

MỞ RỘNG DẢI TẦN TỪ THẨM ÂM DỰA TRÊN MÔ HÌNH LAI HÓA BẠC HAI CHO CẤU TRÚC ĐỐI XỨNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

Nguyễn Thị Hiền^{1*}, Nguyễn Xuân Ca¹, Phạm Minh Tân¹,
Nguyễn Trung Kiên¹, Nguyễn Thị Mây¹, Vũ Đình Lâm²

¹Trường Đại học Khoa học - ĐH Thái Nguyên, ²Viện Khoa học Vật liệu-Viện Hàn lâm KHCN Việt Nam

TÓM TẮT

Một nghiên cứu gần đây của chúng tôi đã chỉ ra sự mở rộng vùng tần số có độ từ thẩm âm có thể thu được đơn giản bằng cách sử dụng siêu vật liệu có cấu trúc dạng cặp dây bị cắt (cut-wire-pair - CWP) [10], [11]. Sự tương tác mạnh giữa hai cặp dây bị cắt liên kế theo vectơ sóng \mathbf{k} tạo ra hiện tượng hồ cảm để tách đỉnh cộng hưởng là nguyên nhân cho sự mở rộng vùng tần số hoạt động. Tuy nhiên với cấu trúc CWP cho vùng mở rộng phụ thuộc rất mạnh vào phân cực của sóng điện từ. Trong báo cáo này, chúng tôi trình bày kết quả nghiên cứu tối ưu hóa cấu trúc mở rộng vùng cộng hưởng từ nhằm khắc phục hạn chế vừa nêu trên. Những kết quả này rất hữu ích cho việc tiến hành các thực nghiệm để thu được các hiệu ứng lai hóa của siêu vật liệu vào các ứng dụng.

Từ khoá: siêu vật liệu (Meta), cấu trúc cặp đĩa, độ điện thẩm âm dải rộng, lai hóa, GHz.

ĐẶT VẤN ĐỀ

Những năm gần đây, siêu vật liệu (metamaterials - MMs) nổi lên như một lĩnh vực có tiềm năng to lớn trong cuộc cách mạng khoa học và công nghệ hiện đại đang diễn ra trên khắp thế giới. Vì những tính chất độc đáo và khả năng ứng dụng to lớn của vật liệu MMs, tạp chí Materials Today đã xếp vật liệu MMs thuộc vào một trong 10 lĩnh vực mang tính đột phá và tác động mạnh mẽ làm thay đổi nền khoa học thế giới trong 50 năm trở lại đây. Vật liệu này được biết đến là "sự sắp xếp tuần hoàn của những phần tử cơ bản có cấu trúc nhân tạo được thiết kế với mục đích đạt được những tính chất điện từ bất thường không tồn tại trong tự nhiên" [8]. Hiện nay có nhiều hướng nghiên cứu khác nhau về MMs. Loại MMs được nghiên cứu đầu tiên và nhiều nhất là MMs chiết suất âm (negative refractive index). Đây là vật liệu có cấu trúc nhân tạo, đồng thời có độ từ thẩm và độ điện thẩm âm ($\mu < 0$, $\epsilon < 0$) trên một dải tần số. Năm 2000, Smith và cộng sự lần đầu tiên chế tạo thành công vật liệu MMs có chiết suất âm [6] xuất phát từ ý tưởng của Veselago được đề xuất vào năm 1968 [12]. Vật liệu này hiện nay đang được các nhà khoa học quan tâm

