

MULTIBAND AND BROADBAND METAMATERIAL ABSORBER BASED ON DISK-SHAPED RESONATORS IN VISIBLE REGION

Tong Ba Tuan¹, Bui Huu Nguyen¹, Nguyen Thi Hau¹, Ho Quynh Anh¹,
Vu Thi Hong Hanh², Vu Dinh Lam³, Le Duc Tuyen^{1*}

¹Hanoi University of Mining and Geology, ²TNU - University of Education,

³Graduate University of Science and Technology - VAST

| ARTICLE INFO | ABSTRACT |
|-----------------------------|--|
| Received: 19/6/2024 | Metamaterial absorbers have demonstrated significant potential in electromagnetic wave shielding, sensing and energy harvesting. Finding metamaterial that can absorb electromagnetic wave is not only simple design and fabrication, but also has multi-peak, wide-band absorption still in progress. This study presents an effective method to expand the absorption bandwidth of metamaterial absorbers in visible region. The proposed metamaterial absorber consists of periodic metallic disk structure on the top and continuous metallic plane on the bottom separated by a dielectric substrate. The absorption properties were investigated and simulated using commercial software CST Microwave Studio (Computer Simulation Technology) based on finite integration technique (FIT). The results show that the near-field coupling leads to absorption characteristics. By optimizing the asymmetrical arrangement of two disk-shaped resonators, the absorption bandwidth can be expanded from 387.6 to 579.5 THz (wavelength 518 - 774 nm) with absorptivity over 80%. The absorption mechanism is explained by induced current distribution, electric distribution and near-field coupling. This work proposes a simple and effective method to create multi-peak, broadband absorption using metamaterials with facile structure. |
| Revised: 10/7/2024 | |
| Published: 11/7/2024 | |
| KEYWORDS | |
| Metamaterials | |
| Metamaterial absorber | |
| Disk-shaped resonator | |
| Near-field coupling | |
| Visible region | |

VẬT LIỆU BIẾN HÓA HẤP THỤ ĐA ĐỈNH VÀ DẢI RỘNG BỞI CẤU TRÚC ĐĨA TRÒN TRONG VÙNG KHẢ KIẾN

Tổng Bá Tuấn¹, Bùi Hữu Nguyên¹, Nguyễn Thị Hậu¹, Hồ Quỳnh Anh¹,
Vũ Thị Hồng Hạnh², Vũ Đình Lâm³, Lê Đức Tuyền^{1*}

¹Trường Đại học Mỏ - Địa chất, ²Trường Đại học Sư phạm - ĐH Thái Nguyên

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: 19/6/2024 | Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ đã chứng tỏ tiềm năng quan trọng trong việc che chắn sóng điện từ, làm cảm biến và chuyển đổi năng lượng. Việc tìm ra vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ không chỉ đơn giản về thiết kế và chế tạo đồng thời hấp thụ đa đỉnh, dải rộng đang được quan tâm thực hiện. Nghiên cứu này giới thiệu một phương pháp hiệu quả mở rộng dải hấp thụ sóng điện từ của vật liệu biến hóa trong vùng ánh sáng nhìn thấy. Vật liệu biến hóa đề xuất gồm cấu trúc đĩa kim loại tuần hoàn ở mặt trên và tấm kim loại liên tục mặt dưới được ngăn cách bởi lớp điện môi. Tính chất hấp thụ được khảo sát và mô phỏng bằng phần mềm thương mại CST Microwave Studio (Computer Simulation Technology) dựa trên kỹ thuật tích phân hữu hạn (FIT). Kết quả cho thấy hiệu ứng tương tác trường gần có thể làm thay đổi đặc tính hấp thụ. Bằng cách tối ưu vị trí sắp xếp không đối xứng hai đĩa kim loại, dải hấp thụ có thể được mở rộng từ 387,6 đến 579,5 THz (bước sóng 518 - 774 nm) với độ hấp thụ trên 80%. Cơ chế hấp thụ được giải thích dựa trên phân bố dòng điện cảm ứng, phân bố điện trường và hiệu ứng tương tác trường gần. Báo cáo này đề xuất một phương pháp đơn giản và hiệu quả để tạo ra hấp thụ đa đỉnh, hấp thụ dải rộng sử dụng vật liệu biến hóa với cấu trúc dễ chế tạo. |
| Ngày hoàn thiện: 10/7/2024 | |
| Ngày đăng: 11/7/2024 | |
| TỪ KHÓA | |
| Vật liệu biến hóa | |
| Hấp thụ sóng điện từ | |
| Cộng hưởng đĩa tròn | |
| Tương tác trường gần | |
| Vùng khả kiến | |

