

## ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ CẤU TRÚC LÊN ĐỘ MỞ RỘNG VÙNG CHIẾT SUẤT ÂM TRONG CẤU TRÚC LƯỚI ĐĨA DỰA TRÊN LAI HÓA PLASMON

Nguyễn Thị Hiền\*, Phạm Thị Mai Hiền,  
Nguyễn Thị Hương, Bùi Văn Chính, Nguyễn Xuân Ca  
Trường Đại học Khoa học - ĐHTH Thái Nguyên

### TÓM TẮT

Chúng tôi đã mô phỏng và tính toán để tối ưu hóa vùng chiết suất âm được mở rộng nhờ lai hóa Plasmon trong cấu trúc lưới đĩa hai lớp hoạt động ở vùng tần số GHz. Kết quả cho thấy khoảng cách giữa hai lớp ảnh hưởng mạnh nhất đến cường độ lai hóa để mở rộng vùng có từ thẩm âm. Trong khi đó, chiều dày lớp điện môi, độ rộng dây liên tục và bán kính đĩa thì ảnh hưởng mạnh đến tần số plasma. Cấu trúc tối ưu thu được đơn giản, không phụ thuộc phân cực và cho vùng chiết suất âm rộng đến 12,8%. Kết quả này là một bước quan trọng để tiến gần đến các ứng dụng thực tế sử dụng vùng chiết suất âm rộng không phụ thuộc phân cực.

**Từ khóa:** vật liệu biến hóa; chiết suất âm rộng; cấu trúc lưới đĩa; lai hóa

### ĐẶT VẤN ĐỀ

Để có thể đưa một số ứng dụng mang tính chất đột phá của vật liệu biến hóa vào thực tế như siêu thấu kính, áo khoác tàng hình, siêu hấp thụ, anten... thì một trong các yêu cầu cấp thiết là mở rộng dải tần hoạt động [1-5]. Nhìn chung, dải tần thể hiện tính chiết suất âm của vật liệu biến hóa thường rất hẹp vì việc tạo ra nó thường dựa trên tính chất cộng hưởng của vật liệu. Đã có rất nhiều phương pháp thực hiện công việc này [3-7], tuy nhiên đều gặp một số hạn chế như: cấu trúc rất phức tạp, khó khăn trong việc chế tạo [1,4,5] và đo đạc đặc biệt là ở vùng tần số cao, hay phá vỡ tính đối xứng nên tạo nên sự tương tác mạnh mẽ giữa các cộng hưởng liền kề và đòi hỏi sự điều chỉnh khá khắt khe về các tham số cấu trúc. Một phương pháp mở rộng vùng tần số hoạt động của siêu vật liệu hiệu quả gần đây được quan tâm nghiên cứu là dựa trên hiệu ứng lai hóa plasmon [2,8,9]. Tuy nhiên các kết quả nghiên cứu này còn hạn chế khi đưa vào ứng dụng do phụ thuộc vào phân cực của sóng điện từ, độ truyền qua vẫn còn thấp. Hơn nữa việc tìm ảnh hưởng của tất cả các tham số cấu trúc đến vùng mở rộng này vẫn chưa được khảo sát. Chính vì vậy, trong nghiên cứu

này, chúng tôi tiếp tục thực hiện nghiên cứu mở rộng vùng chiết suất âm bằng phương pháp lai hóa plasmon nhưng sử dụng cấu trúc lưới đĩa hai lớp để không phụ thuộc phân cực và khảo sát ảnh hưởng của các tham số cấu trúc đến vùng mở rộng này.

