

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VẬT LIỆU BIẾN HÓA (METAMATERIAL) HẤP THỤ HAI CHIỀU SÓNG ĐIỆN TỪ DỰA TRÊN CẤU TRÚC CẶP VÒNG XUYẾN

Phạm Thị Trang^{1,*}, Tống Bá Tuấn¹, Trịnh Thị Giang²,

Nguyễn Minh Nguyệt², Dư Thị Xuân Thảo¹

Tóm tắt: Cấu trúc của vật liệu biến hóa hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ thường bao gồm 3 lớp, lớp điện môi ở giữa, hai bên là kim loại. Các nghiên cứu trước đây cho thấy, độ hấp thụ của vật liệu chủ yếu dựa trên việc điều khiển cộng hưởng từ tạo bởi dòng đối song giữa cấu trúc cộng hưởng mặt trước và tấm kim loại mặt sau. Tuy nhiên, với các cấu trúc này, vật liệu này chỉ hấp thụ sóng điện từ theo một chiều xác định mà không hấp thụ theo chiều ngược lại dẫn đến một số hạn chế trong ứng dụng thực tế. Trong việc nỗ lực tìm kiếm vật liệu hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ hai chiều với góc phân cực đẳng hướng, bài báo này chúng tôi tập trung nghiên cứu và thiết kế vật liệu biến hóa dựa trên cấu trúc cặp vòng xuyên. Với ý tưởng này, vật liệu hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ được tạo ra dựa trên sự kết hợp của tổn hao cộng hưởng điện và cộng hưởng từ xảy ra trên vật liệu. Phương pháp nghiên cứu sử dụng trong bài báo này là sự kết hợp giữa phương pháp mô phỏng và thực nghiệm.

Từ khóa: Vật liệu biến hóa; Vật liệu hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ; Vật liệu hấp thụ hai chiều sóng điện từ.

1. MỞ ĐẦU

Vật liệu biến hóa hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ (MPA - Metamaterial Perfect Absorber) được đề xuất và chứng minh đầu tiên vào năm 2008 bởi Landy và các cộng sự [1]. Landy đã chứng minh được vật liệu biến hóa có thể hấp thụ hoàn toàn năng lượng sóng điện từ và không phản xạ. Vật liệu này có cấu trúc nhân tạo và có thể điều khiển được tính chất vật liệu thông qua thay đổi cấu trúc cũng như các tham số cấu trúc của vật liệu [2-5]. Để khai thác tính chất của vật liệu này, rất nhiều cấu trúc của MPA đã được đề xuất, nghiên cứu. Các nhà khoa học đã thành công trong việc nghiên cứu chế tạo vật liệu đơn đỉnh, đa đỉnh, dải tần làm việc rộng hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ [6-10] hoạt động trải dài từ vùng GHz đến vùng quang học, nhằm ứng dụng trong thực tiễn như pin mặt trời [11], thiết bị khoa học [12], các thiết bị quân sự [13]. Tuy nhiên, các cấu trúc này chỉ hấp thụ sóng điện từ theo một chiều mà không hấp thụ theo chiều ngược lại dẫn đến hạn chế trong ứng dụng thực tế. Với mong muốn tìm kiếm vật liệu hấp thụ hai chiều sóng điện từ, nhóm tác giả đã thiết kế cấu trúc đối xứng theo từng cặp, dựa trên cấu trúc kim cương, cấu trúc hình vuông [14, 15]. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất cấu trúc có tính đối xứng cao hơn đó là cấu trúc cặp vòng xuyên. Ứng với cấu trúc này, chúng tôi đã thành công trong việc chế tạo MPA hấp thụ hai chiều sóng điện từ với góc phân cực đẳng hướng bằng sự kết hợp giữa tổn hao cộng hưởng điện và cộng hưởng từ của vật liệu.