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10627>

* Corresponding author. Email: ledactuyen@humg.edu.vn

1. Giới thiệu

Vật liệu biến hóa (metamaterial - MM) là một trong những lĩnh vực nghiên cứu phát triển rất nhanh với nhiều ứng dụng tiềm năng. MM được tạo bởi sự sắp xếp tuần hoàn của cấu trúc cộng hưởng có thể điều khiển sóng điện từ [1] – [3]. Khả năng tương tác sóng điện từ của MM phụ thuộc nhiều vào kích thước, hình dạng của cấu trúc cộng hưởng hơn là đặc tính nội tại của vật liệu. Do có thể tương tác với cả hai thành phần điện trường và từ trường của sóng điện từ, nên MM có nhiều ưu điểm hơn vật liệu thông thường và tạo ra đột phá trong việc phát triển công nghệ mới [4], [5]. Bằng cách thiết kế và sắp xếp hợp lý cấu trúc cộng hưởng, chúng ta có thể tạo ra vật liệu biến hóa có chiết suất âm hay hấp thụ sóng điện từ [4] – [6].

Sau khi Landy và cộng sự đề xuất lần đầu năm 2008, vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ (metamaterial absorber - MA) được quan tâm nghiên cứu và sử dụng làm cảm biến, che chắn sóng điện từ và chuyển đổi năng lượng [6] – [9]. Do tính chất của cấu trúc cộng hưởng, MA thường có tần số hoạt động hẹp [10]. Việc tìm ra MA không chỉ đơn giản về thiết kế để chế tạo, chi phí thấp mà còn tạo ra được MA có hấp thụ đa đỉnh, hấp thụ dải rộng với độ hấp thụ cao được nhiều nhóm nghiên cứu quan tâm.

Để có thể làm việc với dải tần rộng hay nhiều dải tần, một cách phổ biến là kết hợp các cấu trúc cộng hưởng nhiều kích thước với nhau [11], [12]. Nhưng thiết kế này bị hạn chế do độ hấp thụ phụ thuộc vào kích thước cấu trúc cũng như yêu cầu kỹ thuật chế tạo có độ chính xác cao. Đặc biệt kỹ thuật chế tạo gặp khó khăn lớn khi tần số hoạt động tại vùng ánh sáng nhìn thấy. Một số thiết kế sử dụng nhiều lớp kim loại-điện môi [13], [14]. Tuy nhiên, phương pháp này có độ dày của mẫu lớn và tốn nhiều thời gian cũng như giá thành chế tạo. Dải tần hoạt động cũng có thể được mở rộng nhờ phân tử tích hợp, tuy nhiên các nghiên cứu chủ yếu tập trung tại vùng tần số thấp MHz hay GHz [15]. Tại vùng tần số cao hơn (THz) kích thước phân tử tích hợp quá lớn so với cấu trúc cộng hưởng nên khó khăn trong việc kết nối. Gần đây phương pháp sử dụng hiệu ứng tương tác trường gần nhằm tăng cường độ hấp thụ và mở rộng dải hấp thụ được quan tâm nghiên cứu [16]. MA hấp thụ đa đỉnh có thể được tạo ra khi kết hợp vật liệu graphen [17]. Một số nghiên cứu trước đây sử dụng cấu trúc đĩa kim loại, tuy nhiên các kết quả tập trung ở cộng hưởng bậc thấp và tần số vùng GHz, MHz [11].

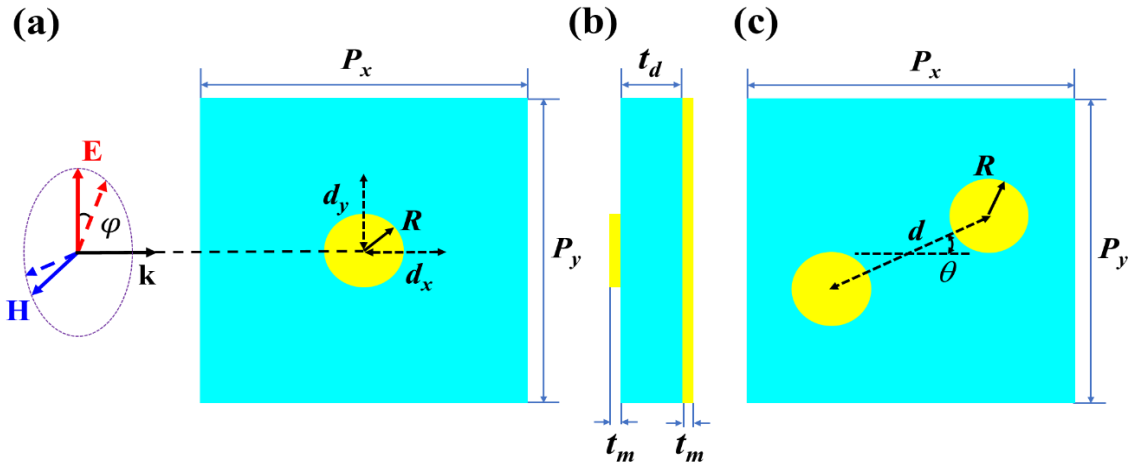
Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một cấu trúc hấp thụ dải rộng dựa trên sự sắp xếp bất đối xứng của hai đĩa kim loại. Nhờ tương tác trường gần của cấu trúc cộng hưởng có thể tăng cường độ hấp thụ cũng như mở rộng dải hấp thụ trong vùng ánh sáng nhìn thấy từ 387,6 đến 579,5 THz. Cấu trúc cộng hưởng đĩa tròn mà nghiên cứu đề xuất đơn giản hơn so với các cấu trúc cộng hưởng có kích thước khác nhau. Các kết quả của nghiên cứu này được giải thích dựa trên hình ảnh phân bố dòng điện cảm ứng và điện trường.

