

FLEXIBLE BROADBAND METAMATERIAL ABSORBER BASED ON MULTILAYER STRUCTURE IN GHz FREQUENCY RANGE

Do Thuy Chi¹, Duong Thi Ha¹, Bui Xuan Khuyen^{2,3}, Bui Son Tung^{3*},
Ngo Nhu Viet³, Vu Thi Hong Hanh¹, Vu Dinh Lam³

¹TNU - University of Education, ²Institute of Materials Science - Vietnam Academy of Science and Technology

³Graduate University of Science and Technology - Vietnam Academy of Science and Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	26/10/2024	In this work, we propose a flexible, broadband metamaterial absorber using a multilayer structure. Each layer of the proposed metamaterial absorber is designed to consist of simple resonant structures made from graphene conductive ink placed on a flexible polyimide dielectric layer. These two structural layers are stacked to form a multilayer structure. Simulation results show that in the flat state, the material absorbs over 90% of the incident electromagnetic waves in the frequency range from about 4.6 to 12.7 GHz, equivalent to a fractional bandwidth of 93.6%. In the case of bending state, the absorption spectrum is extended to a fractional bandwidth of 116.5%, from 4.26 to 16.14 GHz with a bending radius of 100 mm. The broadband absorption mechanism of the material is clarified by the impedance matching theory and electromagnetic energy distribution.
Revised:	29/11/2024	
Published:	30/11/2024	
KEYWORDS		
Metamaterial absorber		
Multilayer metamaterial absorber		
Broadband metamaterial absorber		
Flexible metamaterial		
GHz region		

VẬT LIỆU BIẾN HÓA CẤU TRÚC ĐA LỚP HẤP THỤ BẰNG TẦN RỘNG, CÓ TÍNH NĂNG ĐÀN HỒI HOẠT ĐỘNG TRONG VÙNG TẦN SỐ GHz

Đỗ Thùy Chi¹, Dương Thị Hà¹, Bùi Xuân Khuyển^{2,3}, Bùi Sơn Tùng^{3*},
Ngô Như Việt³, Vũ Thị Hồng Hạnh¹, Vũ Đình Lâm³

¹Trường Đại học Sư phạm - ĐH Thái Nguyên, ²Viện Khoa học Vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

³Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	26/10/2024	Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ băng tần rộng, có tính năng đàn hồi sử dụng cấu trúc đa lớp. Mỗi lớp của vật liệu đề xuất được thiết kế bao gồm các cấu trúc cộng hưởng đơn giản được làm từ mực in dẫn điện graphene đặt lên trên lớp điện môi polyimide mềm dẻo. Hai lớp cấu trúc đồng nhất này được xếp chồng lên nhau tạo thành cấu trúc dạng đa lớp. Kết quả mô phỏng cho thấy, ở trạng thái phẳng vật liệu hấp thụ trên 90% sóng điện từ trong dải tần số từ khoảng 4,6 đến 12,7 GHz, tương đương với băng thông tương đối là 93,6%. Khi ở trạng thái uốn cong, phổ hấp thụ được mở rộng hơn so với phổ hấp thụ ở trạng thái phẳng với độ rộng băng thông tương đối lên tới 116,5 %, tương ứng độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số từ 4,26 đến 16,14 GHz, khi bán kính uốn là 100mm. Cơ chế hấp thụ băng tần rộng của vật liệu được làm rõ bằng lý thuyết phối hợp trở kháng, phân bố dòng điện bề mặt và phân bố năng lượng điện từ trường.
Ngày hoàn thiện:	29/11/2024	
Ngày đăng:	30/11/2024	
TỪ KHÓA		
Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ		
Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ đa lớp		
Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ đàn hồi		
Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ băng thông rộng		
Vùng GHz		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11409>

* Corresponding author. Email: tungbs@ims.vast.ac.vn

1. Giới thiệu

Vật liệu biến hóa (Metamaterials – MMs) được biết đến là một loại vật liệu nhân tạo, được cấu thành bởi các giả nguyên tử - cấu trúc cộng hưởng, có kích thước nhỏ hơn bước sóng, hoạt động sắp xếp tuần hoàn. MMs có độ điện thẩm và độ từ thẩm có thể được điều chỉnh một cách chủ động bằng cách thay đổi hình dạng hoặc các tham số hình học của cấu trúc cộng hưởng. Đặc trưng này làm cho MMs có thể đạt được các tính chất điện từ mới lạ, không được tìm thấy trong các vật liệu tự nhiên như chiết suất âm, bức xạ Cherenkov ngược, hiệu ứng Doppler ngược, trong suốt cảm ứng điện từ,... [1] – [5]. MMs được tiên đoán về mặt lý thuyết lần đầu tiên bởi Veselago vào năm 1968 [6]. Đến năm 2000, Smith và cộng sự [1] đã chứng minh bằng thực nghiệm sự tồn tại của vật liệu chiết suất âm, kể từ đó MMs đã thu hút được sự quan tâm nghiên cứu mạnh mẽ của các nhà khoa học cả về lý thuyết, thực nghiệm và ứng dụng. Với những tính chất đặc biệt, MMs thể hiện tiềm năng ứng dụng to lớn trong nhiều lĩnh vực, từ dân sự đến quân sự, y tế,... [7] – [12].