nghiên cứu một cách đặc biệt vì những tính chất vật lý kỳ diệu mà các vật liệu tồn tại trong tự nhiên không có được như tia tới và tia khúc xạ nằm cùng ở một phía, độ dịch chuyển Doppler bị đảo ngược, bức xạ Cherenkov chỉ về hướng khác, vận tốc pha và vận tốc nhóm của sóng truyền luôn ngược nhau. Bên cạnh đó, bằng việc sử dụng các cấu trúc cộng hưởng điện từ có kích thước hay cấu trúc khác nhau, chúng ta có thể điều khiển được vật liệu này hoạt động ở các vùng tần số mong muốn khác nhau, từ tần số sóng điện từ đến vùng hồng ngoại thậm chí hoạt động ở vùng ánh sáng nhìn thấy. Ngoài những tính chất đặc biệt này, rất nhiều ứng dụng khác nhau của vật liệu MMs chiết suất âm đã được đề xuất và được kiểm chứng bằng thực nghiệm. Một trong những ứng dụng nổi bật nhất của vật liệu này là siêu thấu kính được đề xuất bởi Pendry vào năm 2000, sau đó đã được Zhang và các cộng sự chế tạo thành công năm 2005. Gần đây, một ứng dụng độc đáo khác nữa là sử dụng vật liệu MMs có chiết suất âm như là "áo choàng" để che chắn sóng điện từ (electromagnetic cloaking), được đề xuất và kiểm chứng bởi Schuri và cộng sự. Bằng việc điều chỉnh các tham số hiệu dụng μ và ϵ một cách hợp lý, đường đi của các tia sáng bị uốn cong khi truyền trong vật liệu đồng thời không bị phản xạ cũng như

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

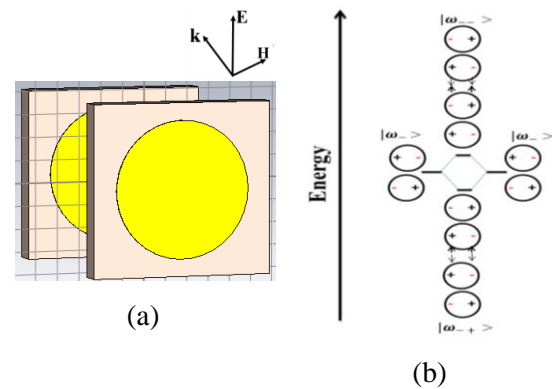
tán xạ. Do vậy, vật liệu này hứa hẹn sẽ được dùng để chế tạo vật liệu tàng hình. Bên cạnh đó, một loạt các ứng dụng quan trọng khác cũng đã được các nhà khoa học đề xuất và tập trung đi sâu nghiên cứu như bộ lọc tần số, bộ cộng hưởng, sensor... Vì những tính chất đặc biệt và khả năng ứng dụng to lớn này, vật liệu có chiết suất âm ngày càng được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu một cách mạnh mẽ.

Mục đích hiện tại của các nhà khoa học là đưa MMs có chiết suất âm vào ứng dụng đối với các thiết bị hoạt động ở vùng tần số sóng điện từ như bộ biến điện, bộ lọc thông dải, bộ ghép vi sóng, dây ăng ten vv..., đồng thời thúc đẩy việc chế tạo vật liệu này hoạt động ở tần số cao hơn phục vụ cho các ứng dụng mới trong quang học. Tuy nhiên, vẫn còn tồn tại nhiều vấn đề cần thiết được giải quyết một cách chi tiết và triệt để trước khi triển khai các ý tưởng này. Trong đó, việc mở rộng vùng tần số hoạt động của vật liệu này là một trong những vấn đề rất được quan tâm nghiên cứu. Nhìn chung, dải tần có chiết suất âm thường rất hẹp do tính chất cộng hưởng. Để mở rộng dải tần có tính chất này người ta thường kết hợp vùng từ thẩm âm rộng với vùng điện thẩm âm rộng trên cùng một dải tần số. Vùng điện thẩm âm rộng hoàn toàn đạt được bằng cách sử dụng tần số plasma thấp của môi trường gồm các lưới dây kim loại [8]. Trong khi đó, vùng từ thẩm âm rộng được xây dựng chủ yếu bằng cách chồng các cấu trúc cộng hưởng đơn lẻ lên nhau, từ đó cung cấp nhiều vùng cộng hưởng từ riêng kế tiếp nhau [1], [4], [5]. Hạn chế lớn nhất của phương pháp này là phá vỡ sự đối xứng trong cấu trúc và đòi hỏi sự điều chỉnh khá khắt khe về các tham số cấu trúc nên rất khó chế tạo mẫu hoạt động ở vùng tần số cao. Trong báo cáo trước đây [10], [11], chúng tôi đã đề xuất một phương pháp đơn giản nhưng hiệu quả để tạo ra vùng độ từ thẩm âm rộng bằng cách sử dụng cấu trúc đối xứng hai chiều - cấu trúc 2 lớp cặp dây bị cắt (CWPs). Cơ sở vật lý cho phương pháp này là