2. Thiết kế cấu trúc và mô phỏng

Hình 1 trình bày mô hình ô cơ sở của MA với chu kỳ $P_x = 1400$ nm và $P_y = 1400\sqrt{3}$ nm được cấu tạo bởi ba lớp vật liệu. Lớp trên cùng là đĩa kim loại tungsten bán kính $R = 250$ nm, chiều dày $t_m = 50$ nm; lớp giữa là SiO_2 có hằng số điện môi $\epsilon = 4$, chiều dày $t_d = 50$ nm; lớp dưới cùng là tấm tungsten liên tục, chiều dày t_m được bao phủ toàn bộ diện tích ô cơ sở. Các thành phần \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{k} của sóng điện từ chiếu tới bề mặt vật liệu được mô tả trên Hình 1(a). Đĩa tròn có thể dịch theo phương ngang (d_x) hoặc phương thẳng đứng (d_z) để khảo sát tính chất hấp thụ. Hình 1(b) là mặt bên của ô cơ sở thể hiện chiều dày của ba lớp vật liệu kim loại - điện môi - kim loại tương ứng. Hình 1(c) mô tả cấu trúc sau khi tối ưu gồm hai đĩa tròn bán kính bằng nhau $R = 250$ nm đặt cách nhau một khoảng d và lệch góc θ so với phương ngang.

Chúng tôi thực hiện mô phỏng tương tác của sóng điện từ với cấu trúc MA đề xuất trên phần mềm thương mại CST (Computer Simulation Technology). Sóng điện từ truyền tới vuông góc với bề mặt cấu trúc, mặt phẳng (\mathbf{E} , \mathbf{H}) song song với mặt mẫu như trên Hình 1(a). Anten thu đặt trước MA để thu sóng điện từ phản xạ sau khi tương tác với MA và thành phần thu được này được ký

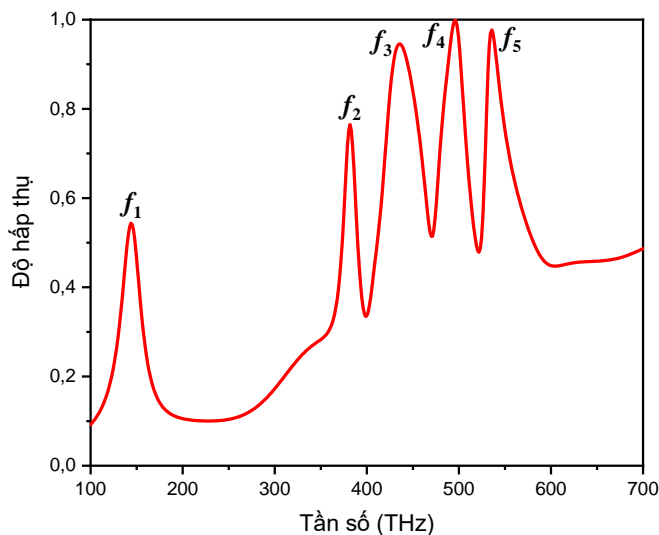
hiệu là S_{11} . Vì MA có lớp tungsten liên tục, dày hơn độ sâu cảm ứng điện từ của sóng chiếu đến, nên các sóng điện từ không truyền qua được. Do vậy, chúng ta có thể bỏ qua thành phần truyền qua, mà chỉ xét đến thành phần phản xạ và hấp thụ sóng điện từ sau khi tương tác với MA. Từ đó, độ hấp thụ có thể được tính theo công thức: $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$ trong đó $R(\omega) = |S_{11}|^2$ là độ phản xạ. Bằng cách xác định được thành phần phản xạ S_{11} chúng ta có thể tính được độ hấp thụ của MA.



