

Nghiên cứu hiệu ứng dịch tần trong vật liệu metamaterial tích hợp graphene

Trần Văn Huỳnh^{1*}, Bùi Xuân Khuyển^{2*}, Bùi Sơn Tùng³,
Vũ Đình Lãm³, Nguyễn Thanh Tùng²

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

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.

*Email: tranhuynhsp@gmail.com; khuyenbx@ims.vast.ac.vn

Nhận bài: 10/8/2023; Hoàn thiện: 01/11/2023; Chấp nhận đăng: 12/12/2023; Xuất bản: 25/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.92.2023.107-113>

TÓM TẮT

Với những tiềm năng ứng dụng to lớn trong các lĩnh vực như bức xạ nhiệt hiệu suất cao, cảm biến hóa sinh độ nhạy cao, các kỹ thuật cảm biến phân tử và trong lĩnh vực năng lượng, vật liệu metamaterial (MMA) hấp thụ sóng THz hiện đang rất được quan tâm nghiên cứu. Trong đó, các nghiên cứu nhằm tạo ra các vật liệu MMA hấp thụ có điều khiển, có khả năng thay đổi tính chất hấp thụ sau khi chế tạo bằng các tác động ngoại vi có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Trong nghiên cứu này chúng tôi đề xuất một thiết kế có thể thay đổi tần số hấp thụ của vật liệu MMA bằng cách kết hợp với một lưới graphene. Tần số cộng hưởng của cấu trúc được điều khiển bằng điện trường ngoài thông qua năng lượng Fermi của graphene. Cấu trúc MMA được thiết kế đơn giản gồm các đĩa vàng đặt trên lưới graphene. Kết quả mô phỏng cho thấy tần số hấp thụ được điều khiển từ 1,67 THz đến 1,9 THz tương ứng với sự thay đổi năng lượng Fermi của graphene từ 0,0 eV đến 0,5 eV.

Từ khóa: THz; Metamaterial; Hấp thụ sóng điện từ; Dịch tần.

1. MỞ ĐẦU

Kể từ khi vật liệu nhân tạo có khả năng hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ được chứng minh bởi Landy và các cộng sự lần đầu tiên vào năm 2008 [1], các hướng nghiên cứu về vật liệu này liên tục được mở rộng và phát triển và được gọi là vật liệu biến hóa hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ (metamaterial absorber - MMA). Điều thú vị là tính chất hấp thụ của MMA có thể đạt được tùy ý phụ thuộc vào sự điều chỉnh các tham số cấu trúc cũng như các thành phần vật liệu. Tuy nhiên, trong một số trường hợp yêu cầu tính chất hấp thụ của vật liệu cần linh hoạt, có thể thay đổi được ngay cả sau khi đã chế tạo. Do đó đã có nhiều hướng nghiên cứu khác nhau nhằm điều khiển tính chất của MMA bằng các yếu tố ngoại vi như cơ học, nhiệt độ, điện trường, từ trường [2-5]. Bên cạnh đó, các hướng nghiên cứu về vật liệu MMA trong vùng tần số THz và hồng ngoại cũng được quan tâm do công nghệ THz cũng như các thiết bị THz hứa hẹn dẫn đến nhiều tiềm năng ứng dụng trong tương lai. Một số nghiên cứu đã chỉ ra khả năng ứng dụng thực tế của dải tần số THz trong nhiều lĩnh vực như thiên văn học, truyền thông, hình ảnh quang phổ [6, 7]. Đặc biệt dải tần số THz thấp (< 2 THz) rất được quan tâm nghiên cứu trong lĩnh vực liên lạc không dây với tốc độ dữ liệu cao hơn nhiều so với cách mà hiện tại đang dùng. Các bộ hấp thụ THz đóng vai trò quan trọng trong việc phát triển các máy dò THz hiệu suất cao [8], trong các thiết bị tàng hình, cảm biến nhiệt [6, 9]. Vật liệu MMA thông thường gồm bộ cộng hưởng sóng điện từ trên một điện môi và dưới cùng là tấm kim loại đóng vai trò như một gương phản xạ hoàn toàn sóng điện từ đã có thể cho phép điều chỉnh tần số hấp thụ, chuyển đổi giữa phản xạ và hấp thụ [10, 11]. Thực tế cho thấy việc nghiên cứu tìm kiếm vật liệu phù hợp nhằm tích hợp vào siêu vật liệu MMA để cho khả năng điều chỉnh linh hoạt tần số, điều chế phân cực, chuyển đổi hấp thụ và phản xạ cần được phát triển và hoàn thiện.

