

Nghiên cứu thiết kế siêu vật liệu hấp thụ hai chiều hoạt động ở vùng tần số THz và ứng dụng trong cảm biến chiết suất

Trần Văn Huỳnh^{1*}, Vũ Đình Lãm², Lê Thị Hồng Hiệp^{2,3,4}, Nguyễn Thanh Tùng^{2,3}

¹Khoa Khoa học cơ bản và Ngoại ngữ, Trường Đại học Phòng cháy chữa cháy;

²Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam;

³Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam;

⁴Khoa Cơ sở ngành phòng cháy chữa cháy, Trường Đại học Phòng cháy chữa cháy.

*Email: tranhuynhsp@gmail.com

Nhận bài ngày 10/02/2022; Hoàn thiện ngày 23/3/2022; Chấp nhận đăng ngày 31/3/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.78.2022.140-150>

TÓM TẮT

Các bộ hấp thụ sóng điện từ dựa trên siêu vật liệu (Metamaterials absorber - MMA) thông thường được thiết kế với các bộ cộng hưởng, một mặt phẳng kim loại liên tục và một lớp điện môi kẹp giữa. Sự hấp thụ dựa trên tổn hao ở lớp điện môi gây ra bởi các cộng hưởng từ. Các MMAs như thế chỉ cho phép hấp thụ sóng điện từ theo một chiều truyền đến, chiều còn lại sóng điện từ bị phản xạ hoàn toàn, đồng thời bên ngoài vùng tần số hấp thụ sóng điện từ cũng bị phản xạ gần như hoàn toàn. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một cấu trúc MMA không sử dụng mặt phẳng kim loại liên tục, thay vào đó sử dụng các bộ cộng hưởng cặp đĩa kim loại Vàng. MMA được thiết kế cho hiệu suất hấp thụ cao tại tần số cộng hưởng dựa trên sự chồng chập cộng hưởng điện và cộng hưởng từ. Các kết quả mô phỏng cho thấy, MMA có thể đạt hiệu suất hấp thụ lên đến 98% tại tần số 2,15 THz. Do không có mặt phẳng kim loại nên MMA vẫn cho phép sóng điện từ truyền qua bên ngoài vùng tần số hấp thụ, tính chất này giúp MMA có khả năng ứng dụng linh hoạt và hiệu quả hơn trong các thiết bị THz.

Từ khóa: THz; Siêu vật liệu; Hấp thụ hai chiều sóng điện từ; Cảm biến chiết suất.

1. MỞ ĐẦU

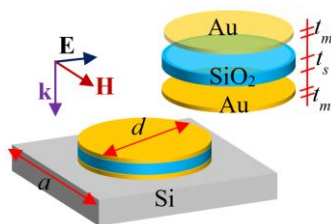
Các bộ hấp thụ dựa trên siêu vật liệu (MMAs) có thể hấp thụ hoàn toàn sóng điện từ chiếu đến ở các tần số cụ thể cho phép chúng có tiềm năng cao trong các ứng dụng khác nhau như công nghệ tàng hình [1, 2], thu năng lượng [3, 4], nhiệt quang điện [5, 6], hình ảnh [7, 8] và cảm biến [9-12]. Cấu trúc một MMA thông thường bao gồm các bộ cộng hưởng kim loại được in trên một lớp điện môi và dưới cùng là một mặt phẳng kim loại đóng vai trò như một gương phản xạ hoàn toàn sóng điện từ. MMA như vậy hấp thụ sóng điện từ dựa trên cộng hưởng từ. Khi sóng tới ở tần số cộng hưởng chiếu đến, trở kháng của bộ hấp thụ bằng với trở kháng của môi trường xung quanh (thường là chân không hoặc không khí), sóng điện từ hoàn toàn đi vào bộ hấp thụ. Do có mặt phẳng kim loại, sóng điện từ không truyền qua được mặt phẳng kim loại này mà bị giam giữ trong lớp điện môi và tiêu hao dưới dạng tỏa nhiệt trong điện môi. Mặc dù các MMA thông thường có thể thiết kế để đạt được độ hấp thụ gần như tuyệt đối tại tần số cộng hưởng [13-15] nhưng do có mặt phẳng kim loại đóng vai trò như một gương phản xạ hoàn toàn sóng điện từ nên tất cả các sóng tới bên ngoài phạm vi hấp thụ sẽ bị phản xạ trở lại, dẫn đến hạn chế trong một số ứng dụng.

Với mục tiêu tạo ra bộ hấp thụ cho phép sóng điện từ có thể truyền qua bên ngoài dải tần hấp thụ, với cấu trúc đơn giản có tính đối xứng cao, trong nghiên cứu này chúng tôi đã không sử dụng mặt phẳng kim loại trong cấu trúc của MMA, thay vào đó cấu trúc cặp đĩa kim loại được đề xuất. Cấu trúc cặp đĩa bao gồm hai đĩa kim loại đặt song song với nhau và xen giữa chúng có một đĩa đệm điện môi. Cấu trúc cặp đĩa có cấu trúc đơn giản có tính đối xứng cao, thuận lợi khi chế tạo thử nghiệm. Tương tự như các cấu trúc cặp thanh kim loại (Cut-wire Pair - CWP), thông thường tồn tại cộng hưởng điện và cộng hưởng từ [16, 17]. Tuy nhiên, do không có mặt phẳng

kim loại đóng vai trò làm gương phản xạ để giữ các sóng điện từ bên trong lớp điện môi dẫn đến hiệu suất hấp thụ thấp với cả cộng hưởng điện và cộng hưởng từ. Để tăng hiệu suất hấp thụ, Đỗ Thành Việt và các đồng nghiệp đã đề xuất một giải pháp chồng chập hai cộng hưởng này với nhau với mục đích tổn hao cao hơn khi hai cộng hưởng xảy ra ở cùng một tần số [18]. Bằng cách biến đổi cấu trúc CWP từ dạng hình vuông thành hình kim cương, cộng hưởng từ đã chồng chập với cộng hưởng điện ở cùng một tần số [18]. Mặc dù giải pháp này có thể thực hiện ở tần số GHz, tuy nhiên ở vùng tần số THz, nơi các cấu trúc dễ bị lỗi do chế tạo và các đặc tính của vật liệu khác nhau, việc tạo ra cấu trúc CWP hình kim cương chính xác là không được thuận lợi. Cấu trúc CWP nói chung và cấu trúc CWP hình đĩa nói riêng cho thấy tồn tại cả cộng hưởng điện và cộng hưởng từ, trong đó: cộng hưởng từ bộ cộng hưởng CWP gây ra, cộng hưởng điện do tương tác giữa các bộ cộng hưởng liên kề gây ra [13, 16, 17]. Trong nghiên cứu này, bằng cách sử dụng mô hình mạch điện LC tương đương kết hợp với mô phỏng sử dụng kỹ thuật tích phân hữu hạn CST, sự phụ thuộc của tần số cộng hưởng điện và cộng hưởng từ vào các tham số hình học và tính chất vật liệu được làm rõ. Từ đó, các tham số cấu trúc được điều khiển để chồng chập cộng hưởng điện và cộng hưởng từ xảy ra, dẫn đến kết quả hiệu suất hấp thụ được tăng cường.

