ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN
TRƯỜNG ĐẠI KHOA HỌC

BÙI VĂN CHỈNH

NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN DẢI TẦN SỐ HOẠT ĐỘNG CỦA SIÊU VẬT LIỆU TRONG VÙNG QUANG HỌC

LUẬN VĂN THẠC SĨ VẬT LÝ

THÁI NGUYÊN - 2019

ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN
TRƯỜNG ĐẠI KHOA HỌC

BÙI VĂN CHỈNH

NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN DẢI TẦN SỐ HOẠT ĐỘNG CỦA SIÊU VẬT LIỆU TRONG VÙNG QUANG HỌC

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 về sự hướng dẫn, chỉ bảo hết sức tận tình của cô trong suốt quá trình em thực hiện 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 thày 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 08 năm 2019

Học viên

Bùi Văn Chỉnh

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 1
1.1. Tổng quan 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 5
1.2.2. Vật liệu có độ từ thẩm âm 6
1.2.3. Vật liệu có chiết suất âm 9
1.3. Mô hình lai hóa trong siêu vật liệu 10
1.3.1. Mô hình lai hoá bậc một ứng với cấu trúc CWP 10
1.3.2. Mô hình lai hóa bậc hai ứng với cấu trúc CWP hai lớp 12
1.4. Một số kết quả nghiên cứu điều khiển tần số làm việc của siêu vật liệu bằng các tác động ngoại vi. 14
1.4.1.1. Điều khiển vùng tần số làm việc của siêu vật liệu bằng tác động nhiệt 14
1.4.1.2. Mô hình mạch điện LC ứng với cấu trúc cặp đĩa cho độ từ thẩm âm 15
1.4.1.3. Mô hình mạch điện LC ứng với cấu trúc lưới đĩa cho chiết suất âm 16
1.4.1.4. Ảnh hưởng của nhiệt độ lên tính chất điện của vật liệu InSb 17
1.4.1.5. Điều khiển độ từ thẩm âm sử dụng cấu trúc cặp đĩa (DP) 17
1.4.1.6. Điều khiển chiết suất âm sử dụng cấu trúc lưới đĩa (DN) 19
1.4.2. Điều khiển vùng tần số làm việc của siêu vật liệu bằng tác động điện trường và từ trường 21
1.4.2.1. Điều khiển vùng có độ từ thẩm âm bằng điện trường 21
1.4.2.2. Điều khiển vùng có độ từ thẩm âm bằng từ trường 23
1.4.3. Điều khiển tính chất chiết suất âm của vật liệu bằng yếu tố quang học hoặc nguồn sóng điện từ kích thích 26

CHƯƠNG 2: PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU 29
2.1. Lựa chọn cấu trúc và vật liệu 29
2.2. Phương pháp mô phỏng 32
2.3. Phương pháp tính toán 34
2.3.1.Tính toán cho biết hiệu quả hoạt động mô hình lai hóa dựa theo mô hình mạch điện LC 34
2.3.1.1. Tính toán dựa theo mô hình mạch điện LC ứng với cấu trúc cặp đĩa hai lớp (DPD) cho vùng từ thẩm âm rộng 34
2.3.1.2. Tính toán dựa theo mô hình mạch điện LC ứng với cấu trúc lưới đĩa hai lớp (DNP) cho chiết suất âm rộng 37
2.3.2. Phương pháp tính toán dựa trên thuật toán của Chen 38
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN 40
3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ lên tính chất điện của vật liệu InSb 41
3.2. Nghiên cứu điều khiển hiệu quả hiệu quả mở rộng vùng từ thẩm âm dựa trên giản đồ lai hóa bậc hai sử dụng cấu trúc cặp đĩa hai lớp 43
3.3. Nghiên cứu vật liệu đệm giữa hai lớp cấu trúc cặp đĩa cho hiệu quả điều khiển bằng nhiệt giống với lớp đệm không khí 49
3.4. Nghiên cứu điều khiển hiệu quả hiệu quả mở rộng vùng chiết suất âm dựa trên giản đồ lai hóa bậc hai sử dụng cấu trúc lưới đĩa hai lớp.....50
3.5. Nghiên cứu điều khiển hiệu quả lai hóa để mở rộng vùng từ thẩm âm sử dụng cấu trúc cặp đĩa hai lớp ở gần vùng khả kiến 56
KẾT LUẬN 58
HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO 59
CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ 60
TÀI LIỆU THAM KHẢO 61

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
LH	Left - Handed	Quy tắc bàn tay trái
LHMs	Left - Handed	Vật liệu tuân theo quy tắc bàn tay trái
Meta	Metamaterial	Siêu vật liệu
RH	Right - Handed	Quy tắc bàn tay phải