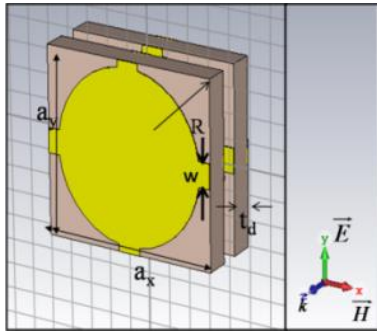
### MÔ PHỎNG VÀ THIẾT KẾ

Trong nghiên cứu này, để nghiên cứu sự mở rộng của vùng có chiết suất âm của vật liệu biến hóa chúng tôi sử dụng cấu trúc lưới đĩa hai lớp. Trong một lớp cấu trúc gồm có: lớp điện môi FR4 ở giữa, hai bên là kim loại bằng đồng. Hình 1 là ô cơ sở của cấu trúc lưới đĩa hai lớp ứng với phân cực của sóng điện từ. Khoảng cách hai lớp cấu trúc là  $d$ , các ô cơ sở được sắp xếp tuần hoàn theo trục  $x(H)$  và trục  $y(E)$  với các hằng số mạng  $a_x = a_y = 8,0$  mm. Lớp điện môi FR-4 có độ điện thẩm là 4,3 và hệ số tổn hao điện môi bằng 0,02. Các đĩa và dây liên tục được làm bằng đồng với độ dẫn điện  $\sigma = 5,88 \times 10^7$  Sm<sup>-1</sup>. Bán kính đĩa  $R=3,5$  mm, bề dày lớp đồng là  $t_m=0,036$  mm, độ rộng của dây liên tục  $w=1$  mm, bề dày lớp điện môi  $t_d=0,4$  mm.

Trong nghiên cứu này, phần mềm mô phỏng thương mại CST Microwave Studio được sử dụng để thiết kế và mô hình hóa tính chất của vật liệu. Nhờ đó, ta thu được các thông tin về các thông số tán xạ (truyền qua, phản xạ và

\* Tel: 0983 650263, Email: hiennt@tnus.edu.vn

pha của chúng) cũng như các đặc trưng về dòng và năng lượng. Cuối cùng, các thông số tán xạ thu được kết hợp với phương pháp tính toán của Chen [10] sẽ cho ta biết giá trị của các tham số điện từ hiệu dụng (độ điện thẩm  $\epsilon$ , độ từ thẩm  $\mu$  và chiết suất  $n$ ).



**Hình 1.** Ô cơ sở của cấu trúc lưới đĩa hai lớp và cách phân cực của sóng điện từ

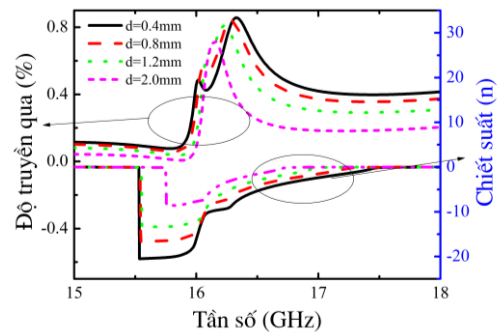
**KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**

**Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của khoảng cách hai lớp lưới đĩa  $d$  đến vùng có chiết suất âm**

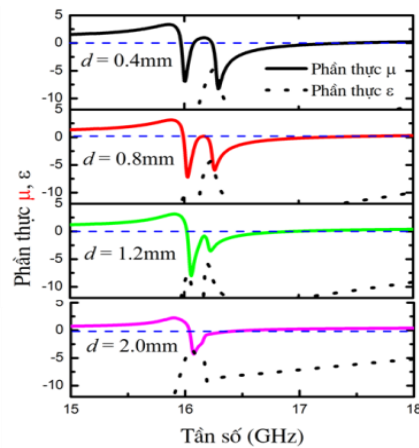
Đầu tiên, ảnh hưởng của tham số  $d$  đến việc mở rộng dải tần có chiết suất âm ( $n < 0$ ) được tập trung nghiên cứu. Bên cạnh đó, sự dịch chuyển của tần số plasma theo  $d$  cũng được khảo sát để đánh giá hiệu quả của sự mở rộng dải tần chiết suất âm sử dụng mô hình lai hóa bậc hai [2,8,9] của cấu trúc lưới đĩa hai lớp.