Vật liệu hấp thụ sóng điện từ dựa trên vật liệu biến hóa (Metamaterial absorber - MA) đầu tiên đã được Landy và cộng sự [13] giới thiệu vào năm 2008. MA có những ưu điểm vượt trội so với các cấu trúc hấp thụ sóng điện từ truyền thống khác như màn hình Salisbury, bộ hấp thụ Jauman, màn hình Dallenbach, đó là kích thước nhỏ gọn, hiệu suất hấp thụ cao và khả năng điều khiển chủ động. Do đó, MA đã trở thành chủ đề nóng và đã được nghiên cứu cho các ứng dụng ở nhiều vùng tần số khác nhau, từ vùng tần số MHz đến vùng quang học [14] – [19]. Tuy nhiên, để ứng dụng MA trong thực tế, còn một số bài toán cần được giải quyết, trong đó phải kể đến việc mở rộng băng tần hấp thụ của MA. Để mở rộng băng tần hấp thụ, cấu trúc MA đa lớp đã được đề xuất. Trong cấu trúc đa lớp, các đỉnh hấp thụ riêng biệt của các lớp có thể chồng lấn một phần lên nhau hoặc các lớp cấu trúc cộng hưởng sẽ tương tác với nhau để tạo thành phổ hấp thụ băng tần rộng. Nhóm tác giả Bùi Xuân Khuyến và cộng sự [20] đã đề xuất MA đa lớp bao gồm hai lớp cộng hưởng được chế tạo bằng đồng và điện môi FR-4. Cấu trúc này có độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số từ 4,84 đến 5,02 GHz, với hai đỉnh hấp thụ cực đại ở 4,89 và 4,97 GHz. Băng thông của MA đa lớp vượt trội hơn băng thông của các MA đơn lớp riêng lẻ. Nhóm tác giả G. Deng và cộng sự [21] đã đề xuất một vật liệu MA băng tần rộng, không nhạy với phân cực và ổn định ở góc tới rộng dựa trên cấu trúc đa lớp. Vật liệu này có cấu trúc ba lớp, trong đó mỗi lớp được thiết kế gồm các cấu trúc cộng hưởng có hình dạng khác nhau, làm từ mực dẫn điện in lên trên lớp điện môi liên tục. Cấu trúc đa lớp này không chỉ mở rộng băng thông hấp thụ mà còn duy trì độ hấp thụ cao dưới các góc tới lớn. Mô phỏng cho thấy khả năng hấp thụ khi sóng điện từ tới theo phương vuông góc là trên 90% trong dải tần số từ 2,34 đến 18,95 GHz, tương ứng với băng thông hấp thụ tương đối là 156%. Mặc dù cấu trúc này thể hiện đặc tính hấp thụ băng tần rộng, tuy nhiên nó có hạn chế là độ dày tổng cộng lớn (11,3 mm), đồng thời vật liệu điện môi không đàn hồi nên hạn chế ứng dụng trong thực tế cho các bề mặt không phẳng.

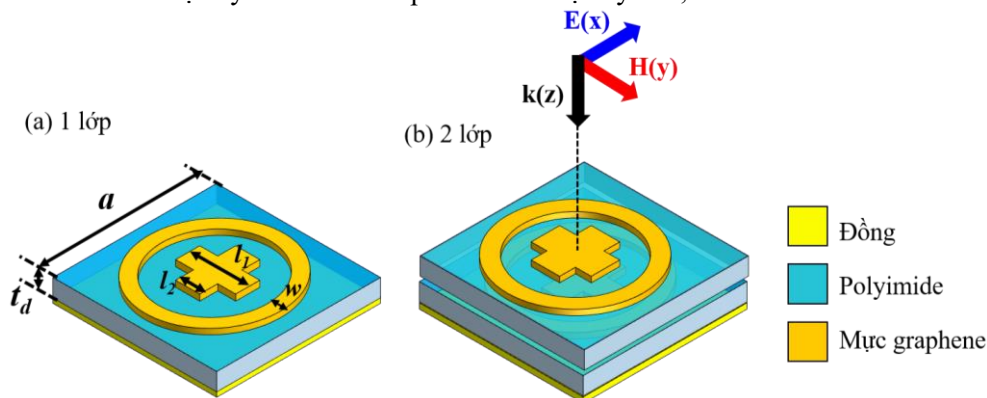
Bên cạnh việc mở rộng băng tần hấp thụ của MA, thiết kế các MA có tính năng đàn hồi cũng là một hướng nghiên cứu quan trọng hướng tới đưa MA vào các ứng dụng thực tiễn. Để trang bị đặc tính đàn hồi cho MA, các điện môi đàn hồi như polyimide, polyme, giấy và vật liệu dẫn điện như mực graphene và polyme dẫn điện đã được sử dụng để thay thế cho các lớp điện môi rắn và kim loại thông thường. Các cấu trúc này cho thấy khả năng có triển vọng tạo điều kiện cho nhiều ứng dụng hơn [22] – [26].