2. MÔ PHỎNG & THỰC NGHIỆM

2.1. Thiết kế, mô phỏng

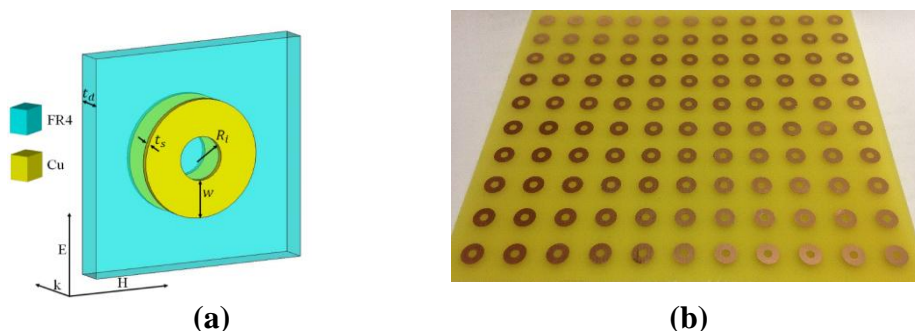
Ô cơ sở của vật liệu được thiết kế và trình bày trên hình 1a, cấu trúc gồm 3 lớp: kim loại - điện môi - kim loại. Lớp kim loại được chọn là đồng (Cu) với độ dẫn điện $\sigma = 5.8.10^7 S/m$. Lớp điện môi là vật liệu FR-4 với hằng số điện môi $\epsilon = 4.3$. Hằng số mạng theo trục x, y có giá trị tương ứng là $a_x = a_y = a = 10mm$. Độ dày lớp điện môi và lớp kim loại đồng lần lượt là $t_d = 1.2mm$, $t_s = 0.036mm$. Lớp kim loại được thiết kế dưới dạng hình vòng xuyên với bán kính trong $R_i = 1mm$, bán kính ngoài $R_o = 2.7mm$.

Để thiết kế và mô phỏng các tính chất của vật liệu, nhóm tác giả sử dụng phần mềm thương mại CST Microwave studio [16]. Sóng điện từ được chiếu theo hướng vuông góc sao cho điện trường, từ trường lần lượt song song với trục y và trục x như hình 1(a). Điều kiện biên được thiết lập tuần hoàn trên mặt phẳng xOy . Dải tần số hoạt động của sóng điện từ trong khoảng 12-24GHz.

2.2. Chuẩn bị mẫu và phép đo

Vật liệu ban đầu để chế tạo mẫu đó là một bản mạch in thương mại PCB (Printed circuit board). Đối với vật liệu biến hóa hoạt động ở dải tần số GHz, chúng tôi sử dụng công nghệ quang khắc [17] để chế tạo mẫu. Hình 1b trình bày mẫu chế tạo hoạt động ở vùng GHz với các thông số được giới thiệu ở mục 2.1.

Để nghiên cứu các tính chất của vật liệu, chúng tôi tiến hành đo phổ truyền qua và phổ phản xạ của vật liệu bằng hệ thiết bị phân tích mạng véc tơ Vector Network Analyzer. Từ kết quả phổ truyền qua và phản xạ, ta sẽ tính được độ hấp thụ của vật liệu [1].



Hình 1. (a) Ô cơ sở và sự phân cực sóng điện từ, (b) Mẫu chế tạo với các tham số cấu trúc: $a = 10\text{mm}$, $R_i = 1\text{mm}$, $R_o = 2.7\text{mm}$, $t_d = 1.2\text{mm}$, $t_s = 0.036\text{mm}$.

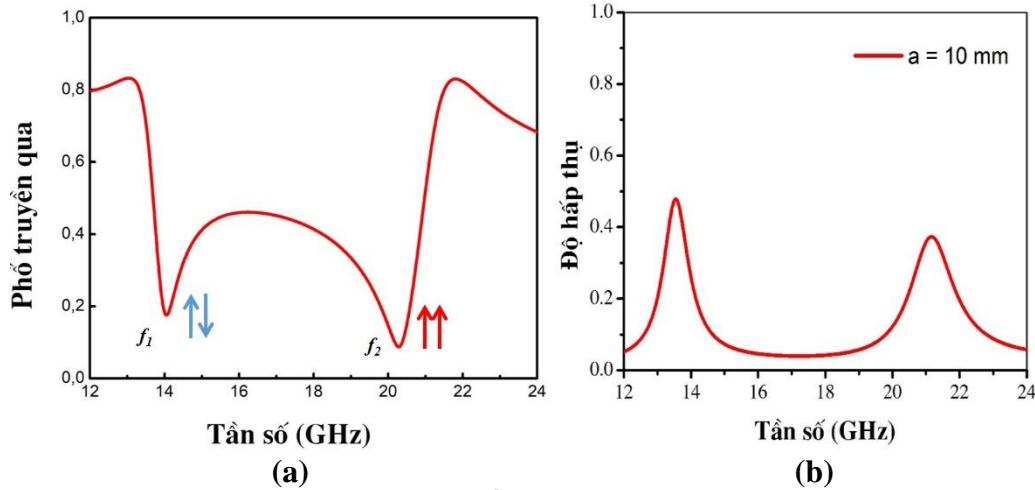
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 2a trình bày kết quả mô phỏng phổ truyền qua của vật liệu biến hóa cấu trúc vòng xuyên. Phổ truyền qua có 2 cộng hưởng cơ bản, trong đó cộng hưởng tần số thấp (f_1) là cộng hưởng từ, cộng hưởng tần số cao (f_2) là cộng hưởng điện. Tương ứng với 2 cộng hưởng của phổ truyền qua là sự xuất hiện 2 đỉnh hấp thụ được trình bày trên hình 2b. Kết quả cho thấy, đỉnh thứ nhất độ hấp thụ có giá trị 52% trong khi đỉnh hấp thụ thứ hai có giá trị 38%. Kết quả cho thấy, tại 2 tần số này độ hấp thụ của vật liệu có giá trị rất thấp. Do vậy, để vật liệu có tính hấp thụ cao hơn, chúng tôi dịch chuyển 2 tần số này lại gần nhau cho tới khi chúng chồng chập lên nhau. Khi đó, độ hấp thụ sẽ là tổng độ hấp thụ của hai cộng hưởng.