2. THIẾT KẾ CẤU TRÚC

Cấu trúc CWP dạng cặp đĩa (Disk Pair – DP) được thiết kế bao gồm cặp đĩa kim loại Au có đường kính d , giữa hai đĩa kim loại là một đĩa đệm điện môi SiO_2 có cùng đường kính d . Cặp đĩa kim loại có cùng độ dày t_m , đĩa đệm điện môi có độ dày t_s . Mục tiêu của nghiên cứu là tạo ra MMA cấu trúc DP hấp thụ ở vùng tần số THz (cụ thể khoảng 1-3 THz). Do đó, để phù hợp với công nghệ chế tạo phổ biến hiện nay, cấu trúc DP được đặt trên một đế Si như trong hình 1. Đế Si có độ dày t_d , ô cơ sở của MMA dạng hình vuông kích thước a . Có thể thấy rằng, về mặt vật lý, cấu trúc DP là hoàn toàn đối xứng theo hai chiều tới của sóng điện từ, bao gồm mặt trên và mặt dưới. Tuy nhiên, do có đế Si (không trong suốt hoàn toàn với sóng điện từ ở vùng tần số THz), cấu trúc DP bao gồm cả đế Si chưa hoàn toàn đối xứng với hai chiều tới của sóng điện từ (mặt trên và mặt dưới của DP), vấn đề này sẽ được thảo luận chi tiết hơn trong nội dung thảo luận kết quả. Trong vùng tần số khảo sát 1,2-2,6 THz, kim loại Au được thiết kế với độ dẫn $4,561 \cdot 10^7$ S/m, điện môi SiO_2 được đưa vào mô phỏng với hằng số điện môi 3,9, độ tổn hao 0,002, đế Si có hằng số điện môi 11,9 và độ tổn hao 0,005 [19, 20].



Hình 1. Thiết kế ô cơ sở của cấu trúc DP với một DP (gồm hai đĩa kim loại Au và một đĩa điện môi SiO_2 kẹp giữa) trên một đế Si.

Các tham số tán xạ S_{11} và S_{21} của sóng điện từ khi tương tác với cấu trúc vật liệu được xác định bằng phương pháp tích phân hữu hạn. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng phần mềm mô phỏng CST đã được tích hợp phương pháp tích phân hữu hạn. Toàn bộ cấu trúc được nhúng trong môi trường tham chiếu là chân không, sóng điện từ đến theo hướng véc tơ \mathbf{k} vuông góc với mặt phẳng mẫu như hình 1, điều kiện biên được xác định đối với một ô cơ sở. Từ các tham số tán xạ có thể xác định độ truyền qua, độ phản xạ và độ hấp thụ của cấu trúc lần lượt:

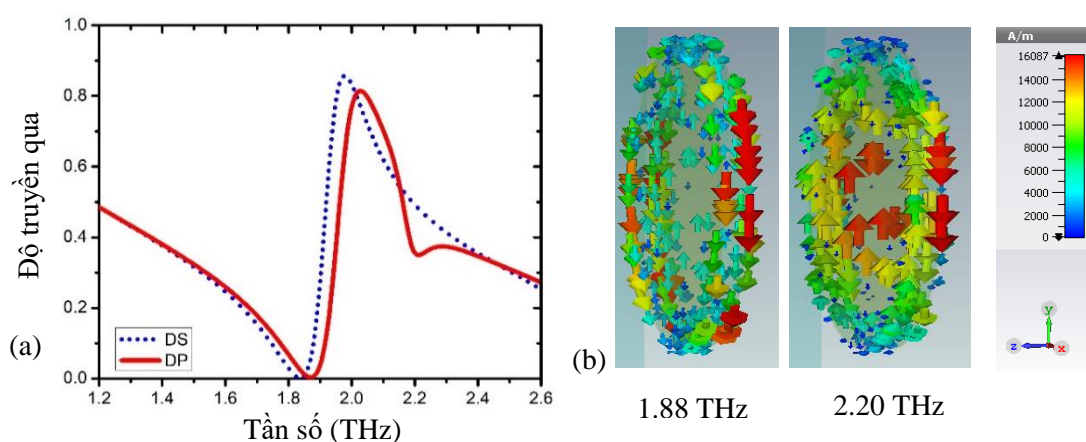
$$T = |S_{21}|^2; R = |S_{11}|^2; A = 1 - T - R$$

Bên cạnh mô phỏng, mô hình mạch điện tương đương LC cũng được phân tích để làm rõ bản chất cộng hưởng của các đỉnh hấp thụ trong phổ hấp thụ của cấu trúc.

3. MÔ PHỎNG TÍNH TOÁN VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả mô phỏng

Phổ truyền qua của cấu trúc DP được trình bày trong hình 2a, tương ứng với đường nét liền màu đỏ, cho thấy trong vùng tần số khảo sát xuất hiện hai đỉnh cộng hưởng lần lượt tại tần số 1,88 THz và tần số 2,20 THz. Bên cạnh phổ truyền qua của DP, phổ truyền qua của cấu trúc DS (Disk Shape) được trình bày tương ứng với đường chấm màu xanh. Cấu trúc DS là cấu trúc chỉ gồm một đĩa kim loại Au đặt trên đế Si. Có thể thấy cộng hưởng tại tần số 1,88 THz của cấu trúc DP tương tự như cộng hưởng tại tần số 1,83 THz của cấu trúc DS và được xác định là do cộng hưởng điện gây ra. Để làm rõ bản chất cộng hưởng điện từ tại hai tần số cộng hưởng của cấu trúc DP, các mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt, phân bố cường độ điện trường, phân bố cường độ từ trường được thực hiện.



Hình 2. (a) Phổ truyền qua của cấu trúc DP và cấu trúc DS;
(b) Phân bố dòng điện bề mặt của cấu trúc DP tại hai tần số cộng hưởng.