Hình 2(a) là phổ truyền qua mô phỏng và kết quả tính toán chiết suất  $n$  phụ thuộc vào khoảng cách hai lớp cấu trúc  $d$  với độ dày lớp điện môi được cố định  $t_d=0,4$  mm. Kết quả cho thấy khi  $d$  giảm từ 2,0 mm về 0,4 mm, vùng truyền qua quanh tần số 16,15 GHz dần dần được mở rộng. Nguyên nhân của việc mở rộng này hoàn toàn có thể giải thích dựa vào hình 2(b) với các giá trị phần thực của độ điện thẩm  $\epsilon$  và độ từ thẩm  $\mu$ . Kết quả cho thấy, vùng có độ từ thẩm âm ( $\mu < 0$ ) dần dần được mở rộng khi  $d$  giảm và tách ra thành hai đỉnh tại tần số 16,0 và 16,3 GHz khi  $d = 0,4$  mm. Hơn nữa, vùng từ thẩm âm mở rộng này đều nằm dưới tần số plasma nên kết quả là vùng chiết suất âm cũng được mở rộng như quan sát trên hình 2(a) phía dưới. Điều này giải thích cho sự mở rộng vùng truyền qua quanh

16,15 GHz khi  $d$  giảm. Kết quả này là do hiệu ứng lai hóa gây lên và hoàn toàn tương tự với các kết quả nghiên cứu trước đây với cấu trúc kết hợp hai lớp và lưới hai lớp [2]. Quan sát hình 2(a) còn cho thấy vùng truyền ứng với chiết suất âm kép có độ rộng là trên 10% và độ truyền tại đỉnh cao nhất là 80%. Trong khi các kết quả nghiên cứu trước đây [2] sử dụng cấu trúc kết hợp chỉ cho độ rộng là 5% và độ truyền qua là 40%, còn cấu trúc lưới cá hai lớp cho độ rộng 10% nhưng độ truyền qua cũng chỉ đạt đến 60%. Như vậy, với cấu trúc chúng tôi sử dụng cho độ rộng và độ truyền qua cao hơn. Để lý giải cho việc thu được độ truyền qua cao trong cấu trúc sử dụng, chúng ta quan tâm đến độ điện thẩm và từ thẩm trên hình 2(b), đặc biệt là độ dốc của đường điện thẩm phụ thuộc vào tần số.



a)



b)

**Hình 2.** Ảnh hưởng của khoảng cách hai lớp lưới đĩa lên a) Phổ truyền qua và chiết suất b) Phần thực của độ từ thẩm và độ điện thẩm

So với các cấu trúc trước đây [2], độ dốc đường điện thẩm ở đây nhỏ hơn nhiều vì thế điều kiện phối hợp trở kháng dễ dàng đạt

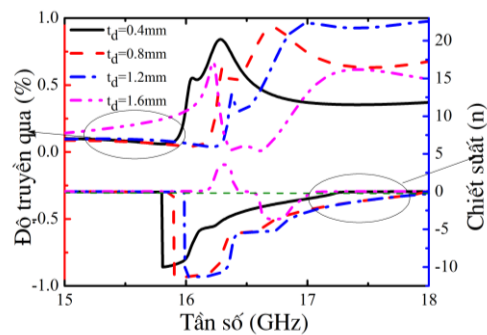
được [11]. Trên hình 2(b) ta có thể thấy quanh vùng cộng hưởng từ (16,15 GHz) độ điện thẩm và từ thẩm có giá trị gần bằng nhau chính vì thế tổn hao do phản xạ quanh vùng này nhỏ. Ngoài ra, một ưu điểm nữa dễ nhận thấy khi sử dụng cấu trúc lưới đĩa trong nghiên cứu này là vùng chiết suất âm mở rộng không phụ thuộc vào phân cực của sóng điện từ do tính chất đối xứng của cấu trúc.

Về mặt tối ưu tham số, kết quả nghiên cứu trên hình 1 cho thấy khi khoảng cách  $d = 0,8$  mm cho vùng chiết âm có độ truyền qua trên 60% rộng nhất nên các khảo sát tiếp theo chúng tôi sẽ giữ cố định  $d = 0,8$  mm và thay đổi các tham số khác.