Hình 1. Ô cơ sở MA với cạnh $P_x = 1400$ nm, $P_y = 1400\sqrt{3}$ nm, chiều dày lớp tungsten $t_m = 50$ nm, bán kính $R = 250$ nm, chiều dày lớp SiO_2 $t_d = 50$ nm. (a) mặt trên với phân cực sóng điện từ chiếu đến, (b) mặt bên và (c) mặt trên cấu trúc hai đĩa tròn

3. Kết quả và thảo luận

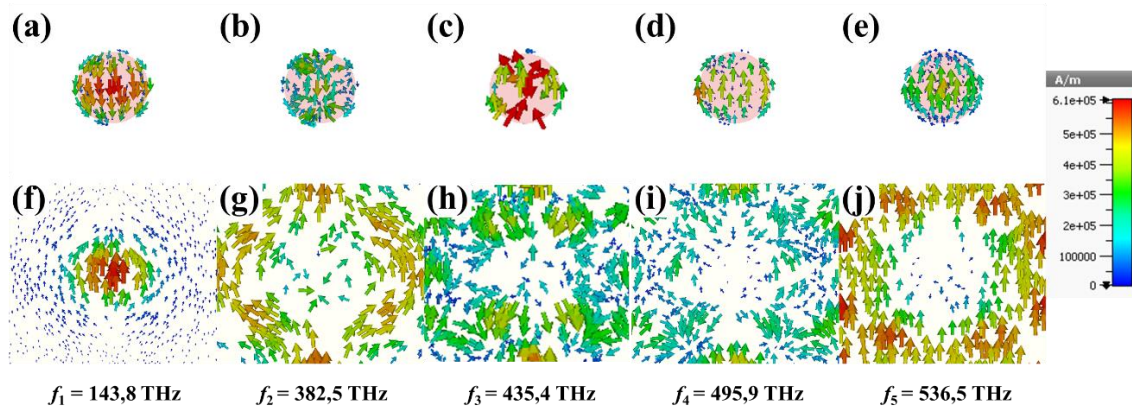
Hình 2 biểu diễn phổ hấp thụ của vật liệu biến hóa cấu trúc một đĩa tròn mô tả trên Hình 1(a). Quan sát hình cho thấy, phổ có năm đỉnh hấp thụ lần lượt tại các tần số $f_1 = 143,8$ THz, $f_2 = 382,5$ THz, $f_3 = 435,4$ THz, $f_4 = 495,5$ THz, $f_5 = 536,5$ THz. Các đỉnh hấp thụ đều hẹp, ba đỉnh hấp thụ lớn hơn 90% tại f_3, f_4 và f_5 , trong khi đó hai đỉnh hấp thụ yếu hơn lần lượt f_1 đạt 54% và tại f_2 đạt 76%.



Hình 2. Phổ hấp thụ của cấu trúc một đĩa tròn có các đỉnh hấp thụ lần lượt tại 143,8; 382,5; 435,4; 495,9 và 536,5 THz

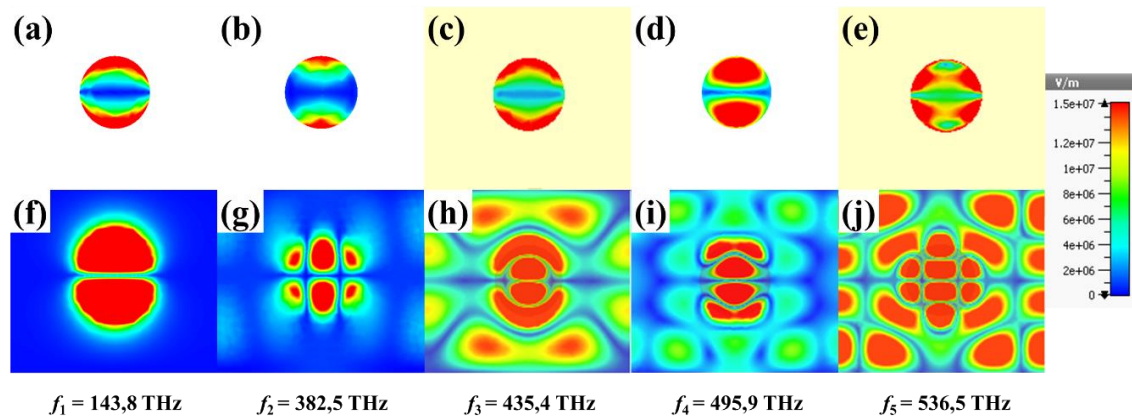
Để hiểu cơ chế hấp thụ, chúng tôi khảo sát dòng điện bề mặt tại các tần số cộng hưởng. Hình 3 trình bày lần lượt phân bố dòng điện bề mặt trên đĩa kim loại (mặt trên) và tấm kim loại liên tục (mặt dưới) tại các tần số từ f_1 đến f_5 . Kết quả cho thấy tại tần số f_1 dòng điện của tấm kim loại mặt