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một MA có cấu trúc dạng đa lớp, trong đó cấu trúc cộng hưởng được làm từ mực in graphene dẫn điện đặt trên tấm điện môi Polyimide đàn hồi. Vật liệu đề xuất thể hiện đặc tính hấp thụ băng tần rộng trong cả hai trạng thái phẳng và uốn cong.

2. Thiết kế và mô phỏng

Cấu trúc ô đơn vị của MA đơn lớp và đa lớp hoạt động trong vùng tần số GHz được mô tả trong Hình 1. MA đơn lớp có cấu trúc bao gồm một lớp mực in dẫn điện - điện môi đặt trên một lớp kim loại liên tục, với kích thước ô đơn vị là $a = 20$ mm. MA đa lớp được tạo ra bằng cách tăng số lượng

các lớp mực in dẫn điện - điện môi. Trong lớp mực in dẫn điện - điện môi, phần mực in dẫn điện được tạo hoa văn với cấu trúc gồm vòng cộng hưởng hình tròn và cấu trúc cộng hưởng dạng chữ thập. Lớp mực in này có độ dày là $t_g = 0,1$ mm và có điện trở bề mặt là $100 \Omega/\text{sq}$. Vòng cộng hưởng hình tròn có bán kính ngoài là 8 mm và độ rộng là $w = 1$ mm. Lớp điện môi liên tục được làm từ Polyimide có hằng số điện môi là 3,5 và độ tổn hao là 0,0027, độ dày của lớp điện môi là t_d . Lớp điện môi thứ nhất có độ dày là 1 mm và lớp thứ hai có độ dày là 2,9 mm.

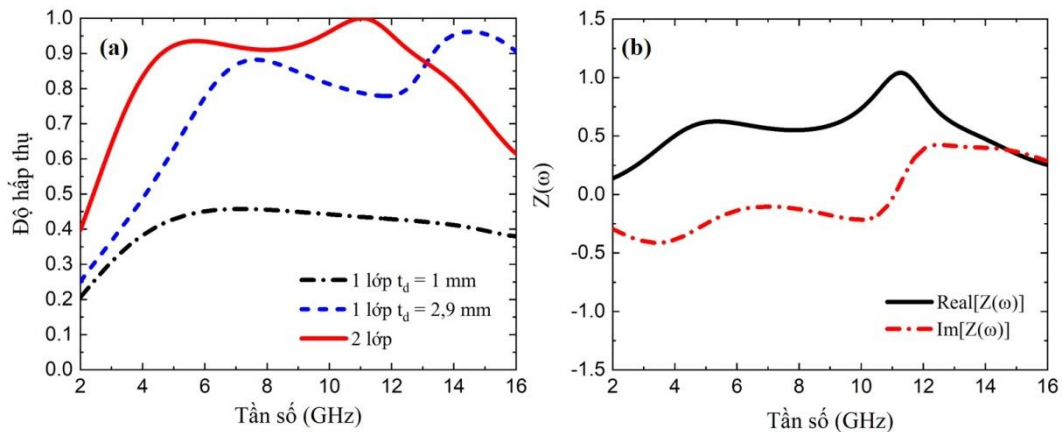


Hình 1. (a) Ô đơn vị của MA cấu trúc đơn lớp và (b) ô đơn vị của MA có cấu trúc đa lớp

Đặc trưng điện từ của MA đơn lớp và đa lớp được mô phỏng bằng phần mềm CST Microwave Studio 2023 [27]. Trong mô phỏng này, hệ phương trình Maxwell mô tả tương tác giữa vật liệu với sóng điện từ tới được giải bằng phương pháp tích phân hữu hạn. Sóng điện từ tới là sóng phẳng với véc tơ sóng k , được thiết lập vuông góc với bề mặt vật liệu, các thành phần véc tơ điện trường và từ trường có phương song song với hai cạnh của ô đơn vị. Trong quá trình mô phỏng, điều kiện biên tuần hoàn được thiết lập theo trục x và trục y (mặt phẳng **E-H**) và mở theo trục z . Kết quả mô phỏng được trích xuất dưới dạng các tham số tán xạ S_{11} và S_{21} . Độ hấp thụ của vật liệu, $A(\omega)$, được tính bởi công thức: $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$, trong đó $R(\omega) = |S_{11}|^2$ là độ phản xạ và $T(\omega) = |S_{21}|^2$ là độ truyền qua. Do vật liệu đề xuất có bao gồm lớp kim loại liên tục ở dưới cùng, thành phần truyền qua bị triệt tiêu, nên độ hấp thụ được tính một cách đơn giản bởi $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$. Ngoài ra, để đánh giá khả năng mở rộng băng tần hấp thụ của MA đa lớp, băng thông hấp thụ tương đối, FBW (Fractional Bandwidth) được tính toán sử dụng công thức $FBW(\%) = 2[(f_H - f_L)/(f_H + f_L)] \times 100$, trong đó từ tần số thấp nhất (f_L) đến tần số cao nhất (f_H) độ hấp thụ của vật liệu đạt trên 90%.