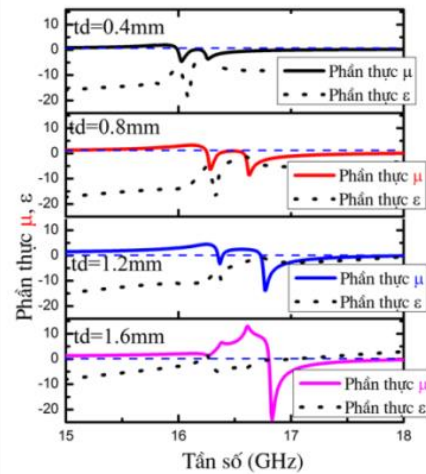
### Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày lớp điện môi đến vùng có chiết suất âm

Trong các công trình nghiên cứu trước đây [9] việc thay đổi  $t_d$  ảnh hưởng rất mạnh đến tần số plasma trong các cấu trúc kết hợp để tạo ra chiết suất âm. Điều này ảnh hưởng rất mạnh đến độ rộng vùng có chiết suất âm thu được. Để biết được cụ thể sự ảnh hưởng này như thế nào, tiếp theo, chúng tôi sẽ nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày lớp điện môi  $t_d$  đến sự mở rộng vùng có chiết suất âm trong cấu trúc lưới đĩa hai lớp. Kết quả nghiên cứu được đưa ra trên hình 3 khi giữ nguyên khoảng cách hai lớp  $d = 0,8$  mm. Phổ truyền qua trên hình 3(a) (phía trên) cho thấy, thứ nhất, khi  $t_d$  tăng từ 0,4 mm đến 1,6 mm vùng truyền qua ứng với chiết suất âm bị dịch về phía tần số cao. Sự dịch đỉnh này được giải thích khi  $t_d$  tăng, mode cộng hưởng từ cơ bản bị dịch về phía tần số cao theo mô hình mạch điện LC [12]. Thứ hai, khi  $t_d$  tăng từ  $t_d = 0,4$  mm đến 0,8 mm vùng truyền qua ứng với chiết suất âm được mở rộng hơn, sau đó  $t_d$  tiếp tục tăng thì vùng truyền qua ứng với chiết suất dương [13] bên tay phải dịch nhanh và lấn át vùng truyền qua ứng với chiết suất âm mà ta đang quan tâm. Đặc biệt khi  $t_d$  tăng đến 1,6 mm thì vùng truyền qua ứng với chiết suất âm biến mất và thay bằng vùng không truyền qua. Để làm sáng tỏ thêm những quan sát trên hình 3(a) vừa nêu, chúng tôi tính toán độ điện thẩm, độ

từ thẩm và chiết suất dựa trên số liệu mô phỏng. Kết quả đưa ra trên hình 3(a) (phía dưới) và 3(b). Kết quả cho thấy vùng có độ từ thẩm âm càng được mở rộng khi  $t_d$  tăng. Với bức tranh lai hóa, có thể tưởng tượng rằng kết quả của việc tăng  $t_d$  làm giảm cường độ tương tác nội giữa hai đĩa trong một cặp đĩa. Khi cường độ tương tác nội có thể so sánh với cường độ tương tác ngoại, lai hóa bậc hai sẽ được kích hoạt để tách mode cộng hưởng từ cơ bản trong cấu trúc cặp đĩa thành vùng cộng hưởng rộng hơn.



a)



b)

**Hình 3.** Sự phụ thuộc của a) Phổ truyền qua (phía trên) và chiết suất (phía dưới); b) Độ từ thẩm và điện thẩm vào độ dày lớp điện môi khi giữ cố định khoảng cách hai lớp là  $d = 0,8$  mm. Tất cả các tham số khác không thay đổi