sử dụng tương tác mạnh giữa hai lớp CWPs liên kế theo phương truyền sóng tạo ra hiện tượng hỗ cảm để tách vạch cộng hưởng, kết quả là mở rộng vùng tần số hoạt động. Tuy nhiên, với cấu trúc CWPs hai lớp có nhược điểm là rất phụ thuộc vào phân cực của sóng điện từ vì vậy có hạn chế khi đưa vào ứng dụng thực tế. Trong báo cáo này, nhằm khắc phục hạn chế trên chúng tôi trình bày kết quả nghiên cứu sử dụng cấu trúc cặp đĩa để mở rộng vùng có từ thẩm âm mà không phụ thuộc vào phân cực của sóng điện từ.

THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG

Hình 1(a) mô tả ô cơ sở của cấu trúc đĩa hai lớp (trong một lớp giữa là lớp điện môi FR4 hai bên là đĩa đồng) với các tham số cấu trúc: $a_x= 8 \text{ mm}$, $a_y = 7,5\text{mm}$, $R = 3 \text{ mm}$, bề dày lớp đồng là $0,036 \mu\text{m}$, lớp điện môi $t_d = 0,4 \text{ mm}$, d khoảng cách giữa hai lớp đĩa của cấu trúc đĩa hai lớp. Mô hình lai hóa bậc hai đề xuất với cấu trúc đĩa hai lớp như hình 1(b). Mô hình này hoàn toàn tương tự như với cấu trúc CWPs hai lớp trong các nghiên cứu trước đây của chúng tôi [10], [11].



Hình 1. (a) Ô cơ sở của cấu trúc đĩa hai lớp các tham số cấu trúc $a_x=8 \text{ mm}$, $a_y = 7,5 \text{ mm}$, $t_d = 0,4 \text{ mm}$, $t_m = 0,036 \text{ mm}$, $R=3 \text{ mm}$, (b) mô hình lai hóa bậc hai đề xuất với cấu trúc đĩa hai lớp.

Cũng giống như phần cấu trúc CWPs hai lớp cơ chế cộng hưởng điện từ của cấu trúc hai lớp cặp đĩa có thể được giải thích bằng giản đồ lai hóa bậc hai. Ta xét một hệ gồm 2 lớp cặp đĩa dọc theo phương truyền sóng \mathbf{k} . Ta có thể hình dung rằng, ngoài tương tác giữa các