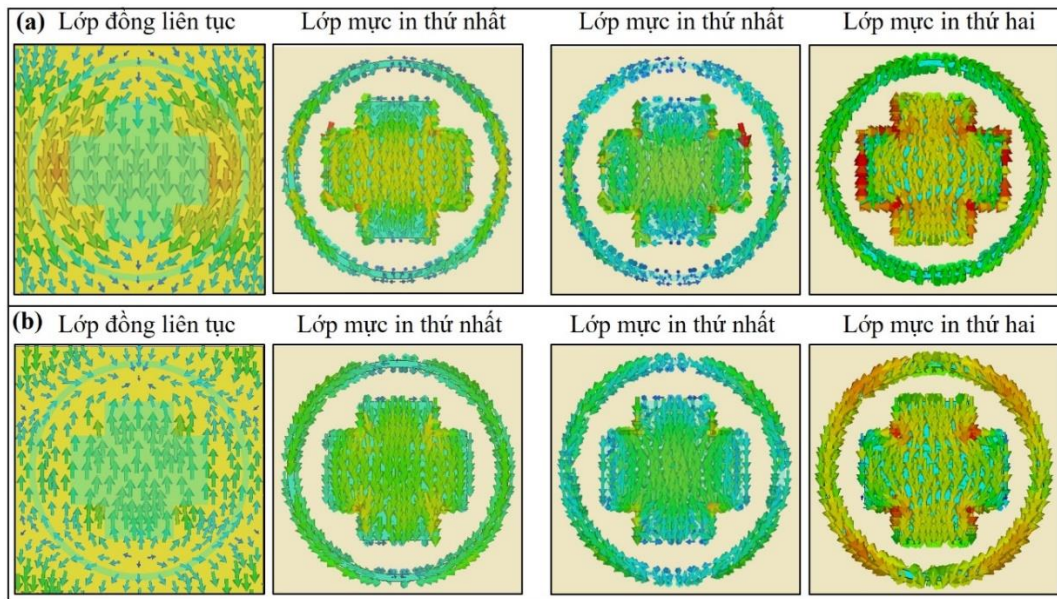
3. Kết quả và thảo luận

Để làm rõ vai trò của cấu trúc đa lớp trong việc mở rộng dải tần hấp thụ của vật liệu biến hóa, đầu tiên chúng tôi khảo sát đặc trưng hấp thụ của vật liệu đề xuất khi nó có cấu trúc dạng đơn lớp với độ dày lớp điện môi là $t_{d1} = 1,0$ mm và $t_{d2} = 2,9$ mm. Kết quả mô phỏng được trình bày trên Hình 2(a). Có thể thấy ở dạng đơn lớp, khi độ dày lớp điện môi là 1,0 mm, vật liệu có độ hấp thụ dưới 45% trong dải tần số mô phỏng từ 2 đến 16 GHz. Khi độ dày lớp điện môi là 2,9 mm, phổ hấp thụ của MA đơn lớp có hai đỉnh hấp thụ tại 7,6 và 14,5 GHz với cường độ lần lượt là 88,5% và 96,3%. Khi xếp chồng hai lớp cấu trúc cộng hưởng lên nhau, chúng tôi thu được MA đa lớp. Có thể quan sát thấy một đỉnh hấp thụ có độ hấp thụ xấp xỉ 100% tại 11,1 GHz, đồng thời độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần số từ 4,6 đến 12,7 GHz, tương ứng với độ rộng tỉ đối $FBW = 93,6\%$. So sánh với cấu trúc đơn lớp, MA đa lớp đã cải thiện độ hấp thụ đồng thời độ rộng phổ hấp thụ với cường độ trên 90% được mở rộng hơn. Điều kiện để đạt được độ hấp thụ cao là cần phải giảm phản xạ thông qua sự kết hợp trở kháng với môi trường không khí xung quanh. Hình 2(b) cho thấy sự kết hợp trở kháng của MA đa lớp ở tần số cộng hưởng 11,1 GHz. Phần thực và phần ảo của trở kháng hiệu dụng lần lượt bằng 1,01 và 0 tại 11,1 GHz, do đó, sự phản xạ của sóng điện từ là không đáng kể, dẫn đến độ hấp thụ gần 100%.



Hình 2. (a) Phổ hấp thụ của vật liệu MA đơn lớp đa lớp, (b) trở kháng hiệu dụng của MA đa lớp

Để làm rõ hơn tương tác giữa các lớp và cơ chế của sự mở rộng dải tần hấp thụ của cấu trúc đa lớp, chúng tôi mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt trên lớp kim loại và mực in dẫn điện tại tần số cộng hưởng. Kết quả được trình bày trong Hình 3. Có thể thấy tại cả hai tần số 5,78 và 11,1 GHz, dòng điện trên bề mặt lớp mực in dẫn điện thứ hai và lớp mực in thứ nhất có chiều ngược nhau. Dòng điện tại lớp mực in thứ nhất và lớp kim loại liên tục có chiều ngược nhau. Điều này chứng tỏ cộng hưởng từ được kích thích giữa các lớp mực in và giữa lớp mực in với lớp kim loại liên tục, từ đó đỉnh hấp thụ được hình thành và mở rộng.