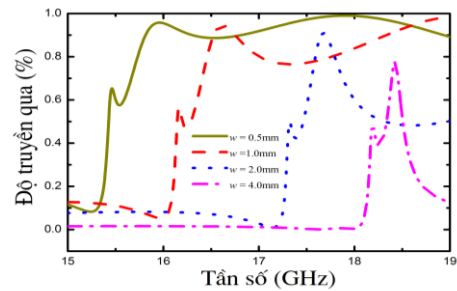
Ngoài ra như đã trình bày ở trên, tần số plasma rất quan trọng trong việc quyết định hình thành vùng có chiết suất âm. Kết quả tính toán độ điện thẩm phụ thuộc vào  $t_d$  cho

thấy khi  $t_d$  tăng thì tần số plasma dịch rất mạnh về phía tần số thấp. Khi  $t_d = 0,4$  mm và 0.8 mm thì tần số plasma vẫn lớn hơn vùng tần số có từ thẩm âm. Vì vậy khi  $t_d$  tăng trong khoảng này vùng chiết suất âm rộng ra thêm như quan sát trên hình 3(a). Tuy nhiên khi  $t_d$  tăng từ 0,8 mm đến 1,6 mm, tần số plasma dịch vào vùng từ thẩm âm, thậm chí có giá trị nhỏ hơn vùng tần số có từ thẩm âm khi  $t_d = 1,6$  mm. Sự dịch chuyển này của tần số plasma giải thích cho sự dịch vùng chiết suất dương về gần vùng chiết suất âm như quan sát trong hình 3(a) (phía trên) và khi  $t_d = 1,6$  mm vùng truyền qua ứng với chiết suất âm kép lại biến mất. Các kết quả nghiên cứu trên hình 3 cho thấy khoảng cách  $t_d$  tối ưu là 0,8 mm vì cho vùng chiết suất âm kép ứng với độ truyền qua trên 60% là rộng nhất.

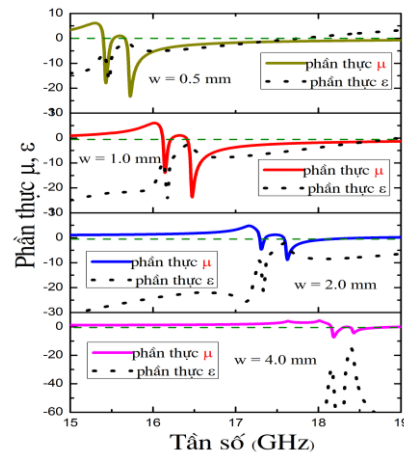
**Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của độ rộng dây liên tục đến vùng có chiết suất âm**

Hình 4 trình bày kết quả mô phỏng về sự ảnh hưởng của độ rộng dây kim loại liên tục lên vùng độ mở rộng vùng chiết suất âm dựa trên mô hình lai hóa. Đối với nghiên cứu này, khoảng cách hai lớp được giữ cố định ở  $d = 0,8$  mm, chiều dày lớp điện môi giữ ở  $t_d = 0,8$  mm, các tham số khác như bán kính đĩa, hằng số mạng không đổi, trong khi chiều rộng của thanh dây kim loại liên tục  $w$  thay đổi từ 0,5 mm đến 4 mm. Trên hình 4(a) là sự phụ thuộc của phổ truyền qua mô phỏng vào  $w$ . Kết quả cho thấy vùng truyền qua ứng với chiết suất âm kép dịch về phía tần số cao khi  $w$  tăng. Ngoài ra vùng truyền qua ứng với vùng có chiết suất âm kép có hình dạng hầu như không đổi (vẫn xuất hiện hai đỉnh) nhưng độ rộng vùng chiết suất âm và độ truyền qua giảm khi  $w$  tăng. Để hiểu sâu được nguyên nhân của các quan sát này, chúng tôi tính toán các tham số độ từ thẩm và điện thẩm phụ thuộc vào  $w$  và đưa ra trên hình 4(b). Kết quả trên hình 4(b) cho thấy khi  $w$  tăng thì tần số vùng cộng hưởng từ và tần số plasma đều tăng. Tuy nhiên, vùng cộng hưởng từ luôn luôn nằm dưới tần số plasma nên dẫn đến sự dịch tần của vùng có chiết suất âm kép lên tần số cao. Sự dịch tần số cộng hưởng từ về phía