DANH MỤC CÁC HÌNH

Hình 1.1. Giản đồ biểu diễn mối liên hệ giữa ε và μ 4

Hình 1.2. (a) Cấu trúc lưới dây kim loại mỏng sắp xếp tuần hoàn và (b) độ điện thẩm hiệu dụng của lưới dây bạc theo tần số với r = 5 μm, a = 40 mm và độ dẫn của bạc là $\sigma = 6{,}3\times107\ Sm^{-1}$. 6

Hình 1.3. Sơ đồ cấu trúc của vòng cộng hưởng có rãnh (Split Ring Resonator – SRR) và các cấu trúc SRR trong dãy tuần hoàn 7

Hình 1.4. Nguyên lý hoạt động của SRR để tạo ra μ < 0 7

Hình 1.5. Dạng tổng quát của độ từ thẩm hiệu dụng cho mô hình SRR với giả thiết là vật liệu không có tổn hao. 8

Hình 1.6. 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. 9

Hình 1.7. (a) Cấu trúc CWP, (b) giản đồ lai hóa, (c) phổ truyền qua của cấu trúc một CW và một cặp CW (CWP) 11

Hình 1.8. a) Ô cơ sở của cấu trúc CWP hai lớp b) mặt cắt của cấu trúc CWP hai lớp và c) mô hình lai hóa bậc hai đề xuất với cấu trúc này 12

Hình 1.9. Phổ truyền qua 13

Hình 1.10. Ô cơ sở của siêu vật liệu có cấu trúc a) dạng cặp đĩa b) lưới đĩa. R là bán kính của đĩa, w là độ rộng của dây liên tục. Chiều dày của lớp điện môi là t_s và chiều dày của lớp InSb là t_m 14

Hình 1.11. Mô hình mạch điện LC cho cấu trúc cặp đĩa 15

Hình 1.12. Mô hình mạch điện LC cho cấu trúc lưới đĩa 16

Hình 1.13.a) Phổ truyền qua tại nhiệt độ từ 300 K đến 350 K và b) phổ truyền qua theo nhiệt độ tổng quát hóa (theo nhiều giá trị nhiệt độ) 18

Hình 1.14: a) Độ từ thẩm tại nhiệt độ 300 K đến 350 K và b) độ từ thẩm theo nhiệt độ tổng quát hóa 18

Hình 1.15.a) Phổ truyền qua và b) chiết suất của cấu trúc dạng lưới đĩa InSb theo nhiệt độ c) tính toán vùng có chiết suất âm khi nhiệt độ tăng 20

Hình 1.16. Mô hình sử dụng cấu trúc SRR để điều khiển độ từ thẩm âm được nhúng trong tinh thể lỏng 21
Hình 1.17. a) Phổ truyền qua khi điện trường ngoài thay đổi và b)tần số cộng hưởng từ phụ thuộc cường độ điện trường ngoài. 22
Hình 1.18. Kết quả tính toán độ từ thẩm hiệu dụng ứng với điện trường ngoài khác nhau 23
Hình 1.19. Mô hình điều khiển độ từ thẩm âm của siêu vật liệu cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh và thanh sắt từ. 24
Hình 1.20. Giá trị của độ từ thẩm phụ thuộc từ trường trên cơ sở tính toán cho thanh sắt từ tại 3 vùng từ trường 25
Hình 1.21. Kết quả mô phỏng độ từ thẩm (đường liền nét) so sánh với kết quả tính toán theo công thức (2) (đường nét đứt) với các giá trị của từ trường ngoài 0, 2000 và 4000 Oe 26
Hình 1.22. a) Mô hình cấu trúc vòng cộng hưởng tích hợp vật liệu quang phi tuyến và sơ đồ tính toán mạch tương đương trong nghiên cứu của Chen và cộng sự . b) Sự biến đổi chiết suất của siêu vật liệu dưới cường độ sáng kích thích khác nhau tại các tần số khác nhau (bước sóng khác nhau). 27
Hình 1.23. Mô hình siêu vật liệu được điều khiển bằng chuỗi các đèn LED 28
Hình 2.1. Sơ đồ quá trình nghiên cứu.....29
Hình 2.2. Ô cơ sở cấu trúc.....30
Hình 2.3. Giao diện mô phỏng CST khi mô phỏng cấu trúc lưới đĩa hai lớp 33
Hình 3.1. Tần số plasma và nồng độ hạt tải phụ thuộc vào nhiệt độ. 42
Hình 3.2. Mô phỏng sự phụ thuộc (a) phổ truyền qua của DPD và (b) phần thực của độ từ thẩm vào nhiệt độ. 43
Hình 3.3. Phân bố năng lượng từ tại các tần số cộng hưởng theo nhiệt độ.....45
Hình 3.4. Phân bố năng lượng điện tại các tần số cộng hưởng theo nhiệt độ 46
Hình 3.5. Sự phụ thuộc của (a) Phổ truyền qua mô phỏng và (b) độ từ thẩm vào khoảng cách hai lớp d khi cố định chiều dày lớp điện môi t_d = 10μm. 48