Hình 3. Phân bố dòng điện bề mặt tại (a) 5,78 GHz và (b) 11,1 GHz

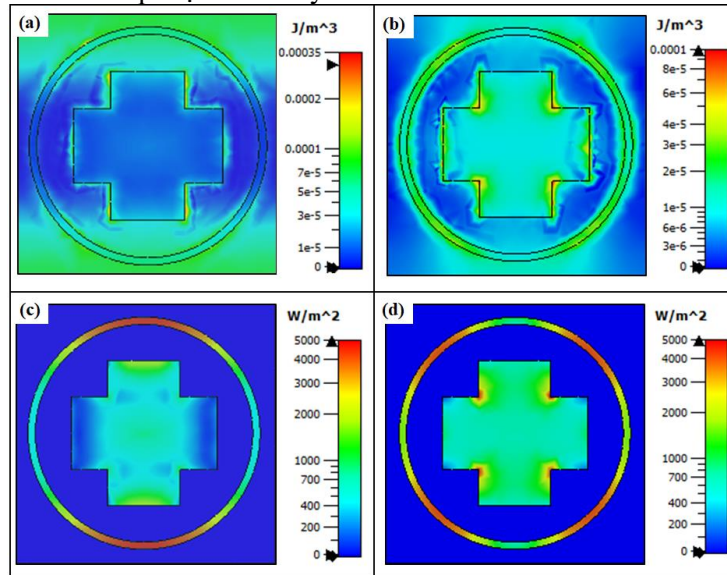
Cơ chế hấp thụ băng tần rộng của mẫu vật liệu đề xuất được làm rõ hơn qua kết quả mô phỏng phân bố năng lượng từ trường và phân bố tổn hao năng lượng bề mặt tại tần số 11,1 GHz (Hình 4). Hình 4(a) và (c) mô tả mật độ năng lượng từ và tổn hao năng lượng bề mặt trong lớp mực in dẫn điện ở lớp thứ nhất. Có thể thấy tại lớp này năng lượng bị tiêu tán mạnh trong cấu trúc cộng hưởng dạng vòng tròn, trong khi ở lớp thứ hai, tổn thất năng lượng tập trung tại cả cấu trúc cộng hưởng vòng tròn và bốn góc của cấu trúc cộng hưởng hình chữ thập. Do đó, phổ hấp thụ băng thông rộng của MA đa lớp được đề xuất có thể được giải thích bằng sự kết hợp hiệu quả của hiệu ứng cộng hưởng từ được kích hoạt tại các lớp vật liệu và việc sử dụng mực graphene có độ dẫn điện thấp (so với mực kim loại thông thường), đỉnh cộng hưởng hấp thụ được mở rộng và tăng

cường. Kết quả vật liệu đã đạt được độ hấp thụ cao (trên 90%) trên một băng tần rộng. Nói cách khác, cả tổn thất Ohmic (trong lớp mực in dẫn điện) và tổn thất điện môi đều là đóng góp vào sự hấp thụ băng tần rộng của MA đa lớp được đề xuất. Phân bố tổn hao năng lượng trong các lớp điện môi (P_d) và lớp mực in dẫn điện (P_m), có thể được tính toán bởi biểu thức:

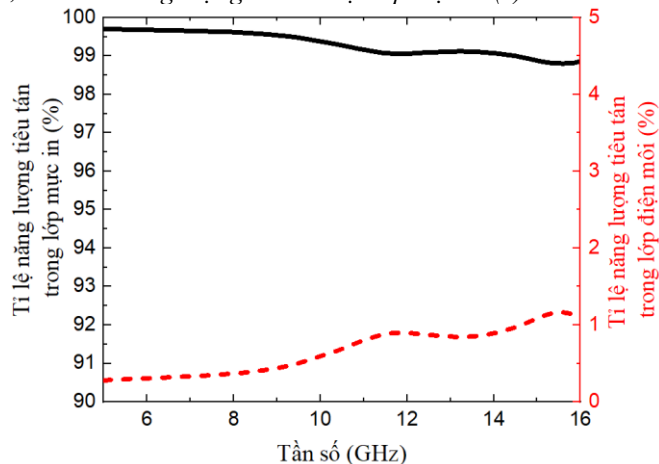
$$P_d = \pi \epsilon f \tan \delta \iiint_{V_d} |E|^2 dV \quad (1)$$

$$P_m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \mu f}{\sigma}} \iint_{S_m} |H|^2 dS. \quad (2)$$

Trong các biểu thức (1) và (2), V_d , ϵ và $\tan \delta$ lần lượt là thể tích, độ điện thẩm và độ tổn hao của lớp điện môi. S_m , μ và σ lần lượt là diện tích bề mặt, độ từ thẩm và độ dẫn điện của lớp mực in dẫn điện. f , E và H lần lượt là tần số, cường độ điện trường và cường độ từ trường của sóng phẳng tới [28]. Tương tự như các cấu trúc MA có cấu trúc cộng hưởng làm từ mực in dẫn điện khác đã được công bố [29], trong cấu trúc của chúng tôi tổn thất trong lớp mực in dẫn điện chiếm ưu thế hơn. Kết quả này thu được từ mô phỏng tỉ lệ năng lượng tiêu tán trên các lớp điện môi và lớp mực in dẫn điện được trình bày trên Hình 5. Có thể quan sát thấy trên 95% năng lượng sóng điện từ truyền vào bên trong vật liệu được tiêu tán trên lớp mực in dẫn điện, trong khi đó tỉ lệ năng lượng tiêu tán trên các lớp điện môi Polyimide chỉ chiếm dưới 5%.