tần số cao khi  $w$  tăng có thể được giải thích theo mô hình mạch điện LC [12]. Ngoài ra, quan sát hình 4(b) còn cho thấy khi  $w$  tăng, đường điện thẩm phụ thuộc vào tần số ngày càng dốc, làm cho giá trị độ điện thẩm và từ thẩm ở vùng cộng hưởng từ ngày càng xa nhau. Vì vậy điều kiện phối hợp trở kháng càng khó thực hiện. Đây là lý do làm tổn hao do phản xạ lớn, dẫn đến độ truyền qua thấp và hiệu ứng lai hóa kém hiệu quả hơn [11]. Ngoài ra, điều này cũng dễ dàng giải thích rằng khi  $w$  tăng thì lượng đồng phủ kín bề mặt mẫu tăng nên phản xạ sẽ lớn. Chính vì các lý do này nên trên phổ truyền qua hình 4(a), độ truyền qua và độ rộng của vùng chiết suất âm kép ngày càng giảm khi  $w$  tăng như đã trình bày ở trên.



a)

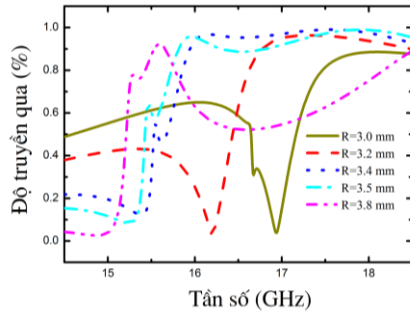


b)

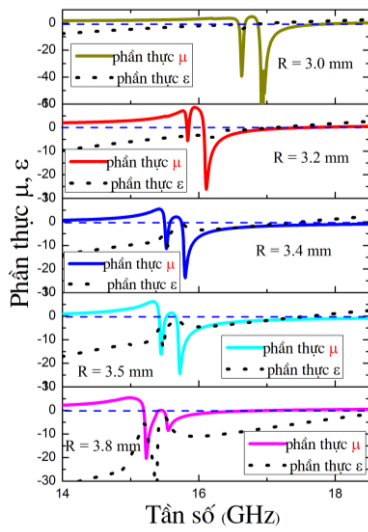
**Hình 4.** Sự phụ thuộc của a) Phổ truyền qua; b) Độ từ thẩm và điện thẩm vào bề rộng của dây liên tục khi giữ cố định khoảng cách hai lớp là  $d = 0.8$  mm. Tất cả các tham số khác không thay đổi

Kết quả khảo sát khi thay đổi  $w$  cho thấy với giá trị  $w = 0,5$  mm là tối ưu cho vùng có chiết suất âm rộng và độ truyền qua cao nhất.

**Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của bán kính đĩa đến vùng có chiết suất âm**



a)



b)

**Hình 5.** Sự phụ thuộc của a) Phổ truyền qua; b) Độ từ thẩm và điện thẩm vào bề rộng của dây liên tục khi giữ cố định khoảng cách hai lớp là  $d = 0,8$  mm. Tất cả các tham số khác không thay đổi

Hình 5 trình bày kết quả mô phỏng về sự ảnh hưởng của bán kính đĩa  $R$  lên độ mở rộng vùng chiết suất âm kép dựa trên mô hình lai hóa bậc hai. Với quá trình khảo sát này, khoảng cách hai lớp được giữ cố định ở  $d = 0,8$  mm, chiều dày lớp điện môi giữ ở  $t_d=0,8$  mm,  $w=0,5$ mm các tham số hằng số mạng không thay đổi, trong khi bán kính đĩa thay đổi từ 3,0 mm đến 3,8 mm. Trên hình 5(a) là sự phụ thuộc của phổ truyền qua mô phỏng vào  $R$ . Kết quả trên hình này cho thấy: thứ nhất vùng truyền qua ứng với chiết suất âm dịch về phía tần số thấp khi  $R$  tăng. Thứ hai, khi  $R$  tăng, độ truyền qua giảm. Thứ ba, vùng có chiết suất dương bên tay phải dịch mạnh