Hình 3.6. Sự phụ thuộc của (a) Phổ truyền qua mô phỏng và (b) độ từ thẩm vào chiều dày lớp điện môi t_d khi cố định d = 5μm. 48

Hình 3.7. Mô phỏng phổ truyền qua của cấu trúc DPD vào lớp đệm giữa hai lớp cấu trúc (a) TPX, (b) Quart và (c) Saphia.....50

Hình 3.8. Mô phỏng sự phụ thuộc của (a) Phổ truyền qua và chiết suất, (b) Phần thực của độ từ thẩm và điện thẩm của cấu trúc DND vào nhiệt độ và (c) Tính toán vùng có chiết âm kép theo sự tăng của nhiệt độ. ...52

Hình 3.9. Mô phỏng sự phụ thuộc (a) phổ truyền qua và chiết suất (b) phần thực của độ từ thẩm, điện thẩm của DND vào chiều dày lớp Polymethylpentene và (c) tính toán vùng có chiết suất âm kép tăng theo sự giảm của chiều dày lớp Polymethylpentene.....54

Hình 3.10. Mô phỏng sự phụ thuộc (a) phổ truyền qua và chiết suất (b) phần thực của độ từ thẩm, điện thẩm của DND vào chiều dày lớp điện môi Pyrex glass và (c) tính toán vùng có chiết suất âm kép tăng theo sự tăng của độ dày lớp Pyrex. 55

Hình 3.11. Mô phỏng sự phụ thuộc của phổ truyền qua vào (a) khoảng cách hai lớp d và (b) chiều dày lớp điện môi ở quanh vùng tần số 140 THz. 57

MỞ ĐẦU

Hiện nay để đạt được kết quả cao về công nghệ và ứng dụng thì ngoài nền kĩ thuật sẵn có, vấn đề quan trọng là tìm ra các loại vật liệu có tính năng mới. Một trong số các vật liệu được nghiên cứu và chế tạo mà chúng ta phải nói đến đó là siêu vật liệu. Siêu vật liệu là vật liệu nhân tạo, loại siêu vật liệu được nghiên cứu đầu tiên và nhiều nhất là vật liệu có chiết suất âm (negative refraction). Dựa trên ý tưởng ban đầu của Veselago, vật liệu chiết suất âm là sự kết hợp hoàn hảo của hai thành phần điện và từ, tạo nên vật liệu đồng thời có độ từ thẩm âm và độ điện thẩm âm ($\mu < 0$, $\varepsilon < 0$) trên cùng một dải tần số. Từ đó dẫn đến những tính chất điện từ và quang học bất thường, trong đó có sự nghịch đảo của định luật Snell, sự nghịch đảo trong dịch chuyển Doppler, hay sự nghịch đảo của phát xạ Cherenkov. Nhờ vào các tính chất kỳ diệu này, siêu vật liệu có chiết suất âm hứa hẹn rất nhiều tiềm năng ứng dụng như: siêu thấu kính, antenna, một trong những thành phần chế tạo "áo khoác tàng hình", cảm biến, chậm hay dừng ánh sáng…Tuy nhiên, trước khi đưa vật liệu này vào ứng dụng rộng rãi, vẫn còn tồn đọng khá nhiều vấn đề cần được giải quyết một cách thỏa đáng. Như bằng cách nào để chế tạo một cách đơn giản, dễ dàng và có tính đối xứng cao, giảm sự tiêu hao, mở rộng vùng tần số hoạt động của vật liệu hay tìm kiếm các ứng dụng mới… Đối với vấn đề mở rộng vùng tần số hoạt động, phương pháp thông thường là tích hợp nhiều cấu trúc đơn lẻ vào một ô cơ sở hay sử dụng phương pháp tối ưu hóa theo công thức của Gielis. Tuy nhiên các phương pháp này đều hạn chế ở cấu trúc phức tạp, hay đòi hỏi điều chỉnh các tham số một cách khá khắt khe hay mất tính đối xứng nên khó khăn trong việc chế tạo đặc biệt là vùng tần số cao…Gần đây phương pháp lai hóa plasmon được sử dụng rất hiệu quả để mở rộng vùng tần số hoạt động của siêu vật liệu. Tuy nhiên hầu hết các công trình mới chỉ nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số cấu trúc hay tổn hao lên hiệu quả mở rộng vùng tần số hoạt động dựa trên lai hóa chứ chưa có công trình nào nghiên cứu ảnh hưởng của tác động ngoại vi đến điều này. Tác động ngoại vi như nhiệt, điện, quang… bao gồm cả tác động mong muốn (tác động vào có chủ đích để thay đổi tính chất của vật liệu) hay tác động không mong muốn (tác động của yếu tố môi