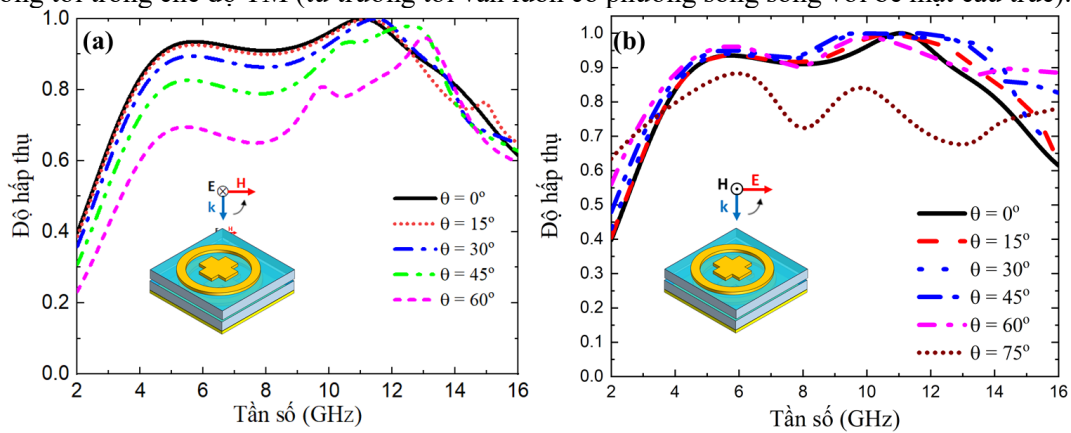


Hình 4. (a) và (b) Minh họa phân bố năng lượng từ trường tại 11,1 GHz của (a) lớp thứ nhất và (b) lớp thứ hai; Phân bố năng lượng tổn hao tại lớp mực in (c) thứ nhất và (b) lớp thứ hai

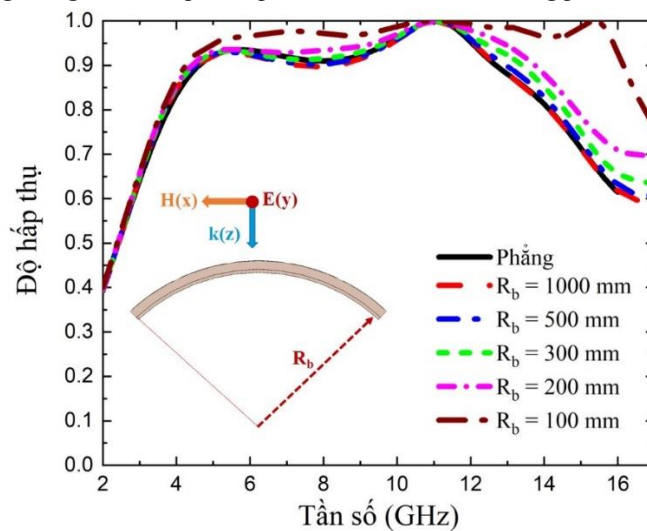


Hình 5. Tỉ lệ năng lượng tiêu tán trên các lớp điện môi Polyimide và mực in dẫn điện

Trong môi trường có thể có nhiều loại sóng điện từ truyền đến bề mặt vật liệu với nhiều góc tới khác nhau. Do đó, chúng tôi đã nghiên cứu các đặc tính hấp thụ của MA đa lớp đối với các góc tới khác nhau. Hình 6 minh họa phổ hấp thụ của MA đa lớp được đề xuất đối với góc sóng tới ở cả chế độ phân cực điện trường ngang (TE) và chế độ phân cực từ trường ngang (TM). Hình 6(a) mô tả phổ hấp thụ của MA đa lớp ở chế độ TE khi thay đổi góc tới. Có thể quan sát thấy khi tăng góc tới (θ) từ 0° đến 15° , phổ hấp thụ hầu như không đổi. Ở $\theta = 30^\circ$, độ hấp thụ đạt 90% trong vùng tần số từ 9,5 đến 12,9 GHz. Khi góc tới $\theta = 60^\circ$, phổ hấp thụ vẫn duy trì một đỉnh có cường độ 94,9% tại 13,1 GHz. Ngược lại, trong chế độ TM (được mô tả trong Hình 6(b)), phổ hấp thụ ổn định hơn theo góc tới, so với chế độ TE. Vật liệu vẫn duy trì đặc tính hấp thụ băng tần rộng khi góc tới lên đến 60° . Tuy nhiên, khi góc tới tăng lên $\theta = 70^\circ$, độ hấp thụ giảm mạnh xuống còn dưới 85%. Sự hấp thụ ổn định trong chế độ TM có thể được hiểu do hiệu ứng cộng hưởng từ vẫn được duy trì tốt vì sóng tới theo phương xiên góc không làm thay đổi hướng của từ trường tới trong chế độ TM (từ trường tới vẫn luôn có phương song song với bề mặt cấu trúc).