dưới tập trung tại vị trí của đĩa và ngược chiều với dòng điện trên đĩa kim loại. Dòng điện mặt trên và mặt dưới đối song chứng tỏ hấp thụ tại tần số f_1 là do cộng hưởng từ gây ra [11], [18]. Tại các tần số cộng hưởng cao hơn, dòng điện của tấm kim loại mặt dưới chủ yếu bên ngoài vị trí của đĩa và có xu hướng tương tác với các ô cơ sở bên cạnh. Điều này thể hiện rõ khi quan sát sự phân bố điện trường tại các tần số cộng hưởng trên Hình 4. Nhìn chung, sự phân bố điện trường tại tần số f_1 chỉ có tại vị trí của đĩa tròn do tương tác của đĩa tròn phía trên và mặt kim loại phía dưới tạo thành dòng điện cộng hưởng từ khép kín. Các hấp thụ tại tần số cao hơn là do có sự tương tác trường gần giữa các ô cơ sở gây ra. Kết quả thu được chỉ ra tần số hấp thụ f_1 gây ra bởi cộng hưởng từ của cấu trúc đĩa tròn và cũng là cộng hưởng cơ bản của đĩa kim loại, trong khi các cộng hưởng khác là do tương tác trường gần của đĩa tròn và các đĩa lân cận.

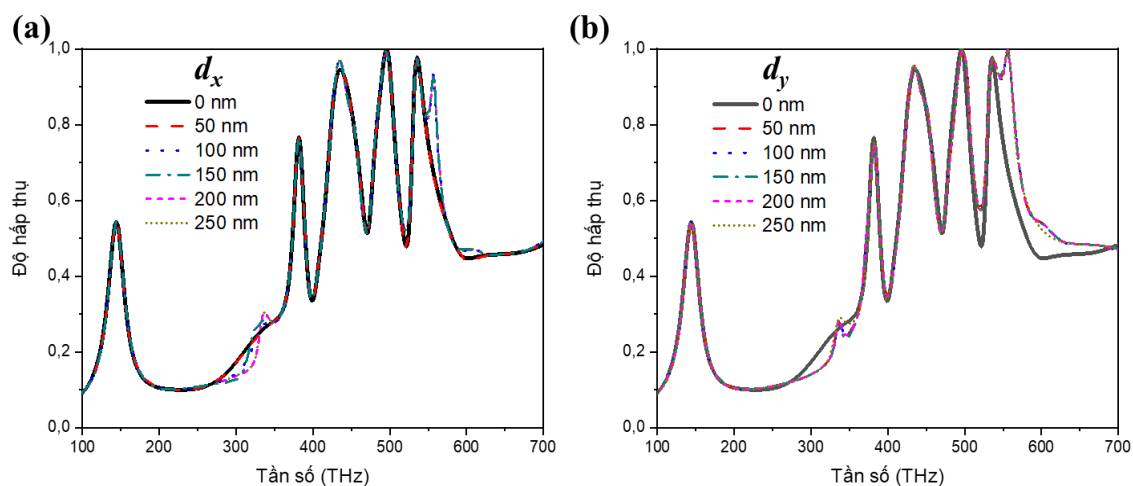


Hình 3. Phân bố dòng điện cảm ứng tại mặt trên (a-e) và mặt dưới (f-j) tại các đỉnh hấp thụ: 143,8 THz (a,f); 382,5 THz (b,g); 435,4 THz (c,h); 495,9 THz (d,i) và 536,5 THz (e,j)