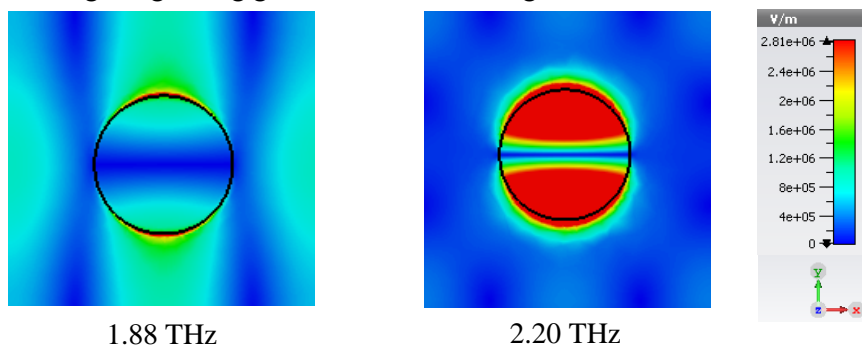
Mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt trên hai đĩa Au của cấu trúc DP tại hai tần số cộng hưởng được trình bày trong hình 2b. Kết quả cho thấy: tại tần số 1,88 THz dòng điện phân bố trên hai đĩa Au là song song cùng chiều, phù hợp với nhận xét cộng hưởng tại tần số 1,88 THz là do cộng hưởng điện gây ra; tại tần số 2,20 THz dòng điện phân bố trên hai đĩa Au là đối song, từ đó cho thấy cộng hưởng tại tần số 2,20 THz là do cộng hưởng từ gây ra. Chú ý rằng, cộng hưởng điện của cấu trúc DP tương tự như cộng hưởng điện của cấu trúc DS, tuy nhiên, cộng hưởng điện của cấu trúc DP dịch nhẹ lên vùng tần số cao so với cộng hưởng điện của cấu trúc DS. Nguyên nhân là do trong cấu trúc DP có hai đĩa Au nên mật độ hạt tải hiệu dụng tăng dẫn đến tần số plasma tăng như trong công thức (1) và tần số cộng hưởng điện tăng.

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 \epsilon_{tb} m_e} \quad (1)$$

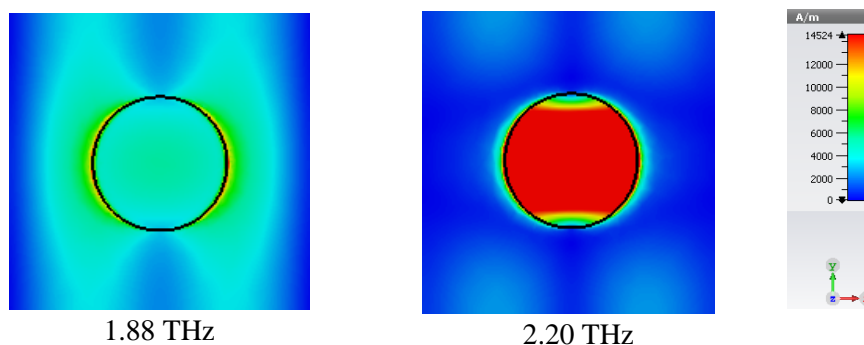
Trong đó: N là mật độ hạt tải điện hiệu dụng; m_e là khối lượng hiệu dụng của điện tử; ϵ_0 là hằng số điện và ϵ_{tb} là độ điện thẩm trung bình của toàn bộ cấu trúc.

Các kết quả mô phỏng phân bố cường độ điện trường tại hai tần số cộng hưởng của cấu trúc DP được trình bày trong hình 3. Có thể thấy, tại tần số cộng hưởng 1,88 THz điện trường phân bố tập trung ở bên ngoài hai đầu của cặp đĩa dọc theo hướng phân cực điện của sóng tới, trong khi đó tại tần số cộng hưởng 2,20 THz điện trường phân bố tập trung tại bên trong hai đầu của cặp đĩa dọc theo hướng phân cực điện trường của sóng tới. Từ đó có thể thấy, tại tần số 1,88 THz, điện tích phân bố ở hai đầu của một cặp đĩa là cùng dấu; tại tần số 2,20 THz, điện tích phân bố ở hai đầu của một cặp đĩa là trái dấu. Phân bố từ trường tại hai tần số cộng hưởng được trình

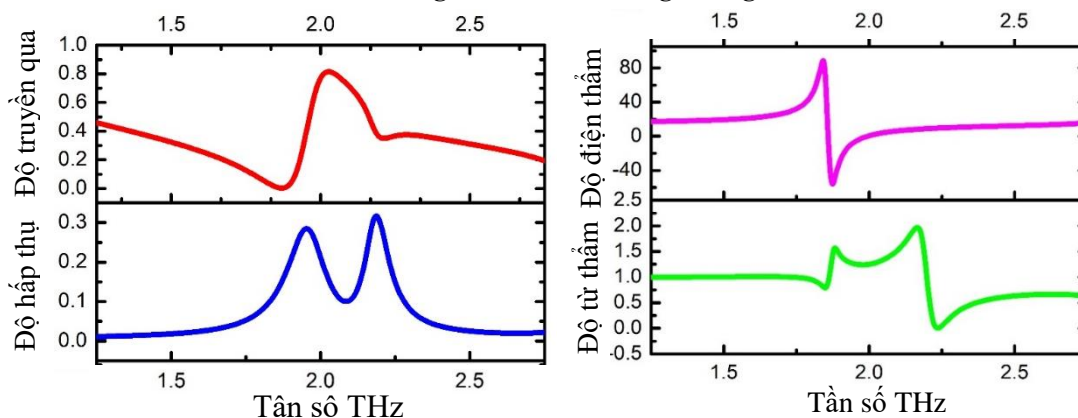
bày trong hình 4 phù hợp với giả thuyết này. Tại tần số 1,88 THz, do dòng điện trên hai đĩa Au là song song cùng chiều nên từ trường tập trung mạnh bên ngoài cặp đĩa dọc theo hướng phân cực điện, trong khi đó tại tần số 2,20 THz, dòng điện trên hai đĩa Au là đối song nên từ trường tập trung hầu hết trong vùng không gian đĩa đệm điện môi giữa hai đĩa Au.



Hình 3. Phân bố điện trường tại hai tần số cộng hưởng của cấu trúc DP.



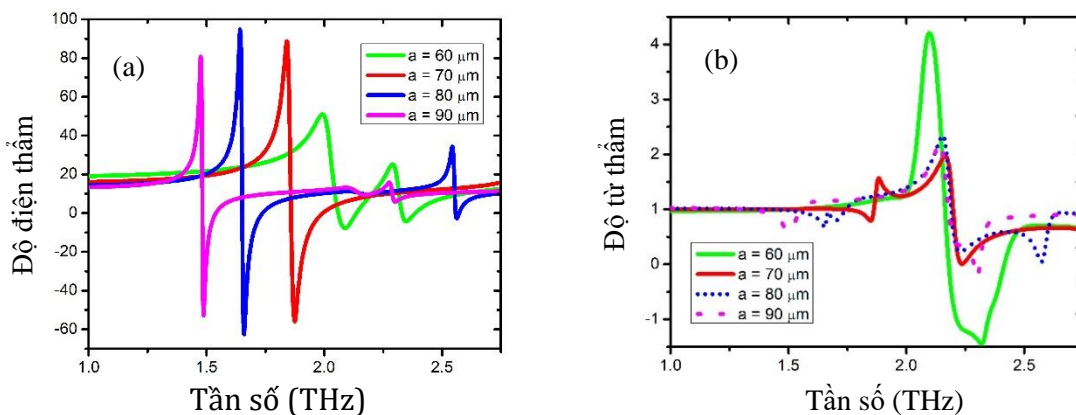
Hình 4. Phân bố từ trường tại hai tần số cộng hưởng của cấu trúc DP.