về phía vùng chiết suất âm khi  $R$  giảm nên tại các giá trị  $R = 3,0$  mm vùng có chiết suất âm bị biến mất. Để hiểu sâu được nguyên nhân của các quan sát này, chúng tôi tính toán các tham số độ từ thẩm và điện thẩm phụ thuộc vào  $R$  và đưa ra trên hình 5(b). Kết quả trên hình 5(b) cho thấy khi  $R$  tăng thì tần số vùng cộng hưởng từ giảm giải thích cho sự giảm vùng tần số ứng với chiết suất âm quan sát trên hình 5(a). Điều này còn được giải thích dựa theo mô hình mạch điện LC [12]. Quan sát trên hình 5(b) có hai điều rất đáng được quan tâm. Thứ nhất, khi  $R$  giảm, tần số plasma giảm mạnh trong khi vùng tần số có từ thẩm âm lại tăng vì vậy làm giảm vùng có đồng thời độ điện thẩm và từ thẩm đều âm. Điều này giải thích cho quan sát trên hình 5(a) là vùng truyền qua ứng chiết suất dương dịch vào vùng tần số có chiết suất âm và làm vùng này dần bị thu hẹp lại và biến mất tại  $R = 3,0$  mm. Thứ hai, khi  $R$  tăng thì độ dốc đường điện thẩm phụ thuộc vào tần số ngày càng tăng, làm cho giá trị độ điện thẩm và từ thẩm ở vùng cộng hưởng từ ngày càng xa nhau. Tương tự giải thích với trường hợp  $w$ , điều này dẫn đến điều kiện phối hợp trở kháng càng khó thực hiện nên tổn hao do phản xạ là lớn, dẫn đến độ truyền qua thấp và hiệu ứng lai hóa kém hiệu quả hơn. Chính vì các lý do này nên trên phổ truyền qua hình 5(a), độ truyền qua và độ rộng của vùng chiết suất âm ngày càng giảm khi  $R$  tăng từ 3,0 mm đến 3,8 mm như đã trình bày ở trên.

Quá trình khảo sát với  $R$  thay đổi cho thấy giá trị  $R = 3,5$  mm là tối ưu cho vùng có chiết suất âm với độ truyền qua trên 60% là rộng nhất (độ rộng đạt đến 12,9%). So với các kết quả nghiên cứu trước đây [1,2,3,4], kết quả này của chúng tôi vừa có cấu trúc đơn giản, ít tham số cấu trúc, không phụ thuộc phân cực lại cho độ rộng lớn hơn.

**KẾT LUẬN**

Trong báo cáo này, chúng tôi đã thu được một số kết quả quan trọng như sau: Đã tìm được ảnh hưởng của các tham số cấu trúc đến độ mở rộng



của vùng tần số có chiết suất âm sử dụng cấu trúc lưới đĩa hai lớp dựa trên mô hình lai hóa bậc hai. Kết quả cho thấy khoảng cách giữa hai lớp ảnh hưởng mạnh nhất đến cường độ lai hóa để mở rộng vùng có từ thẩm âm, còn chiều dày lớp điện môi, độ rộng dây liên tục và bán kính đĩa thì ảnh hưởng mạnh đến tần số plasma. Vì vậy nên tất cả các tham số này đều ảnh hưởng đến độ rộng của vùng có chiết suất âm mong muốn. Qua quá trình tối ưu hóa các tham số cấu trúc, nghiên cứu đã tìm ra cấu trúc tối ưu cho vùng có chiết suất âm với độ truyền qua trên 60% có độ rộng đạt đến 12,9%. Đây là một bước quan trọng để tiến gần đến các ứng dụng thực tế khi sử dụng vùng chiết suất âm rộng.

**Lời cảm ơn.** Công trình này được thực hiện với sự hỗ trợ của đề tài nghiên cứu thuộc Quỹ phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED). Mã số: 103.99-2018.35

