Hình 3.10. (a) Phổ truyền qua (phía trên) và phần thực chiết suất (phía dưới) (b) Phần thực độ từ thẩm, điện thẩm của cấu trúc lưới đĩa khi hoạt động ở vùng hồng ngoại.....	52

MỞ ĐẦU

Ngày nay khoa học kỹ thuật ngày càng phát triển thì nhu cầu tạo ra vật liệu mới tốt hơn, rẻ hơn, có tính chất ưu việt hơn để thay thế vật liệu truyền thống là vấn đề được các nhà nghiên cứu đặc biệt quan tâm. Một trong số các vật liệu được nghiên cứu và chế tạo mà chúng ta phải kể đến đó là siêu vật liệu (Metamaterials). Siêu vật liệu là vật liệu nhân tạo, loại siêu vật liệu được nghiên cứu đầu tiên và nhiều nhất là siêu vật liệu có chiết suất âm (negative refraction). Để tạo ra vật liệu biến hóa có chiết suất âm, cách đầu tiên là người ta dùng cấu trúc kết hợp, trong cấu trúc này chiết suất âm được tạo ra từ sự kết hợp hai thành phần: một thành phần tạo ra độ điện thẩm âm và một thành phần tạo ra độ từ thẩm âm. Cách thứ hai là bằng cách thay đổi các tham số cấu trúc để cho vùng cộng hưởng điện và cộng hưởng từ trong một cấu trúc tiến gần đến nhau tuy nhiên phương pháp này gặp phải hạn chế là vùng chiết suất âm thường rất hẹp và phá vỡ tính đối xứng của cấu trúc [1]. Gần đây một hướng nghiên cứu vật liệu có chiết suất âm sử dụng cộng hưởng bậc cao đang được tập trung nghiên cứu [1]. Cách tiếp cận này dựa trên mô hình lai hóa cho cấu trúc đối xứng nên không cần phải phá vỡ tính đối xứng. Bên cạnh mode cơ bản, cộng hưởng từ có thể được tạo ra bởi mode bậc cao. Sự chùng chập giữa mode này và mode điện cơ bản dễ hơn rất nhiều so với sự chùng chập của hai mode điện và từ cơ bản. Bằng cách này, Soukoulis và cộng sự [1] đã tạo ra chiết suất âm ở vùng tần số 15.5 GHz. Nhóm của Soukoulis đã sử dụng cấu trúc dựa trên vòng cộng hưởng có rãnh và thanh kim loại. Đây là một cấu trúc phức tạp và mật độ kim loại trên bề mặt cao vì vậy khó khăn trong việc chế tạo và sẽ gây ra tổn hao lớn đặc biệt là chế tạo siêu vật liệu hoạt động ở vùng tần số cao. Vì vậy, để khắc phục nhược điểm này, hướng sử dụng cấu trúc cặp dây bị cắt (cut-wire pair-CWP) đơn giản hơn để tạo chiết suất âm mà vẫn dựa trên nguyên tắc kết hợp cộng hưởng từ bậc cao chùng chập với cộng