Do các đỉnh hấp thụ tại tần số f_2 đến f_5 gây ra bởi tương tác trường gần, nên chúng tôi thay đổi tính đối xứng của cấu trúc để khảo sát tính chất hấp thụ của các đỉnh này. Hình 5 trình bày phổ hấp thụ khi dịch chuyển đĩa tròn theo chiều x và y. Khoảng cách từ tâm đĩa đến tâm ô cơ sở theo chiều x (d_x) và chiều y (d_y) thay đổi từ 0 đến 250 nm, phổ hấp thụ chỉ thay đổi nhỏ. Một đỉnh hấp thụ nhỏ xuất hiện tại tần số $f_6 = 536,5$ THz, còn tại các đỉnh hấp thụ từ f_1 đến f_5 hầu như không thay đổi cả vị trí và độ hấp thụ. Đỉnh hấp thụ nhỏ tại vị trí 557,3 THz chỉ xuất hiện khi khoảng cách của đĩa tròn dịch một đoạn d_x hay d_y lớn hơn 100 nm. Kết quả này được giải thích, khi dịch chuyển đĩa theo chiều x hoặc y tính tuần hoàn của cấu trúc đĩa tròn ít bị ảnh hưởng và tính đối xứng của cấu trúc chỉ thay đổi nhỏ nên cộng hưởng tương tác giữa các đĩa lân cận thay đổi ít.



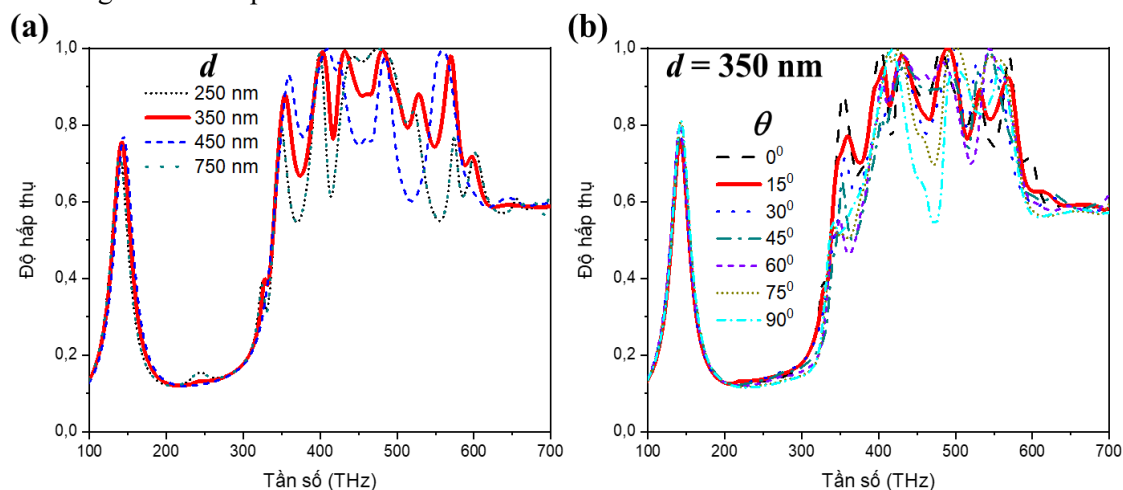
Hình 4. Phân bố điện trường tại mặt trên (a-e) và mặt dưới (f-j) tại các đỉnh hấp thụ: 143,8 THz (a,f); 382,5 THz (b,g); 435,4 THz (c,h); 495,9 THz (d,i) và 536,5 THz (e,j)



Hình 5. Phổ hấp thụ phụ thuộc vị trí của đĩa tròn so với tâm ô cơ sở (a) theo phương x , (b) theo phương y

Do đặc tính hấp thụ ít bị ảnh hưởng khi thay đổi vị trí của đĩa tròn, nên để tăng cường hiệu ứng tương tác trường gần tại vùng tần số cộng hưởng từ f_2 đến f_5 , chúng tôi đề xuất cấu trúc ô cơ sở có hai đĩa tròn bán kính giống nhau $R = 250$ nm như Hình 1(c). Các tham số cấu trúc về kích thước ô cơ sở, chiều dày các lớp vật liệu không đổi so với cấu trúc một đĩa tròn. Khoảng cách giữa hai tâm đĩa tròn là d , góc hợp bởi đường nối tâm hai đĩa tròn và trục x là θ .