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Q. Ma, C. B. Shi, T. Y. Chen, M. Q. Qi, Y. B. Li, and T. J. Cui (2018), "Broadband metamaterial lens antennas with special properties by controlling both refractive-index distribution and feed directivity", *Journal of Optics*, 20 (4), pp. 045101.
2. N. T. Hien, B. S. Tung, Y. Sen, A. E.V. Guy, L. Peter, V. D. Lam, and J. Ewald (2016), "Broadband negative refractive index obtained by plasmonic hybridization in metamaterials", *App. Phys. Lett.*, 109, pp. 221902.
3. Z. Wei, Y. Cao, J. Han, C. Wu, Y. Fan, and H. Li (2010), "Broadband negative refraction in stacked fishnet metamaterial", *Appl. Phys. Lett.*, 97, pp. 141901.
4. Y. Z. Cheng, Y. Niea, and R. Z. Gong (2012), "Broadband 3D isotropic negative-index metamaterial based on fishnet structure", *Eur. Phys. J. B.*, 85, pp. 62.
5. S. Zhou, S. Townsend, Y. M. Xie, X. Huang, J. Shen, and Q. Li (2014), "Design of fishnet metamaterials with broadband negative refractive index in the visible spectrum", *Opt. Lett.*, 39, pp. 2415.
6. D. H. Kwon, D. H. Werner, A. V. Kildishev, and V. M. Shalaev (2007), "Near-infrared metamaterials with dual-band negative-index characteristics", *Opt. Express*, 15, pp. 1647.
7. C. Huang, Z. Zhao, Q. Feng, J. Cui, and X. Luo (2010), "Metamaterial composed of wire pairs exhibiting dual band negative refraction", *Appl. Phys.*, B98, pp. 365.
8. N. T. Tung, D. T. Viet, B. S. Tung, N. V. Hieu, P. Lievens, and V. D. Lam (2012), "Broadband negative permeability by hybridized cut-wire pair metamaterials", *Appl. Phys. Express*, 5, pp.112001.
9. N. T. Tung, B. S. Tung, E. Janssens, P. Lievens, and V. D. Lam (2014), "Broadband negative permeability using hybridized metamaterials: Characterization, multiple hybridization, and terahertz response", *J. Appl. Phys.*, 116, pp.083104.
10. X. Chen, T. M. Grzegorzczuk, B. I. Wu, J. Pacheco, Jr., and J. A. Kong (2004), "Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of meta-materials", *Phys. Rev. E*, 70, pp. 016608.
11. M. Kafesaki, I. Tsiapa, N. Katsarakis, T. Koschny, C. Soukoulis, and E. Economou (2007) "Left-handed metamaterials: The fishnet structure and its variations", *Physical Review B*, 75, pp. 235114.
12. Hien N. T., Le L. N., Trang P. T., Tung B. S., Viet N. D, Duyen P. T., Thang N. M., Viet D. T., Lee Y. P., Lam V. D, Tung N. T. (2015), "Characterizations of a thermo-tunable broadband fishnet metamaterial at THz frequencies", *Computational Materials Science*, 103, pp. 189.
13. V. D. Lam, J. B. Kim, S. J. Lee, and Y. P. Lee (2008), "Left-handed behavior of combined and fishnet structures", *J. Appl. Phys.*, 103, pp. 033107.

ABSTRACT  
**INFLUENCE OF STRUCTURE PARAMETERS  
ON BROADBAND NEGATIVE REFRACTION  
IN DISHNET STRUCTURE BASE ON PLASMON HYBRIDIZATION**

**Nguyen Thi Hien<sup>\*</sup>, Pham Thi Mai Hien,  
Nguyen Thi Huong, Bui Van Chinh, Nguyen Xuan Ca**  
*University of Science - TNU*

We simulated and calculated to optimize a broadband negative refractive index behavior base on Plasmon hybridization in dishnet dimer metamaterials operating in the GHz frequency range. The results show that the distance between the two layers strongly influenced the intensity of the hybridization to expand negative permeability. Meanwhile, dielectric thickness, continuous wire width and disk radius strongly influenced to plasma frequency. The optimum structure was simple, independent of polarization and had the ratio of the double negative refractive index bandwidth to operational frequency approximately 12.8%. This result is an important step towards to practical applications using broadband negative refraction.

**Keywords:** *Metamaterials; broadband negative refraction; dishnet structure; hybridization*

*Ngày nhận bài: 14/11/2018; Ngày hoàn thiện: 05/12/2018; Ngày duyệt đăng: 15/12/2018*

---

<sup>\*</sup> *Tel: 0983 650263, Email: hiennt@tnus.edu.vn*