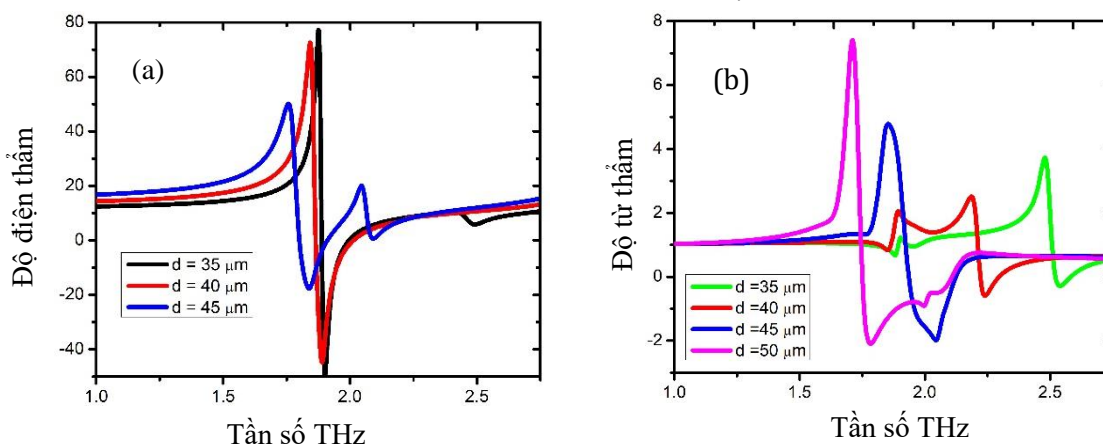
Hình 5. Kết quả mô phỏng tính toán phổ truyền qua, phổ hấp thụ, phần thực của độ điện thâm, phần thực của độ từ thâm của cấu trúc DP.

Các kết quả mô phỏng ở cả hình 3 và hình 4 đều cho thấy: với cùng một thang đo mô phỏng, tại tần số 1,88 THz, cả phân bố điện trường và phân bố từ trường lần lượt đều yếu hơn phân bố điện trường và phân bố từ trường tại tần số 2,20 THz. Như vậy, có thể khẳng định cộng hưởng của DP tại tần số 1,88 THz là cộng hưởng điện và tại tần số 2,20 THz là cộng hưởng từ. Từ các kết quả mô phỏng phổ S_{11} và S_{21} , các tham số: độ hấp thụ, độ điện thâm, độ từ thâm của cấu trúc được tính toán và trình bày trong hình 5. Kết quả thu được hoàn toàn phù hợp với kết quả mô

phông phân bố điện trường, từ trường và dòng điện bề mặt ở trên. Cụ thể, độ điện thẩm xuất hiện một đỉnh cộng hưởng tại tần số 1,88 THz, trong khi độ từ thẩm xuất hiện một đỉnh cộng hưởng tại tần số 2,20 THz. Phổ hấp thụ của cấu trúc DP ghi nhận hai đỉnh hấp thụ tương ứng với hai cộng hưởng điện và cộng hưởng từ, do đó, có thể giả thiết rằng cực đại hấp thụ là do các cộng hưởng gây ra.



Hình 6. (a) Độ điện thẩm hiệu dụng; (b) Độ từ thẩm hiệu dụng của cấu trúc DP khi tham số kích thước ô cơ sở a thay đổi.



Hình 7. (a) Độ điện thẩm hiệu dụng; (b) Độ từ thẩm hiệu dụng của cấu trúc DP khi đường kính đĩa tròn d thay đổi.

Chúng tôi cũng tiến hành nghiên cứu sự phụ thuộc của tần số cộng hưởng điện trong cấu trúc DP vào các tham số cấu trúc hình học bao gồm kích thước ô cơ sở a và đường kính đĩa kim loại d . Kết quả trình bày trong hình 6 và hình 7 cho thấy: tần số cộng hưởng điện phụ thuộc vào cả hai tham số kích thước này, tuy nhiên sự phụ thuộc vào kích thước ô cơ sở a mạnh hơn nhiều so với sự phụ thuộc vào đường kính đĩa kim loại d . Cụ thể khi a tăng dần thì tần số cộng hưởng điện giảm rõ rệt, khi d tăng thì tần số cộng hưởng điện giảm nhẹ. Sự giảm tần số cộng hưởng điện khi a tăng được giải thích do khi đó thể tích hiệu dụng tăng trong khi lượng hạt tải không đổi, dẫn đến mật độ hạt tải giảm và tần số plasma giảm như trong phương trình (1). Khi d tăng trong khi a không đổi thì đồng thời mật độ hạt tải hiệu dụng tăng và khối lượng hiệu dụng của hạt cũng tăng do hạt tải phải đi quãng đường dài hơn. Khi d tăng thì tỉ số N/m_e giảm dẫn đến tần số plasma giảm và tần số cộng hưởng điện giảm [21], tuy nhiên, sự thay đổi là nhỏ do cả N và m_e đều biến thiên cùng dấu khi d thay đổi. Đối với tần số cộng hưởng từ, sự ảnh hưởng của tham số cấu trúc

a và d là khác nhau rõ nét. Tần số cộng hưởng từ gần như không đổi khi a thay đổi, trong khi đó tần số cộng hưởng từ giảm gần như tỉ lệ nghịch với d . Sự phụ thuộc của tần số cộng hưởng từ được giải thích chi tiết dựa vào mô hình mạch điện LC tương đương.

3.2. Mô hình mạch điện LC tương đương

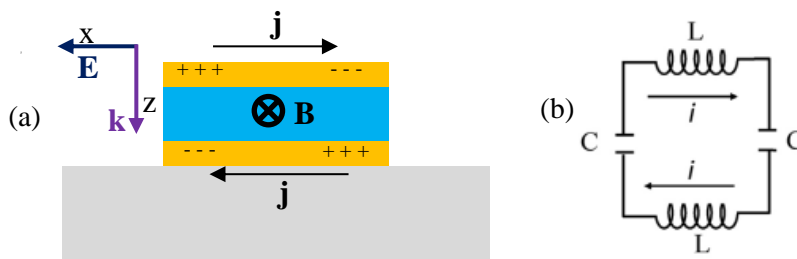
Trong nội dung này chúng tôi tập trung làm rõ tính chất cộng hưởng từ của cấu trúc DP thông qua mô hình mạch điện LC tương đương. Từ phân bố dòng điện bề mặt, phân bố điện trường và phân bố từ trường tại tần số cộng hưởng từ, sự phân bố điện tích trên các đĩa Au tại tần số cộng hưởng từ được giả thiết như trong hình 8a, khi đó cặp đĩa tương tự như một tứ cực điện.