điện tích bên trong mỗi cặp đĩa, hai lớp cặp đĩa cũng sẽ tương tác lẫn nhau. Lực Coulomb sinh ra giữa các cặp đĩa sẽ góp phần vào việc xác định các mức năng lượng tổng cộng của giản đồ lai hóa bậc 2. Dựa trên giản đồ, ta có thể dự đoán rằng mode từ $|w\rangle$ trong giản đồ lai hóa bậc 1 [3] sẽ bị suy biến thành 2 mode từ riêng biệt. Căn cứ vào lực tương tác giữa các cặp đĩa, ta có mode bất đối xứng bậc 2 $|w+\rangle$ và mode đối xứng bậc 2 $|w-\rangle$ như trên Hình 1(b). Hai mode này đã được chứng minh đều là các mode cộng hưởng từ [10], [11]. Về mặt bản chất, chiều dày lớp điện môi td đặc trưng cho tương tác nội tại trong mỗi cặp đĩa. Trong khi đó, khoảng cách d giữa 2 lớp cặp đĩa sẽ chi phối tương tác bên ngoài giữa chúng. Vì vậy, bằng cách điều chỉnh td hay d có thể điều khiển trực tiếp cường độ của tương tác điện tích trong mỗi cặp đĩa và giữa 2 lớp cặp đĩa, từ đó thể hiện rõ hiệu quả của giản đồ lai hóa bậc hai để mở rộng vùng có từ thẩm âm. Vì vậy, việc điều chỉnh tỷ số d/td là chìa khóa để thu được bức tranh lai hóa bậc hai. Để làm sáng tỏ điều này, hai bộ số liệu mô phỏng được thực hiện để chứng minh ảnh hưởng của tỷ số tương tác trong và ngoài lên cộng hưởng từ đối với hệ hai lớp cặp đĩa: thứ nhất điều chỉnh khoảng cách giữa hai lớp đĩa (d) giữ cố định khoảng cách giữa hai đĩa trong một lớp (td) và sau đó là điều chỉnh khoảng cách td giữ cố định d .

Trong nghiên cứu này, các kết quả mô phỏng được thực hiện bởi phần mềm thương mại CST Microwave, dựa theo phương pháp tích phân hữu hạn (FIT - finite integration technique). Về cơ bản, để giải bài toán truyền sóng điện từ trong môi trường vật chất không đồng nhất, nguyên lý chung là chia nhỏ cấu trúc siêu vật liệu thành những phần tử đồng nhất, sau đó tính toán sự truyền sóng điện từ cho các phần tử này. Nhờ đó, ta thu được các thông tin về các thông số tán xạ (truyền qua, phản xạ và pha của chúng) cũng như các đặc trưng về dòng và năng lượng... Từ các thông số tán xạ, các tham số của trường điện từ (độ

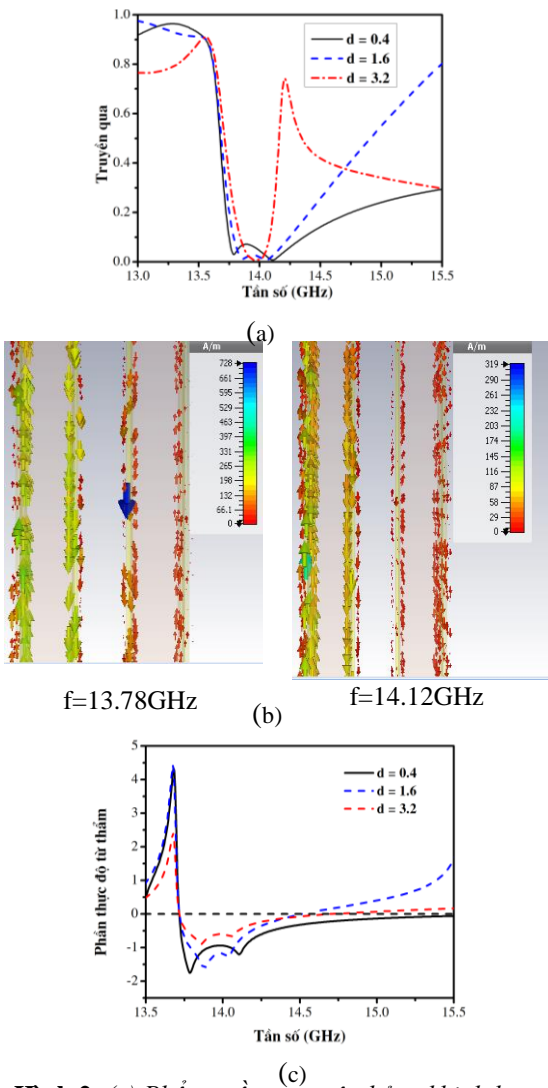
từ thẩm, chiết suất...) được tính toán nhờ thuật toán của Chen [13].