Hình 6. Ảnh hưởng của góc tới lên phổ hấp thụ của vật liệu dưới sóng phân cực (a) TE và (b) TM



Hình 7. Phổ hấp thụ của MA đa lớp khi uốn cong với bán kính thay đổi từ 1000 đến 100 mm

Vật liệu đề xuất có lớp điện môi Polyimide đàn hồi, do đó, phổ hấp thụ của vật liệu ở trạng thái uốn cong với bán kính uốn R_b thay đổi từ 1000 đến 100 mm được khảo sát. Trong mô phỏng này, sóng phẳng được thiết lập lan truyền theo hướng z, với trường điện dọc theo trục y và trường từ dọc theo hướng x. Khi bán kính uốn là 1000 mm, bề mặt cấu trúc gần như phẳng; phổ hấp thụ gần giống với phổ của cấu trúc ở trạng thái phẳng. Khi bán kính uốn giảm từ 500 đến 100 mm, phổ hấp thụ trong vùng tần số từ 4 đến 6 GHz thay đổi không đáng kể, trong khi đó, phổ hấp thụ

phía tần số cao hơn, từ 11 đến 17 GHz được tăng cường đáng kể. Kết quả là khi bán kính uốn R_b giảm xuống còn 100 mm, phổ hấp thụ được mở rộng về phía tần số cao, với độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số từ 4,26 đến 16,14 GHz, tương ứng với $FBW = 116,5\%$. Kết quả này có sự phù hợp tốt với các công trình có liên quan đến ảnh hưởng của độ uốn cong lên cấu trúc MA đàn hồi đã công bố [30]. Như vậy có thể thấy rằng MA đa lớp đàn hồi được đề xuất có thể đạt được đặc tính hấp thụ băng tần rộng khi có biến dạng, do đó, nó có thể phù hợp với nhiều ứng dụng thực tế.

4. Kết luận

Mẫu vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ có cấu trúc dạng đa lớp, trong đó, các cấu trúc cộng hưởng có dạng vòng tròn và hình chữ thập đơn giản, làm từ mực in dẫn điện đã được thiết kế và mô phỏng. Kết quả cho thấy, ở trạng thái phẳng, vật liệu có độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số từ 4,6 đến 12,7 GHz ($FBW = 93,6\%$). Ở trạng thái uốn cong, vật liệu vẫn duy trì được đặc tính hấp thụ băng tần rộng. Đặc biệt, khi giảm bán kính uốn cong xuống 100 mm, phổ hấp thụ của vật liệu được mở rộng hơn đáng kể so với trạng thái phẳng (độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số từ 4,26 đến 16,14 GHz, tương ứng với $FBW = 116,5\%$). Đặc trưng hấp thụ của vật liệu có nguồn gốc từ sự hình thành đỉnh hấp thụ do cộng hưởng từ được kích thích. Tương tác giữa các lớp vật liệu đã mở rộng phổ hấp thụ hơn so với trường hợp cấu trúc đơn lớp.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện dưới sự tài trợ của đề tài cấp cơ sở thuộc Trường Đại học Sư phạm – Đại học Thái Nguyên, mã số TNUE-2023-08.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Shultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction," *Science*, vol. 292, no. 5514, pp. 77-79, 2001.
- [2] D. R. Smith, J. B. Pendry, and M. C. K. Wiltshire, "Metamaterials and Negative Refractive Index," *Science*, vol. 305, pp. 788-792, 2004.
- [3] Z. Duan, X. Tang, Z. Wang, Y. Zhang, X. Chen, M. Chen, and Y. Gong, "Observation of the reversed Cherenkov radiation," *Nat. Commun.*, vol. 8, no. 1, 2017, Art. no. 14901.
- [4] N. Seddon and T. Bearpark, "Observation of the Inverse Doppler Effect," *Science*, vol. 302, no. 5650, pp. 1537-1540, 2003.
- [5] L. Zhu and L. Dong, "Electromagnetically induced transparency metamaterials: theories, designs and applications," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 55, no. 26, 2022, Art. no. 263003.
- [6] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," *Sov. Phys. Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, 1968.
- [7] M. R. Islam, M. T. Islam, B. Bais, S. H. Almalki, H. Alsaif, and M. S. Islam, "Metamaterial sensor based on rectangular enclosed adjacent triple circle split ring resonator with good quality factor for microwave sensing application," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, 2022, Art. no. 6792.
- [8] L. Ma, D. Chen, W. Zheng, J. Li, S. Zahra, Y. Liu, Y. Zhou, Y. Huang, and G. Wen, "Advanced Electromagnetic Metamaterials for Temperature Sensing Applications," *Front. Phys.*, vol. 9, 2021, Art. no. 657790.
- [9] K. N. Olan-Núñez, and R. S. Murphy-Arteaga, "A novel metamaterial-based antenna for on-chip applications for the 72.5–81 GHz frequency range," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, 2022, Art. no. 1699.
- [10] Z. Huang and B. Wang, "Ultra-broadband metamaterial absorber for capturing solar energy from visible to near infrared," *Surfaces and Interfaces*, vol. 33, 2022, Art. no. 102244.
- [11] T. H. H. Le, H. N. Bui, S. T. Bui, D. L. Vu, X. K. Bui, and T. S. Pham, "Enhanced efficiency of magnetic resonant wireless power transfer system using rollable and foldable metasurface based on polyimide substrate," *Appl. Phys. A*, vol. 130, no. 7, 2024, Art. no. 521.
- [12] X. K. Bui, V. N. Nguyen, N. D. Dinh, P. H. Nguyen, T. T. Nguyen, S. T. Bui, D. L. Vu, T. G. Ho, D. T. Pham and Y. Lee, "Dual-band infrared metamaterial perfect absorber for narrow-band thermal emitters," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 57, no. 28, 2024, Art. no. 285501.
- [13] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect Metamaterial Absorber," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 20, 2008, Art. no. 207402.