Mô hình mạch điện LC tương đương cho cộng hưởng từ của cấu trúc DP được xây dựng và trình bày trong hình 8b. Hai đĩa Au được biểu diễn tương ứng thành hai cuộn cảm mà hệ số tự cảm có thể xác định được thông qua cấu trúc hình học của đĩa. Bằng phương pháp giải tích, dựa vào các phương trình định lý Ostrogradsky-Gauss, định lý Ampere, độ tự cảm L_m được xác định gần đúng:

$$L_m = \mu_0 (t_s + 2t_m) \frac{\pi}{4} \quad (2)$$

Trong khi đó, tụ điện C_m được tạo thành bởi hai bản tụ - tương đương với phân diện tích tập trung điện tích ở hai đĩa Au. Giá trị điện dung của tụ điện được xác định:

$$C_m = \epsilon_0 \epsilon_s \frac{c_1 \pi d^2}{4t_s} \quad (3)$$



Hình 8. Mô hình mạch điện tương đương tại tần số cộng hưởng từ.

Trong các phương trình (2) và (3), các tham số cấu trúc t_s , t_m và d như được chỉ ra ở hình 1. Các tham số ϵ_0 , μ_0 lần lượt là hằng số điện và hằng số từ, ϵ_s là độ điện thẩm của chất điện môi kẹp giữa hai đĩa Au. Trong trường hợp này, chất điện môi được chọn là SiO_2 có độ điện thẩm $\epsilon_s = 3,9$ và độ tổn hao 0,002. Từ đó, tần số cộng hưởng từ được xác định:

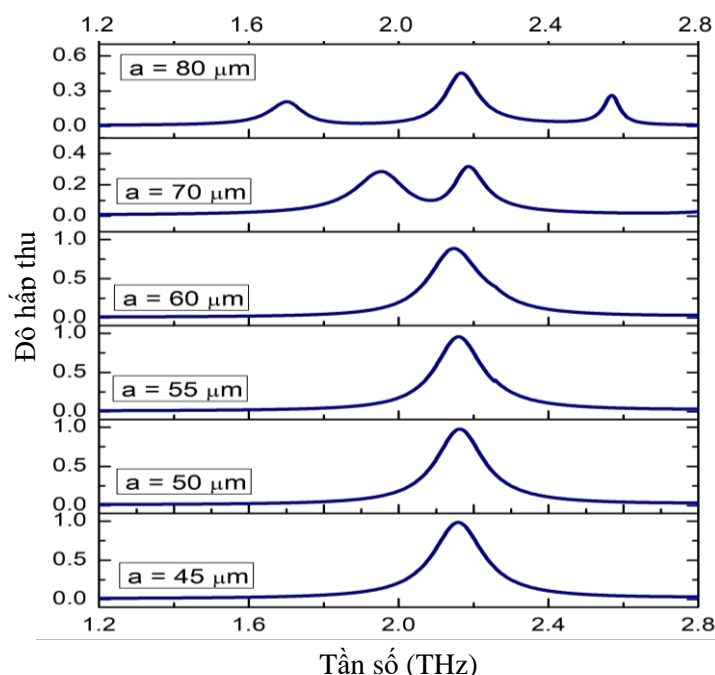
$$f_m = \frac{2c\sqrt{t_s}}{\pi^2 d \sqrt{\epsilon_s c_1 (t_s + 2t_m)}} \quad (4)$$

Trong đó: $c = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 3.10^8 \text{ m/s}$; c_1 là hệ số tỉ lệ diện tích tập trung điện tích trên tổng diện tích đĩa. Hệ số này thường có giá trị từ 0,10 đến 0,25 tùy vào hình dạng của cấu trúc, được xác định bằng cách mô phỏng vùng tập trung điện tích trên các cấu trúc kim loại [16]. Đối với cấu trúc DP, với $c_1 = 0,107$, kết quả tính toán cho thấy tần số cộng hưởng từ là 2,20 THz, phù hợp với kết quả mô phỏng ở trên. Kết quả tần số cộng hưởng từ tính toán được từ mô hình mạch điện tương đương cũng cho thấy giá trị tần số này phụ thuộc vào đường kính đĩa tròn, bề dày đĩa đệm điện môi t_s và hằng số điện môi ϵ_s .

3.3. Điều khiển chông chấp cộng hưởng điện từ

Từ các kết quả phân tích về tính chất cộng hưởng điện và cộng hưởng từ của cấu trúc DP, chúng tôi nhận thấy rằng: có thể điều khiển được cộng hưởng điện của cấu trúc DP thông qua tham số ô cơ sở a , từ đó có thể chông chấp cộng hưởng điện và cộng hưởng từ, dẫn đến hiệu suất hấp thụ của cấu trúc DP tại tần số cộng hưởng được tăng cường. Phổ hấp thụ của cấu trúc DP được mô phỏng và tính toán khi giảm dần kích thước ô cơ sở từ $80\ \mu\text{m}$ đến $45\ \mu\text{m}$ và được trình bày trong hình 9. Khi kích thước ô cơ sở bằng $80\ \mu\text{m}$, phổ hấp thụ xuất hiện ba đỉnh hấp thụ tại các tần số $1,70\ \text{THz}$, $2,17\ \text{THz}$ và $2,57\ \text{THz}$ có độ hấp thụ tương ứng là 24% , 46% và 24% . Các kết quả mô phỏng và phân tích mạch điện LC ở trên đã xác định được: đỉnh hấp thụ ở tần số thấp $1,70\ \text{THz}$ là do cộng hưởng điện, đỉnh hấp thụ tại tần số $2,17\ \text{THz}$ là do cộng hưởng từ. Đỉnh hấp thụ tại tần số cao $2,57\ \text{THz}$ được nhận định là do cộng hưởng điện bậc cao.