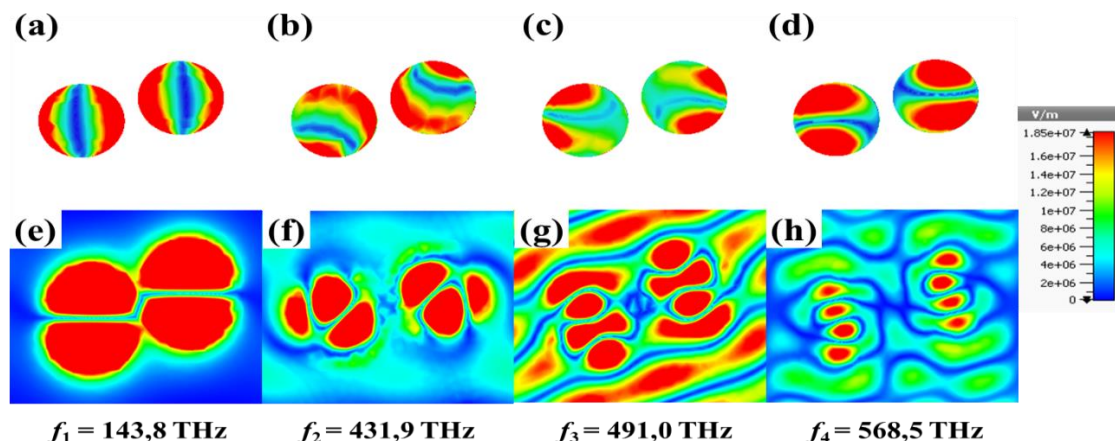
Hình 6(a) trình bày phổ hấp thụ của cấu trúc hai đĩa tròn phụ thuộc vào khoảng cách d giữa hai đĩa kim loại thay đổi khi góc $\theta = 0^\circ$. Tại tần số cộng hưởng cơ bản f_1 , vị trí đỉnh hấp thụ không thay đổi do kích thước đĩa tròn không đổi, tuy nhiên độ hấp thụ tăng từ 54% đến 75%. Tại các tần số cộng hưởng cao hơn, phổ hấp thụ thay đổi nhiều cả về vị trí và độ hấp thụ. Kết quả này là do sự tương tác trường gần phụ thuộc mạnh vào tính đối xứng của cấu trúc cộng hưởng. Quan sát trên Hình 6(a) cho thấy, khi khoảng cách giữa hai đĩa $d = 350$ nm thì độ hấp thụ trung bình lớn nhất. Do vậy, cấu trúc được tối ưu tính bất đối xứng với khoảng cách $d = 350$ nm không đổi cho các nghiên cứu tiếp theo.



Hình 6. Phổ hấp thụ của cấu trúc hai đĩa tròn, (a) khoảng cách giữa hai tâm đĩa d thay đổi, góc $\theta = 0^\circ$; (b) khoảng cách giữa hai tâm đĩa $d = 350$ nm, góc θ thay đổi

Hình 6(b) trình bày phổ hấp thụ của cấu trúc hai đĩa tròn phụ thuộc góc θ khi khoảng cách $d = 350$ nm. Tương tự như khi thay đổi khoảng cách d , phổ thu được tại tần số f_1 không thay đổi vị trí nhưng độ hấp thụ tăng từ 75% đến 81% khi góc θ tăng từ 0 đến 90° . Tại các tần số cộng hưởng cao

hơn, phổ hấp thụ thay đổi rõ ràng cả về vị trí và độ hấp thụ. Tại vị trí góc $\theta = 15^\circ$, hiệu quả hấp thụ tốt nhất và thu được dải hấp thụ rộng từ 387,6 đến 579,5 THz với độ hấp thụ trên 80%. Kết quả cho thấy, vị trí đỉnh phổ hấp thụ f_1 không phụ thuộc vị trí của đĩa tròn kim loại vì đây là tần số cộng hưởng cơ bản chỉ phụ thuộc vào kích thước của đĩa cộng hưởng, trong khi các đỉnh phổ hấp thụ khác phụ thuộc mạnh vào vị trí tương đối của hai đĩa tròn vì chúng được tạo ra bởi tương tác trường gần.



Hình 7. Phân bố điện trường tại mặt trên (a-d) và mặt dưới (e-h) tại các đỉnh hấp thụ: 143,8 THz (a,e); 431,9 THz (b,f); 491,0 THz (c,g) và 568,5 THz (d,h)

Hình 7 trình bày phân bố điện trường tại một số đỉnh cộng hưởng của cấu trúc hai đĩa tròn. Tại tần số hấp thụ 143,8 THz không có tương tác giữa các đĩa tròn. Trong khi tại các tần số: 431,9; 491,0 và 568,5 THz có cả tương tác trường gần giữa các đĩa trong cùng ô cơ sở và giữa các ô cơ sở với nhau tạo ra nhiều đỉnh hấp thụ gần nhau hình thành một dải hấp thụ rộng. Tương tác trường gần thể hiện rõ tại phân bố điện trường của cấu trúc kim loại mặt trên và tấm kim loại mặt dưới. Như vậy, khi sắp xếp cấu trúc cộng hưởng để thay đổi tính đối xứng của ô cơ sở chúng ta có thể tạo ra vùng hấp thụ đa đỉnh, dải rộng bởi hiệu ứng tương tác trường gần.