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 2(a) trình bày phổ truyền qua mô phỏng phụ thuộc vào khoảng cách hai lớp d khi td được giữ cố định ở 0,4 mm. Kết quả chỉ ra rằng khi cường độ liên kết bên ngoài được xem là yếu hơn so cường độ liên kết bên trong ($d = 3,2$ mm), chỉ xuất hiện một đỉnh cộng hưởng từ ban đầu ở 14 GHz. Nếu cường độ bên ngoài mạnh dần bằng cách giảm d , cộng hưởng từ dần dần được mở rộng. Khi cường độ liên kết nội và ngoại có thể so sánh với nhau ($d = 1,6$ mm), sự tách cộng hưởng là gần như hoàn toàn (tách thành hai đỉnh không truyền qua được xuất hiện tại 13,78 và 14,12 GHz) và vùng cộng hưởng được mở rộng. Để hiểu rõ nguyên nhân của hai mode mới này, mô phỏng phân bố dòng tại hai tần số này được thực hiện và đưa ra trên hình 2(b). Trên hình 2(b) chỉ ra rằng tại tần số cộng hưởng 13,78 GHz và 14,12 GHz các dòng trong từng cặp đĩa đều là đối song. Điều này có nghĩa là xuất hiện dòng điện kín chạy trong cặp dây. Theo các nghiên cứu trước đây [2], đó là cộng hưởng từ có khả năng cho độ từ thẩm âm. Vì thế vùng có độ từ thẩm âm có thể được mở rộng. Điều này được khẳng định thêm khi quan sát kết quả tính toán (theo thuật toán của Chen) vùng từ thẩm được đưa ra trên hình 2(c). Rõ ràng, cộng hưởng từ bắt đầu bị tách khi giảm d và vùng có độ từ thẩm âm là rộng hơn đáng kể khi d có thể so sánh với td .

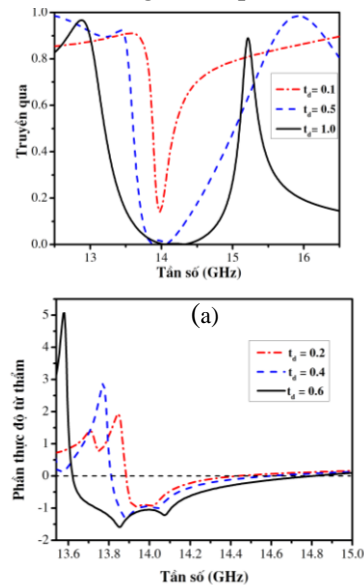
Ngoài ra khi quan sát phân bố dòng trong hình 2(b) còn cho thấy trong trường hợp tại tần số 13,78 GHz dòng điện kín trong cặp đĩa thứ nhất đối song với cặp đĩa còn lại (có năng lượng thấp hơn) và ngược lại dòng điện kín trong cặp đĩa thứ nhất song song với cặp đĩa còn lại tại tần số 14,12 GHz (có mức năng lượng cao hơn). Sự quyết định mức năng lượng cao hay thấp này là do kết quả cạnh tranh giữa tương tác điện và tương tác từ [9]. Theo [9], khi tương tác nào chiếm ưu thế thì mức năng lượng thấp sẽ tương ứng với các

lưỡng cực liền kề nhau phải là đối song và ngược lại. Trong trường hợp này tại tần số thấp hơn 13,78 GHz (năng lượng thấp) lưỡng cực điện trong thanh thứ hai và thứ ba là cùng chiều, còn hai lưỡng cực từ là ngược chiều. Còn tại tần số cao hơn 14,12 GHz (năng lượng cao) lưỡng cực điện trong tất cả các thanh liền kề là ngược chiều, còn hai lưỡng cực từ là cùng chiều. Vì vậy có thể kết luận rằng tương tác chiếm ưu thế ở đây là tương tác từ.