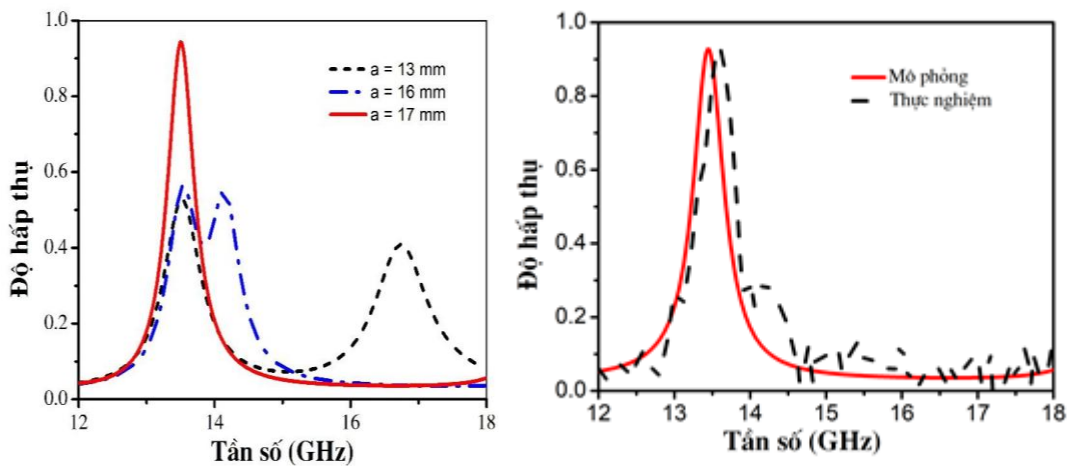
Như ta đã biết, vật liệu biến hóa với ưu điểm là vật liệu có cấu trúc nhân tạo và có thể điều khiển được độc lập cộng hưởng điện và cộng hưởng từ thông qua điều khiển các tham số cấu trúc dựa trên mô hình của Zhou [18]. Mô hình này cho thấy, nếu như tần số cộng hưởng từ phụ thuộc mạnh vào kích thước của cấu trúc cộng hưởng thì tần số cộng hưởng điện phụ thuộc mạnh vào sự thay đổi hằng số mạng a . Với mục đích điều khiển tần số cộng hưởng điện về cộng hưởng từ, từ mô hình Drude [19] có thể thấy, việc tăng hằng số mạng a trong cấu trúc cặp vòng xuyên dẫn đến sự giảm đáng kể mật độ điện tử hiệu dụng khiến cho tần số plasma giảm, tương ứng tần số cộng hưởng điện giảm. Trong khi đó, khi a thay đổi, tần số cộng hưởng từ không đổi. Dựa trên lập luận đó, khi tăng hằng số mạng a đến một giá trị thích hợp tần số cộng hưởng điện sẽ chồng chập với cộng hưởng từ.

Để kiểm định tính xác thực của lập luận lý thuyết, chúng tôi tiến hành mô phỏng phổ

hấp thụ của vật liệu cấu trúc hình vòng xuyên với hằng số mạng a tăng dần trong khi đó các tham số khác được giữ không đổi. Quan sát phổ hấp thụ trên hình 3 có thể thấy kết quả mô phỏng thu được đúng như lập luận lí thuyết, khi a tăng cộng hưởng điện dịch về tần số thấp trong khi cộng hưởng từ gần như không thay đổi. Cụ thể tần số cộng hưởng điện ứng với $a = 10, 13, 16, 17\text{mm}$ theo thứ tự lần lượt là 20.16, 16.82, 14.34, 13.52GHz. Ngoài ra, khi hằng số mạng a tăng từ 10mm đến 17mm, độ hấp thụ của cộng hưởng từ vẫn dao động quanh giá trị 50% trong khi đó độ hấp thụ của cộng hưởng điện tăng từ 38% lên đến 50%.