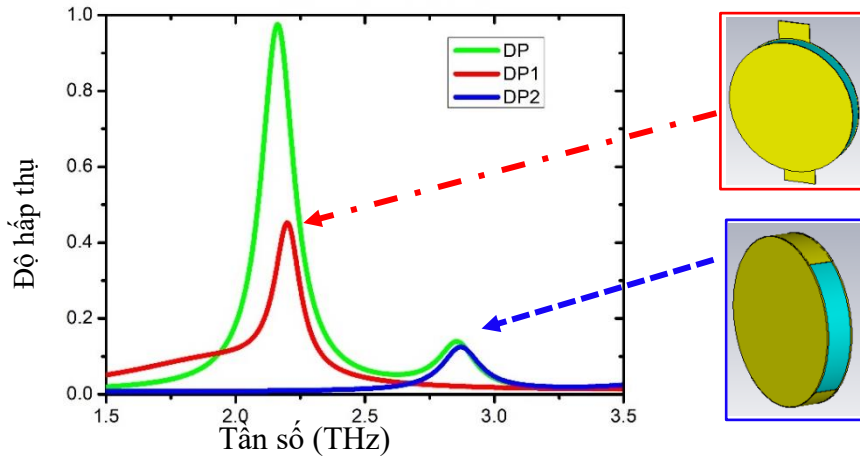
Khi a giảm dần đến $70\ \mu\text{m}$, đỉnh hấp thụ do cộng hưởng điện dịch lên tần số cao và biên độ tăng dần, trong khi đó đỉnh hấp thụ do cộng hưởng từ không thay đổi vị trí nhưng biên độ giảm một chút. Sự dịch đỉnh hấp thụ của cộng hưởng điện do tần số cộng hưởng điện tăng và sự không đổi vị trí đỉnh hấp thụ của cộng hưởng từ đã được phân tích ở trên. Sự thay đổi biên độ của các đỉnh hấp thụ được giải thích do sự thay đổi về phối hợp trở kháng. Khi a bằng $70\ \mu\text{m}$, đỉnh hấp thụ do cộng hưởng điện dịch đến tần số $1,95\ \text{THz}$ với độ hấp thụ đạt 30% , đỉnh hấp thụ do cộng hưởng từ gây ra tại tần số $2,18\ \text{THz}$ với độ hấp thụ đạt 36% , đỉnh hấp thụ do cộng hưởng điện bậc cao gây ra đã dịch ra ngoài vùng tần số quan sát. Khi a giảm đến $60\ \mu\text{m}$, phổ hấp thụ còn một đỉnh hấp thụ tại tần số $2,15\ \text{THz}$ với độ hấp thụ đạt 90% . Khi đó cộng hưởng điện đã trùng lên cộng hưởng từ, cộng hưởng điện bậc cao khi đó đã dịch ra khỏi vùng tần số quan sát. Khi a giảm đến $55\ \mu\text{m}$ và tiếp tục giảm, phổ hấp thụ vẫn duy trì một đỉnh hấp thụ tại tần số $2,15\ \text{THz}$ với độ hấp thụ đạt 98% .



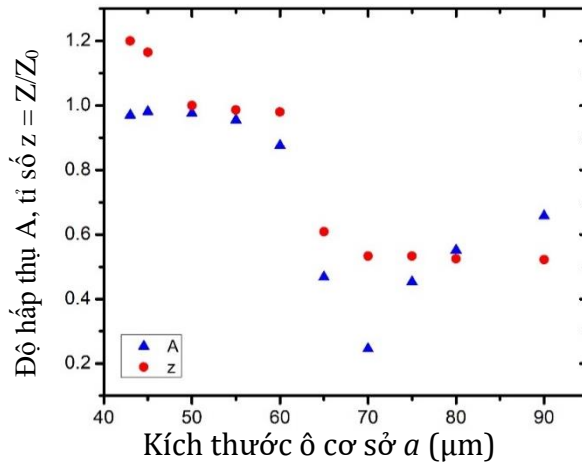
Hình 9. Phổ hấp thụ của DP khi thay đổi kích thước ô cơ sở a .

Để làm rõ hơn nữa bản chất vật lý của sự hấp thụ hiệu suất cao là do chông chấp cộng hưởng điện và cộng hưởng từ, các phổ hấp thụ của DP được mô phỏng tính toán khi triệt tiêu cộng hưởng điện hoặc cộng hưởng từ và được trình bày trong hình 10. Để triệt tiêu cộng hưởng điện tại vị trí hấp thụ của DP, hai đĩa Au phía dưới của hai ô cơ sở kế tiếp được nối với nhau dọc theo

hướng phân cực điện trường (DP1). Để triệt tiêu cộng hưởng từ tại vị trí hấp thụ của DP, hai đĩa Au của cặp đĩa được nối với nhau ở hai đầu mỗi đĩa dọc theo hướng phân cực điện trường (DP2). Các phổ hấp thụ trong hình 10 cho thấy: trong vùng chồng chập cộng hưởng của DP, phổ hấp thụ của DP1 (đường màu đỏ) vẫn còn một đỉnh hấp thụ với hiệu suất 45%, đúng như dự đoán là do cộng hưởng từ gây ra; trong khi đó, trong vùng chồng chập cộng hưởng của DP, phổ hấp thụ của DP2 (đường màu xanh dương) hoàn toàn không còn đỉnh hấp thụ, độ hấp thụ giảm về gần bằng không. Kết quả phổ hấp thụ của DP2 được giải thích: khi nối hai đĩa Au của DP lại, làm triệt tiêu cộng hưởng từ. Đồng thời khi đó, tần số plasma hiệu dụng của cấu trúc giảm do dòng điện trong trường hợp này chỉ còn phân bố trên một đĩa Au, dẫn đến cộng hưởng điện cũng đã bị dịch đi.



Hình 10. Phổ hấp thụ của: cấu trúc DP, cấu trúc DP1, cấu trúc DP2.

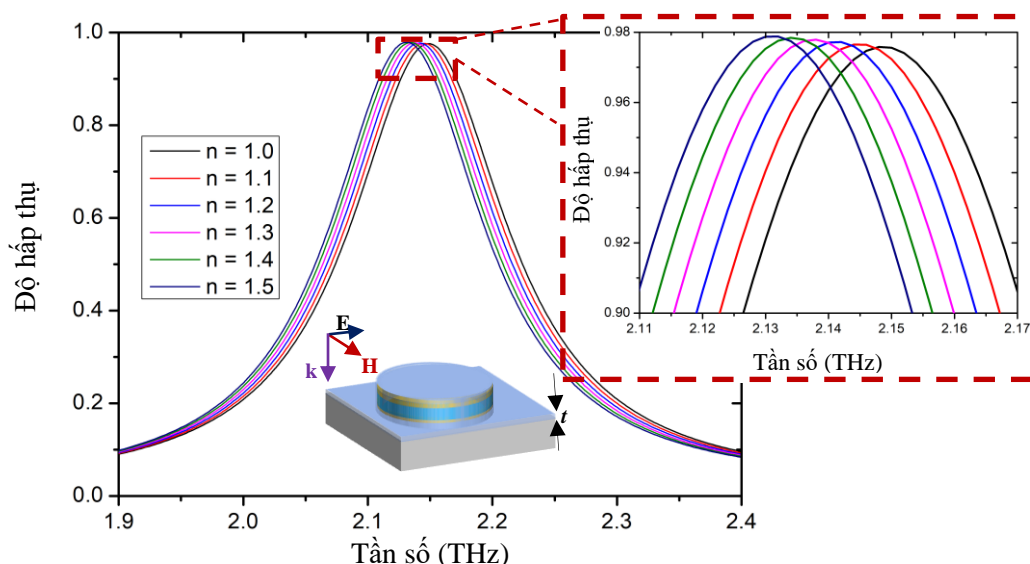


Hình 11. Độ hấp thụ và tỉ số z giữa trở kháng hiệu dụng của DP và trở kháng của chân không khi a thay đổi.