- [14] W. Zuo, Y. Yang, X. He, D. Zhan, and Q. Zhang, "A miniaturized metamaterial absorber for ultrahigh-frequency RFID system," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 329-332, 2016.
- [15] J. Mizeraczyk and M. Budnarowska, "Microwave Metamaterial Absorber with Radio Frequency/Direct Current Converter for Electromagnetic Harvesting System," *Electronics*, vol. 13, no. 5, Art. no. 833, 2024.
- [16] Z. Luo, S. Ji, J. Zhao, H. Wu, and H. Dai, "A multiband metamaterial absorber for GHz and THz simultaneously," *Results Phys.*, vol. 30, 2021, Art. no. 104893.
- [17] H. Sudarsan, K. Mahendran, and S. Rathika, "Design of microwave metamaterial absorber for Ku-, X, and C-band applications," *Results Opt.*, vol. 15, 2024, Art. no. 100653.
- [18] Y. Zhou, Z. Qin, Z. Liang, D. Meng, H. Xu, D. R. Smith, and Y. Liu, "Ultra-broadband metamaterial absorbers from long to very long infrared regime," *Light Sci. Appl.*, vol. 10, no. 1, 2021, Art. no. 138.
- [19] P. Li, P. Zhou, Y. Liu, and X. Wang, "Electrically switchable metamaterial absorber in visible range based on micro-electro-mechanically system," *Results Phys.*, vol. 51, 2023, Art. no. 106569.
- [20] X. K. Bui, N. V. Ngo, T. S. Pham, H. N. Bui, H. A. Nguyen, T. C. Do, P. H. Nguyen, S. T. Bui, D. L. Vu, H. Zheng, L. Y. Chen, and Y. Lee, "Multi-Layered Metamaterial Absorber Electromagnetic and Thermal Characterization," *Photonics*, vol. 11, no. 3, 2024, Art. no. 11030219.
- [21] G. Deng, K. Lv, H. Sun, Y. Hong, X. Zhang, Z. Yin, Y. Li, and J. Yang, "An ultra-wideband, polarization insensitive metamaterial absorber based on multiple resistive film layers with wide-incident-angle stability," *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 1-9, 2020.
- [22] K. Iwaszczuk, A. C. Strikwerda, K. Fan, X. Zhang, R. D. Averitt, and P. U. Jepsen, "Flexible metamaterial absorbers for stealth applications at terahertz frequencies," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 635-643, 2012.
- [23] A. Sadeqi, H. R. Nejad, and S. Sonkusale, "Low-cost metamaterial-on-paper chemical sensor," *Opt. Express*, vol. 25, pp. 16092-16100, 2017.
- [24] W. Xin, Z. Binzhen, W. Wanjun, W. Junlin, and D. Junping, "Design, fabrication, and characterization of a flexible dual-band metamaterial absorber," *IEEE Photonics J.*, vol. 9, pp. 1-12, 2017.
- [25] G. Dayal, and S. A. J. Ramakrishna, "High temperature VO₂ based microbolometer with enhanced light absorption," *Phys. D Appl. Phys.*, vol. 48, 2014, Art. no. 035105.
- [26] H. K. Kim, K. Ling, K. Kim, and S. Lim, "Flexible inkjet-printed metamaterial absorber for coating a cylindrical object," *Opt. Express*, vol. 23, pp. 5898-5906, 2015.
- [27] CST Studio Suite. [CD-ROM]. Vélizy-Villacoublay, 78140, France: Dassault Systèmes, 2023.
- [28] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 1989.
- [29] S. D. Assimonis and V. Fusco, "Polarization insensitive, wide-angle, ultra-wideband, flexible, resistively loaded, electromagnetic metamaterial absorber using conventional inkjet-printing technology," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, 2019, Art. no. 12334.
- [30] V. L. Le, S. K. Nguyen, S. T. Bui, T. T. Nguyen, T. G. Trinh, T. S. Pham, X. K. Bui, D. L. Vu, L. Chen, H. Zheng, and Y. Lee, "Flexible broadband metamaterial perfect absorber based on graphene-conductive inks," *Photonics*, vol. 8, no. 10, 2021, Art. no. 440.