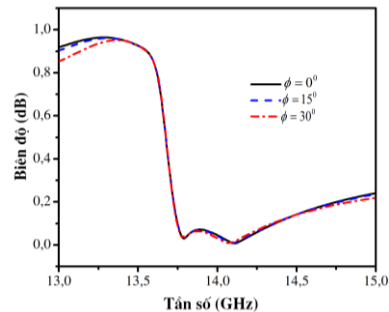


Hình 2. (a) Phổ truyền qua mô phỏng khi d thay đổi từ 0,4 mm đến 3,2 mm (b) Phân bố dòng trong các đĩa tại hai mode cộng hưởng (c) sự phụ thuộc của phần thực độ từ thâm vào d , t_d được giữ cố định ở 0,4 mm. Tất cả các tham số khác không thay đổi

Trong bộ số liệu mô phỏng thứ hai, ảnh hưởng của tỷ số tương tác trong và ngoài lên vùng cộng hưởng được khảo sát bằng cách thay đổi t_d trong khi cố định $d = 1,6$ mm. Hình 3(a) là phổ truyền qua mô phỏng của cấu trúc hai lớp cặp đĩa phụ thuộc vào t_d . Rõ ràng, vùng cộng hưởng rộng hơn đáng kể khi t_d tăng từ 0,1 đến 1,0 mm. Sự tách đỉnh cộng hưởng bắt đầu xuất hiện trong phổ mô phỏng ứng với $t_d = 0,5$ mm (với hai vùng không truyền qua tại 13,8 GHz và 14,2 GHz). 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.



Hình 3. Phổ truyền qua (a) mô phỏng t_d thay đổi từ 0,1 mm đến 1,0 mm, (b) Sự phụ thuộc của phần thực độ từ thâm vào d , giữ cố định $d = 1,6$ mm trong khi t_d biến đổi. Tất cả các tham số khác không thay đổi.



Hình 4. Phổ truyền qua mô phỏng vật liệu cấu trúc đĩa hai lớp khi góc phân cực của sóng điện từ thay đổi từ 0^0 tới 30^0 .

Khi cường độ tương tác nội có thể so sánh với cường độ tương tác ngoại, lai 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. Kết quả tính toán độ từ thẩm được đưa ra trên hình 3 (c) cho thấy sự mở rộng của vùng cộng hưởng này chính là sự mở rộng vùng có từ thẩm âm. Như vậy, bằng cách tăng td vùng có từ thẩm âm bị tách ra và được mở rộng bởi vì lai hóa bậc hai trở nên mạnh hơn.

Bằng việc sử dụng tính đối xứng của hình tròn, cấu trúc cặp đĩa được đề xuất để tạo ra sự đẳng hướng (không phụ thuộc vào phân cực của sóng điện từ) đối với vùng mở rộng độ từ thẩm âm. Hình 4 mô phỏng phổ truyền qua của cấu trúc đĩa hai lớp (khoảng cách hai lớp $d = 0,4$ mm, $td = 0,4$ mm) khi góc phân cực của sóng điện từ thay đổi từ 0^0 tới 30^0 . Kết quả mô phỏng cho thấy vùng từ thẩm âm mở rộng hoàn toàn không phụ thuộc vào phân cực. Kết quả này cho thấy ưu điểm của cấu trúc cặp đĩa so với cấu trúc cặp dây bị cắt trong nghiên cứu trước đây [10], [11].

KẾT LUẬN

Kết quả trong các hình 2 và 3 chứng tỏ rằng các hưởng ứng điện từ của cấu trúc cặp đĩa hai lớp có thể được thể hiện qua sự tương tác nội (tương tác giữa hai đĩa trong một lớp) và ngoại (tương tác giữa hai lớp cặp đĩa). Độ từ thẩm âm rộng chỉ được kích hoạt khi hai tương tác này có năng lượng có thể so sánh với nhau. Trong cả hai bộ số liệu trên, vùng có độ từ thẩm âm tăng đáng kể (khoảng từ 3% đến 13%) khi giảm d hoặc tăng td . Các kết quả này cũng chứng minh rằng tỉ số d/td là yếu tố quyết định cường độ lai hóa trong hệ cặp đĩa hai lớp. Các kết quả nghiên cứu trên hình 4 cho thấy khi sử dụng cấu trúc đĩa hai lớp sự mở rộng của vùng có độ từ thẩm âm không phụ thuộc vào phân cực của sóng điện từ. Đây là cấu trúc tối ưu hơn các cấu trúc đã sử dụng trong nghiên cứu trước đây. Những kết quả này rất hữu ích cho việc tiến hành các thực nghiệm để thu được các hiệu ứng lai hóa của siêu vật liệu vào các ứng dụng.