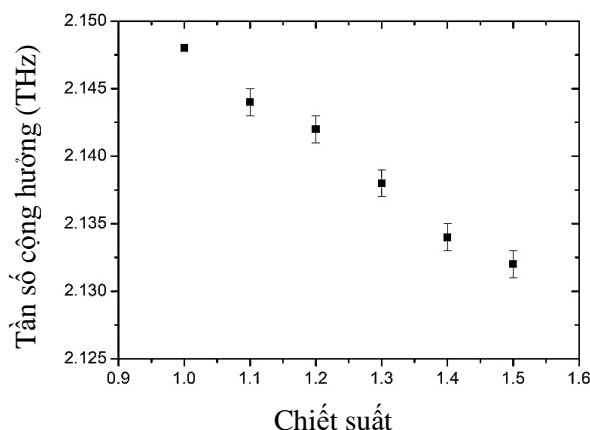
Để đạt được hiệu suất hấp thụ cao, ngoài các yếu tố cộng hưởng, điều kiện phối hợp trở kháng đóng vai trò quan trọng. Khi trở kháng của vật liệu và trở kháng của môi trường bằng nhau (phối hợp trở kháng hoàn hảo), toàn bộ sóng điện từ đi được vào trong vật liệu, khi đó, cộng hưởng mới có thể dẫn đến sự hấp thụ hoàn hảo. Với cấu trúc DP, các kết quả mô phỏng tính toán trình bày trong hình 11 cho thấy, trở kháng tỉ đối z (tỉ số giữa trở kháng của vật liệu và trở kháng của môi trường xung quanh – chân không) phụ thuộc vào kích thước ô cơ sở a. Tại tần số 2,15 THz, khi a giảm dần từ 90 μm đến 65 μm, trở kháng tỉ đối thay đổi trong khoảng từ 0,45 đến 0,60, khi đó độ hấp thụ đạt hiệu suất trong khoảng từ 25% đến 65%. Khi a giảm đến 60 μm, trở kháng tỉ đối đạt kết quả gần bằng 1, dẫn đến độ hấp thụ đạt hiệu suất cao.

3.4. Ứng dụng MMA cho cảm biến chiết suất

MMA hấp thụ hai chiều cấu trúc DP được ứng dụng trong cảm biến chiết suất bằng cách phủ một lớp mỏng vật liệu có chiết suất n , lớp vật liệu này có độ dày t là 1 μm như trong hình 12. Phổ hấp thụ của MMA khi có lớp vật liệu với chiết suất n được trình bày trong hình 12, với các giá trị n khác nhau, kết quả cho thấy: khi n tăng dần từ 1 đến 1,5 thì trong vùng tần số khảo sát, phổ hấp thụ duy trì một đỉnh hấp thụ tại tần số cộng hưởng với cường độ hấp thụ gần như không thay đổi, trong khi tần số của đỉnh hấp thụ dịch về vùng tần số thấp. Cụ thể, khi $n = 1$, đỉnh hấp thụ tại tần số 1,148 THz với cường độ hấp thụ 97,5%, không thay đổi so với đỉnh hấp thụ của MMA không có lớp chiết suất n ; khi $n = 1,5$ đỉnh hấp thụ tại tần số 1,132 THz với cường độ hấp thụ 97,8%. Sự dịch về vùng tần số thấp của đỉnh hấp thụ tương đối tuyến tính với sự tăng của chiết suất n . Kết quả này là do sự đóng góp của lớp chiết suất n vào chiết suất hiệu dụng của MMA. Khi chiết suất hiệu dụng của MMA tăng dẫn đến cả tần số cộng hưởng điện và tần số cộng hưởng từ của MMA giảm do đó tần số của đỉnh hấp thụ giảm. Như vậy, dựa vào sự dịch đỉnh hấp thụ của MMA có lớp chiết suất n so với đỉnh hấp thụ của MMA ban đầu không có lớp chiết suất n , có thể xác định được chiết suất n của vật liệu.



Hình 12. Phổ hấp thụ mô phỏng của MMA cấu trúc DP được phủ một lớp có chiết suất n với các giá trị khác nhau.



Hình 13. Sai lệch tần số cộng hưởng tương ứng với sai số 5% của độ dày lớp chiết suất n .

Quá trình phủ lớp vật liệu để xác định chiết suất có thể xảy ra sai số. Trong nghiên cứu này, chúng tôi mô phỏng tính toán tần số cộng hưởng của cấu trúc khi độ dày của lớp vật liệu cần xác định chiết suất có sai số là 5%. Kết quả được trình bày trong hình 13, ứng với mỗi giá trị của chiết suất n , khi độ dày của lớp vật liệu chiết suất n thay đổi từ 0,95 μm đến 1,05 μm thì tần số cộng hưởng sai lệch 1 GHz xung quanh tần số cộng hưởng ứng với độ dày là 1 μm . Mặc dù sai lệch tần số cộng hưởng 1 GHz, nhưng tần số cộng hưởng ở vùng THz nên sai lệch tỉ đối là tương đối nhỏ. Bên cạnh đó, do tính chất hấp thụ của DP là hấp thụ hai chiều theo cơ chế truyền qua nên diện tích bề mặt mà các điểm của ăng ten phát tiếp xúc với chất cần phân tích là lớn hơn với trường hợp cấu trúc hấp thụ một chiều theo cơ chế phản xạ nên hiệu ứng dịch chuyển mạnh hơn, độ nhạy do đó sẽ được tăng lên.