Hình 2. Kết quả mô phỏng:
(a) Phổ truyền qua, (b) Phổ hấp thụ của cấu trúc vòng xuyên.



Hình 3. Phổ hấp thụ cấu trúc cặp vòng xuyên với hằng số mạng thay đổi từ $a = 13-17\text{ mm}$.

Hình 4. Phổ hấp thụ mô phỏng và thực nghiệm của vật liệu hấp thụ cấu trúc vòng xuyên.

Điều thú vị nhất là khi $a = 17\text{mm}$, tần số cộng hưởng điện chồng chập với cộng hưởng từ, kết quả thu được độ hấp thụ gần như tuyệt đối tại tần số $f = 13.5\text{GHz}$. Về phần thực nghiệm, tác giả tiến hành đo phổ hấp thụ của vật liệu ứng với hằng số mạng $a = 17\text{mm}$, kết quả thu được cho thấy phổ hấp thụ thực nghiệm khá phù hợp với kết quả mô phỏng (hình 4), điều đó khẳng định tính đúng đắn của mô hình nghiên cứu.

4. KẾT LUẬN

Bằng việc điều khiển hằng số mạng a , các tham số khác giữ không đổi, chúng tôi đã thiết kế và điều khiển được tính hấp thụ của vật liệu biến hóa dựa trên cộng hưởng điện và cộng hưởng từ sử dụng cấu trúc cặp vòng xuyên. Kết quả cho thấy tần số cộng hưởng từ và cộng hưởng điện của vật liệu có thể điều khiển được một cách độc lập. Vật liệu thu được độ hấp thụ lên tới 97% gần như tuyệt đối khi hai cộng hưởng điện và từ chồng chập lên nhau. Kết quả phổ hấp thụ thu được từ mô phỏng khá phù hợp kết quả thực nghiệm. Hơn nữa, đây là cấu trúc có tính đối xứng cao nên độ hấp thụ không phụ thuộc phân cực của sóng điện từ. Kết quả thu được trên hứa hẹn mang đến nhiều ứng dụng trong lĩnh vực quân sự ở vùng tần số Ra-đa. Từ việc thành công trong chế tạo vật liệu hấp thụ hai chiều sóng điện từ cấu trúc vòng xuyên ở tần số GHz, chúng tôi sẽ nghiên cứu vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ ở vùng tần số cao hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect metamaterial absorber", *Phys. Rev. Lett.*, **Vol. 100** (2008), pp. 207402-207408.
- [2]. B. Pendry, D. Schurig, D.R. Smith, "Controlling Electromagnetic Fields", *Science*, **Vol. 312** (2006), pp.1780-1782.
- [3]. N. T. Hien, Y. Sen. V. E. A. Guy, L. Peter, V. D. Lam, "Broadband negative refractive index obtained by plasmonic hybridization in metamaterials", *Appl. Phys. Lett.* **Vol. 109** (2016), pp. 221902.
- [4]. D. T. Viet, N. T. Hien, P. V. Tuong, N. Q. Minh, P. T. Trang, L. N. Le, Y. P. Lee, and V. D. Lam, "Perfect absorber metamaterials: peak, multi-peak and broadband absorption", *Opt. Comm.*, **Vol. 322** (2014), pp. 209-213.
- [5]. J. W. Park, P. V. Tuong, J. Y. Rhee, K. W. Kim, W. H. Jang, E. H. Choi, L. Y. Chen anh Y. P. Lee, "Multi – band metamaterial absorber based on the arrangement of donut – type resonators" *Opt. Exp.*, **Vol. 21**, No. 8, pp. 9691-9702.
- [6]. Y. J. Yoo, Y. J. Kim, P. V. Tuong, J. Y. Rhee, K. W. Kim, W. H. Jang, and Y. Lee, "Polarization-independent dual-band perfect absorber utilizing multiple magnetic resonances", *Opt. Exp.*, **Vol. 21**, No. 26 (2013), pp. 32484-32490.
- [7]. Young Ju Kim, Young Joon Yoo, Ki Won Kim, Joo Yull Rhee, Yong Hwan Kim, and YoungPak Lee, "Dual broadband metamaterial absorber", *Opt. Exp.*, **Vol. 23**, No. 4 (2015), pp. 3861-3868.
- [8]. Z. H. Jiang, S. T. Yun, D. H. Werner, and T. S. Mayer, "Conformal Dual-Band Near-Perfectly Absorbing Mid-Infrared Metamaterial Coating", *ACS Nano*, **Vol. 5**, No. 6 (2011), pp 4641-4647.
- [9]. L. M. Anh, P. T. Trang, D. M. Tuan, N. T. Tung, V. D. Lam, "An optimal design towards metamaterial perfect absorber at THz frequencies", *The 7th International Workshop on Advanced Materials Science and Nanotechnology (IWAMSN 2014)*, 2-6 November, Ha Long City, Vietnam, pp. 180-187.
- [10]. Y. Cui, K. Hung, J. Xu, H. Ma, Y. Jin, S. He, N. X. Fang, "Ultrabroadband Light Absorption by a Sawtooth Anisotropic Metamaterial Slab", *Nano Lett.*, **Vol. 12** (2012), pp. 1443–1447.
- [11]. J. N. Munday and H. A. Atwater, "Large integrated absorption enhancement in plasmonic solar cells", *Nano Lett.*, **Vol. 11** (2011), pp 2195-2201.
- [12]. B. S. Tung, D. D. Thang, D. H. Luu, V.D. Lam, Akihiko Ohi, Toshihide Nabatame, Y.P. Lee, Tadaaki Nagao, H.V. Chung, "Metamaterial-enhanced vibrational absorption spectroscopy for the detection of protein molecules", *Sci. Rep.*, **Vol. 6** (2016), p. 32123.