Lời cảm ơn. Công trình này được thực hiện với sự hỗ trợ của đề tài Khoa học và Công nghệ Bộ giáo dục và Đào tạo B2015-TN05-01.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. A. C. Atre, A. Garcia-Etxarri, H. Alaeian, and J. A. Dionne (2013), "A broadband negative index metamaterial at optical frequencies," *Adv. Opt. Mater.*, 1, p. 327
2. A. Ourir and H. H. Ouslimani (2011), "Negative refractive index in symmetric cut-wire pair metamaterial", *Apply Phys. Lett.* 98, p. 113505.
3. B. Kanté, S. N. Burokur, A. Sellier, A. de Lustrac and J.-M. Lourtioz (2009), "Controlling plasmon hybridization for negative refraction metamaterials", *Phys. Rev. B*, 79, p. 075121.
4. C. Hu, X. N. Chen, and X. G. Luo (2008), "Expanding the band of negative permeability of a composite structure with dual-band negative permeability," *Opt. Express*, 16, p. 21544.
5. 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, p. 1647.
6. D. Smith, W. J. Padilla, D. Vier and S. Schultz (2000), "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity", *Phys. Rev. Lett.*, 84, p. 4184.
7. J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs (1996), "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures," *Phys. Rev. Lett.*, 76, p. 4773 .
8. N. Adam, F. Stephen (1969), *Microwave theory and applications*, Prentice Hall, USA.
9. N. Liu and H. Giessen (2010), "Coupling effects in optical metamaterials," *Angew. Chem. Int. Ed.*, 49, p. 9838.
10. N. T. Tung, D. T. Viet, P. Lievens, and V. D. Lam (2012), "Broadband negative permeability by hybridized cut-wire pair meta-materials," *Appl. Phys. Express*, 5, p. 112001.
11. 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, p. 083104.
12. V. G. Veselago (1968), "The electrodynamics of substances with negative ϵ and μ ", *Sov. Phys. Usp.*, 10, p. 509.
13. X. Chen, T. M. Grzegorzczuk, J. Pacheco, Jr., and J. A. Kong (2004), "Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials," *Phys. Rev. E.*, 70, p. 016608.

SUMMARY

BROADBAND NEGATIVE PERMEABILITY BY HYBRIDIZED SYMMETRIC STRUCTURE METAMATERIALS USED TO SIMULATED METHOD

**Nguyen Thi Hien^{1*}, Nguyen Xuan Ca¹, Pham Minh Tan¹,
Nguyen Trung Kien¹, Nguyen Thi May¹, Vu Dinh Lam²**

¹University of Sciences - TNU, ²Institute of Materials Science

In our recent work [10] [11], we have shown that a broad negative refraction band can be achieved by using combine structure two layer with hybridized metamaterials. By exploiting the interaction between two identical CWP monomers, a hybridized magnetic resonance is predicted to split up and the frequency range that shows a negative permeability becomes wider. However, with CWP two layer the extension area is strongly dependent on the polarization of electromagnetic waves. In this report, we present the results of the optimization study of the magnetic resonance structure extension to overcome the above limitations. These results are useful for conducting experiments to obtain the hybridization effects of Metamaterials on applications.

Keywords: *Metamaterials; dish-pair structure; broadband negative permeability, hybridized, GHz*

Ngày nhận bài: 01/9/2017; Ngày phản biện: 18/9/2017; Ngày duyệt đăng: 16/10/2017

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