4. KẾT LUẬN

Dựa trên các kết quả mô phỏng và phân tích mô hình mạch điện LC tương đương chúng tôi đã làm rõ tính chất điện từ của cấu trúc DP, từ đó, đề xuất và chứng minh một MMA cấu trúc DP không sử dụng mặt phẳng kim loại liên tục, thay vào đó sử dụng các bộ cộng hưởng cặp đĩa kim loại Vàng. Bằng cách điều khiển tham số cấu trúc, tần số cộng hưởng điện được điều khiển, từ đó MMA được thiết kế cho hiệu suất hấp thụ cao tại tần số cộng hưởng dựa trên sự chòong chập cộng hưởng điện và cộng hưởng từ. Kết quả thu được MMA có thể đạt hiệu suất hấp thụ lên đến 98% tại tần số 2,15 THz. Một ứng dụng thử nghiệm của MMA trong cảm biến chiết suất được thiết kế mô phỏng, với một lớp mỏng 1 μm phủ lên bề mặt của MMA, khi chiết suất tăng từ 1 đến 1,5 thì tần số đỉnh hấp thụ giảm từ 1,148 THz đến 1,132 THz trong khi cường độ hấp thụ không đổi.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả cảm ơn sự tài trợ về kinh phí của Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt nam theo đề tài QTBY01.01/20-21.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. 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** (2012), pp. 635-643.
- [2]. J. Kim, K. Han, K. Fan, X. Zhang, and J. W. Hahn, “Selective dual-band metamaterial perfect absorber for infrared stealth technology,” *Sci. Rep.*, **Vol 7** (2017), pp. 6740-9.
- [3]. G. Liu, X. Liu, J. Chen, Y. Li, L. Shi, G. Fu and Z. Liu, “Near-unity, full-spectrum, nanoscale solar absorbers and near-perfect blackbody emitters”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **Vol 190** (2019), pp. 20-29.
- [4]. J. Li, X. Chen, Z. Yi, H. Yang, Y. Tang, Y. Yi, W. Yao, J. Wang, Y. Yi, “Broadband solar energy absorber based on monolayer molybdenum disulfide using tungsten elliptical arrays”, *Mater. Today Energy*, **Vol 16** (2020), pp. 100390-8.
- [5]. X. Liu, T. Tyler, T. Starr, A. F. Starr, N. M. Jokerst, W. J. Padilla, “Taming the Blackbody with Infrared Metamaterials as Selective Thermal Emitters”, *Phys. Rev. Lett.* **Vol 107**(4) (2011), pp. 45901-45905.
- [6]. C. Wu, B. Neuner III, J. John, A. Milder, B. Zollars, S. Savoy, G. Shvets, “Metamaterial-based integrated plasmonic absorber/emitter for solar thermo-photovoltaic systems”, *J. Opt.* **Vol 14**(2) (2012), pp. 024005-7
- [7]. E. Ashalley, K. Acheampong, L. V. Besteiro, P. Yu, A. Neogi, A. O. Govorov, Z. M. Wang, “Multitask deep-learning-based design of chiral plasmonic metamaterials”, *Photonics Res.* **Vol 8**(7) (2020), pp. 1213-1225.
- [8]. X. Liu, T. Starr, A. F. Starr, W. J. Padilla, “Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-Unity Absorbance”, *Phys. Rev. Lett* **Vol 104**(20) (2010), pp. 207403-4.
- [9]. B. S. Tung, D. D. Thang, D. H. Luu, V. D. Lam, A. Ohi, T. Nabatame, Y. P. Lee, T. Nagao, H. V. Chung, “Metamaterial-enhanced vibrational absorption spectroscopy for the detection of protein molecules”, *Sci. Rep.* **Vol 6** (2016), pp. 32123-7.
- [10]. S. Bagheri, N. Strohfeldt, F. Sterl, A. Berrier, A. Tittl, H. Giessen, “Large-area low-cost plasmonic perfect absorber chemical sensor fabricated by laser interference lithography” *ACS Sens.* **Vol 1** (2016), pp. 1148-1154.

- [11].S. Kang, Z. Qian, V. Rajaram, S. D. Calisgan, A. Alù. M. Rinaldi, “Ultra-Narrowband metamaterial absorbers for high spectral resolution infrared spectroscopy”, *Adv. Opt. Mater.* **Vol 7**(2) (2019), pp. 1801236-8.
- [12].S. Feng, Y. Zhao, Y-L. Liao, “Dual-band dielectric metamaterial absorber and sensing applications”, *Results Phys.* **Vol 18** (2020), pp. 103272-7.
- [13].N. T. Tung, T. Tanaka, “Characterizations of an infrared polarization-insensitive metamaterial perfect absorber and its potential in sensing applications”, *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.* **Vol 28** (2018), pp. 100-105.
- [14].M. Jiang, F. Hu, Y. Qian, L. Zhang, W. Zhang, J. Han, “Tunable terahertz band-pass filter based on MEMS reconfigurable metamaterials”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **Vol 53**(6) (2019), pp. 065107-8.
- [15].B-X. Wang, Y. He, P. Lou, W. Xing, “Design of a dual-band terahertz metamaterial absorber using two identical square patches for sensing application”, *Nanoscale Adv* **Vol 2** (2020), pp. 763-769.
- [16].J. Zhou, E. N. Economou, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, “Unifying approach to left-handed material design,” *Opt. Lett.* **Vol 31** (2006), pp. 3620-2.
- [17].D. T. Viet, B. S. Tung, L. V. Quynh, N. T. Hien, N. T. Tuan, N. T. Tung, Y. P. Lee, V. D. Lam, “Design, fabrication and characterization of a perfect absorber using simple cut-wire metamaterials”, *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* **Vol 3** (2012), pp. 045014-5.
- [18].D. T. Viet, N. V. Hieu, V. D. Lam, N. T. Tung, “Isotropic metamaterial perfect absorbers using cut-wire-pair structures”, *Appl. Phys. Express* **Vol 8**, (2015), pp. 032001-3.
- [19].P. R. Gray, P. J. Hurst, S. H. Lewis, and R. G. Meyer, “Analysis and Design of Analog Integrated Circuits”, 5th Wiley (2009), p. 40.
- [20].A. M. A. Sabaawi, C. C. Tsimenidis, and B. S. Sharif, “Overview of nanoantennas for solar rectennas” in *Rectenna Solar Cells*, edited by G. Moddel and S. Grover, Springer, New York (2013), p. 236.
- [21].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 Advances* **Vol 5** (2015), pp. 077119-8.

ABSTRACT

Research and design two-dimensional metamaterials absorber operating in the THz frequency region and applications in refractive index sensor

Metamaterials absorbers (MMA) are typically designed with resonators, a continuous metal plane, and a sandwiched dielectric layer. The absorption is based on losses in the dielectric layer caused by magnetic resonances. Such MMAs only allow the absorption of electromagnetic waves in the incoming direction, the electromagnetic wave is completely reflected in the opposite direction, and outside the absorption frequency region, the electromagnetic wave is also almost completely reflected. In this work, we propose an MMA structure that does not use the continuous metal plane, using Gold metal-disk pair resonators instead. MMA is designed for high absorption efficiency at a resonant frequency by overlapping magnetic and electric resonances. Simulation results show that MMA can achieve absorption efficiency up to 98% at 2.15 THz. Because there is no metal plane, MMA still allows transmission of electromagnetic waves outside the absorption frequency region, this property makes MMA more flexible and effective in THz devices.

Keywords: THz; Metamaterials; Absorbs two-dimensional electromagnetic waves; Refractive index sensor.