- [13]. D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S.A. Cummer, J. B. Pendy, A.F. Starr, D.R. Smith, "RIG-I-mediated antiviral responses to singlestranded RNA bearing 5'-phosphates", *Science*, **Vol. 314** (2006), pp.997-1001.
- [14]. D. T. Anh, D. T. Viet, P. T. Trang, N. M. Thang, H. Q. Quy, N. V. Hieu, V. D. Lam, N. T. Tung, "Taming electromagnetic metamaterials for isotropic perfect absorbers", *AIP. Adv*, **Vol. 5**, (2015), pp. 077119-077127.
- [15]. D. T. Viet, N. V. Hieu, V. D. Lam, and N. T. Tung, "Isotropic metamaterial absorber using cut-wire-pair structures", *Appl. Phys. Exp.*, **Vol. 8** (2015), pp. 032001-032004.
- [16]. CST, "Computer Simulation Technology 3D EM Field Simulation", <http://www.cst.com/>
- [17]. Đ. T. Việt, Luận án Tiến sỹ, "Nghiên cứu chế tạo và tính chất hấp thụ tuyệt đối sóng vi ba của vật liệu meta (Metamaterial)", ĐHBK Hà Nội (2015), pp. 51-55.
- [18]. J. Zhou, E. N. Economon, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Unifying approach to left-handed material design", *Opt. Lett.*, **Vol. 31**, No. 24 (2006), pp. 3620-3622.
- [19]. S. A. Ramakrishna and T. M. Grzegorzczuk, "Physics and Applications of Negative Refractive Index Materials", CRC Press, New York (2009).

ABSTRACT

2D METAMATERIAL ABSORBER BASE ON RING STRUCTURE

The conventional structure of a electromagnetic wave metamaterial perfect absorber consists of three layers: Metal – Dielectric - Metal. In the previous investigations, the absorption depends only on the tuning of magnetic resonance which was created by the anti- parallel currents on the resonator and the metal background. However, this results show that the metamaterial only absorbs electromagnetic waves in one direction and don't absorb with the opposite direction of electromagnetic waves. This leads to several limitations in the practical applications. In this paper, based on using the ring structure, a metamaterial absorber in order to obtain the MPA which absorbs electromagnetic wave in double directions with isotropic polarization is studied and designed. MPA was created by applying the energy loss for the electric resonance and magnetic resonance on the structure. In this paper, the combination method of simulation and experiment is used.

Keywords: Metamaterial; Metamaterial perfect absorber; 2D metamaterial absorber based on ring structure.

Nhận bài ngày 27 tháng 02 năm 2018

Hoàn thiện ngày 19 tháng 3 năm 2018

Chấp nhận đăng ngày 25 tháng 3 năm 2018

Địa chỉ: ¹ Khoa Khoa học cơ bản, Trường Đại học Mỏ - Địa chất;

² Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

*Email: trang.phamthi78@gmail.com