4. Kết luận

Chúng tôi đã thiết kế được một cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ đa đỉnh và dải rộng tại vùng nhìn thấy. Kết quả thu được chứng tỏ vai trò quan trọng của các tham số hình học trong việc kiểm soát tính chất hấp thụ. Sự tương tác trường gần giữa các đĩa kim loại trong cùng một ô cơ sở và các ô cơ sở lân cận có thể tạo ra dải hấp thụ đa đỉnh và dải rộng. Dải hấp thụ tối ưu trong nghiên cứu này được mở rộng từ 387,6 đến 579,5 THz (bước sóng 518 – 774 nm) với độ hấp thụ trên 80% bằng cách tối ưu hóa vị trí hai đĩa kim loại. Các tần số cộng hưởng được giải thích bởi phân bố dòng điện cảm ứng và điện trường. Kết quả nghiên cứu đề xuất một phương pháp mở rộng và tăng cường độ hấp thụ sóng điện từ ở vùng nhìn thấy nhờ vào tương tác trường gần với một cấu trúc đơn giản.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Mở - Địa chất trong đề tài mã số T23-18.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J. Fan, L. Zhang, S. Wei, Z. Zhang, S. K. Choi, B. Song, and Y. Shi, "A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends," *Materials Today*, vol. 50, p. 303, 2021.
- [2] P. Ball, "Bending the laws of optics with metamaterials: an interview with John Pendry," *National Science Review*, vol. 5, pp. 200–202, 2018.
- [3] J. Chen, S. Hu, S. Zhu, *et al.*, "Metamaterials: from fundamental physics to intelligent design,"

- Interdisciplinary Materials*, vol. 2, pp. 5-29, 2023.
- [4] V. G. Veselago, "The Electrodynamics of Substance with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ ," *Sov. Phys. Usp.*, vol.10, p. 509, 1968.
- [5] D. Smith, W. J. Padilla, D. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, p. 4184, 2000.
- [6] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, *et al.*, "Perfect metamaterial absorber," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, p. 207402, 2008.
- [7] Z. Wang, Y. Wei, and C. Zhang, "Flexible broadband absorber for solar energy harvesting," *Plasmonics*, vol. 19, p. 215, 2023.
- [8] S. Li, L. Liu, Y. Jiang, C. Tang, C. Gu, and Z. Li, "Ultrathin optically transparent metamaterial absorber for broadband microwave invisibility of solar panels," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 55, p. 045101, 2021.
- [9] T. S. Bui, T. D. Dao, L. H. Dang, L. D. Vu, A. Ohi, T. Nabatame, Y. P. Lee, T. Nagao, and C. V. Hoang, "Metamaterial-enhanced vibrational absorption spectroscopy for the detection of protein molecules," *Sci. Rep.*, vol. 6, p. 32123, 2016.
- [10] T. L. Pham *et al.*, "Dual-band Isotropic Metamaterial Absorber Based on Near-field Interaction in The Ku Band," *Current Applied Physics*, vol. 20, pp. 331-336, 2020.
- [11] T. V. Do, T. H. Nguyen, V. T. Pham, *et al.*, "Perfect absorber metamaterials: peak, multi-peak and broadband absorption," *Opt. Commun.*, vol. 322, p. 209, 2014.
- [12] A. Ghobadi, S. A. Dereshgi, H. Hajian, B. Bozok, B. Butun, and E. Ozbay, "Ultra-broadband, wide angle absorber utilizing metal insulator multilayers stack with a multi-thickness metal surface texture," *Sci. Rep.*, vol. 7, p. 4755, 2017.
- [13] F. Ding, Y. Cui, X. Ge, Y. Jin, and S. He, "Ultra-broadband microwave metamaterial absorber," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, p. 103506, 2012.
- [14] J. Wu, "Broadband light absorption by tapered metal-dielectric multilayered grating structures," *Opt. Commun.*, vol. 365, p. 93, 2016.
- [15] D. Lee, H. Jeong, and S. Lim, "Electronically switchable broadband metamaterial absorber," *Sci. Rep.*, vol. 7, p. 4891, 2017.
- [16] H. L. Dang, V. C. Nguyen, D. H. Le, *et al.*, "Broadband metamaterial perfect absorber obtained by coupling effect," *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.*, vol. 26, p. 1750036, 2017.
- [17] Y. Lv, J. Tian, and R. Yang, "Multiband tunable perfect metamaterial absorber realized by different graphene patterns," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 38, p. 2409, 2021.
- [18] J. Wang, R. Yang, R. Ma, J. Tian, and W. Zhang, "Reconfigurable Multifunctional Metasurface for Broadband Polarization Conversion and Perfect Absorption," *IEEE Access*, vol. 8, p. 105815, 2020.