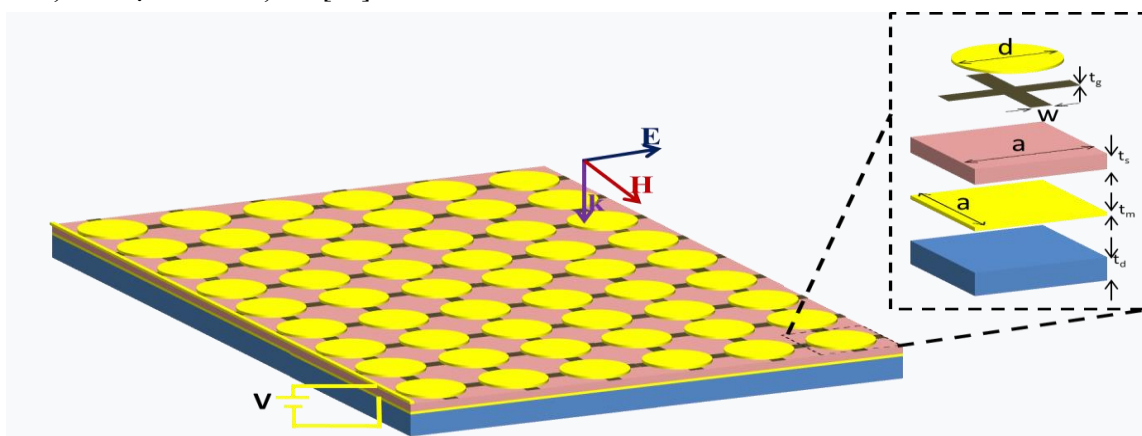
Graphene gần đây nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu do có nhiều tính chất thú vị như khả năng trong suốt quang học, tính linh hoạt và độ linh động của điện tử rất cao [12]. Những tính

chất đặc biệt mà graphene có được chủ yếu xuất phát từ tính đơn lớp của vật liệu. Độ dẫn của một graphene đơn lớp carbon có thể được điều chỉnh linh hoạt trong một dải tần số rộng bằng cách điều khiển mức năng lượng Fermi của điện tử thông qua pha tạp hóa học hoặc điện trường.

Trong nghiên cứu này, dải tần THz thấp (< 2 THz) được tập trung nghiên cứu bằng cách tích hợp graphene với siêu vật liệu MMA. Với thiết kế đơn giản, một cấu trúc MMA không phân cực với sóng điện từ được đề xuất có thể dễ dàng tích hợp graphene để điều khiển tính năng hấp thụ của vật liệu. Khả năng hấp thụ hoàn hảo sóng điện từ ở tần số mong muốn của vật liệu được mô phỏng và tối ưu hóa bằng phương pháp tích phân hữu hạn, đồng thời cơ chế hấp thụ được giải thích bằng mô hình mạch điện tương đương. Kết quả mô phỏng cho thấy khả năng điều khiển linh hoạt tần số hấp thụ trong khoảng từ 1,67 THz đến 1,90 THz bằng điện trường ngoài tương ứng với điện áp đặt vào điện cực. Cấu trúc MMA đơn giản dễ chế tạo này cho thấy tiềm năng ứng dụng trong cảm biến và điều biến THz.

2. THIẾT KẾ CẤU TRÚC VẬT LIỆU

Cấu trúc MMA được đề xuất bao gồm một mảng tuần hoàn các cấu trúc ô cơ sở, như trong hình 1. Cấu trúc MMA gồm bộ cộng hưởng là các đĩa vàng đặt trên một lưới graphene hình chữ thập, kế đến là lớp điện môi SiO_2 và dưới cùng là tấm vàng liên tục đóng vai trò như một gương phản xạ toàn bộ sóng điện từ. Toàn bộ cấu trúc MMA được in trên đế silicon. Chi tiết các lớp của một cấu trúc ô cơ sở được tách riêng và minh họa ở bên phải của hình 1. Các thông số hình học của cấu trúc MMA thu được sau khi tối ưu hóa hiệu suất hấp thụ ở tần số đã chọn. Trong đó, đường kính đĩa vàng d được chọn 50 μm đặt trên một lưới graphene liên tục hình chữ thập với bề rộng của dải graphene w thu được là 5 μm , kích thước ô cơ sở a tối ưu hóa được là 55 μm trong mặt phẳng mẫu vuông góc với hướng của véc tơ sóng điện từ chiếu tới và định hướng theo các phương của véc tơ cường độ điện trường \mathbf{E} và véc tơ cường độ từ trường \mathbf{H} được chỉ ra trong hình 1. Bề dày các lớp của cấu trúc MMA được lựa chọn trong đó đĩa vàng trên cùng và tấm vàng liên tục có cùng độ dày t_m là 100 nm, lớp điện môi SiO_2 và lớp silicon có độ dày lần lượt là 2 μm và 10 μm , lưới graphene có độ dày 0,34 nm tương ứng như một lớp nguyên tử carbon. Kim loại vàng được chọn với độ dẫn $4,561 \times 10^7 \text{ S.m}^{-1}$, điện môi SiO_2 được chọn với hằng số điện môi là 3,9 và độ tổn hao 0,002 [13].



Hình 1. Thiết kế MMA và ô đơn vị của nó, các đĩa tròn màu vàng trên cùng là các đĩa Au, lưới màu đen là graphene, lớp màu hồng là SiO_2 , tiếp đến là lớp Au, lớp màu xanh dưới cuối cùng là đế Si.

Toàn bộ cấu trúc sau đó được nhúng trong một môi trường tham chiếu, được chọn là chân không. Cấu trúc MMA được trình bày trong hình 1, cấu trúc gồm ba lớp kim loại - điện môi - kim loại. Trong thực tế, cấu trúc MMA khi chế tạo sẽ được in trên đế Si thương mại, trong hình 1 là lớp vật liệu màu xanh dương. Tuy nhiên, do lớp kim loại liên tục đóng vai trò như một gương

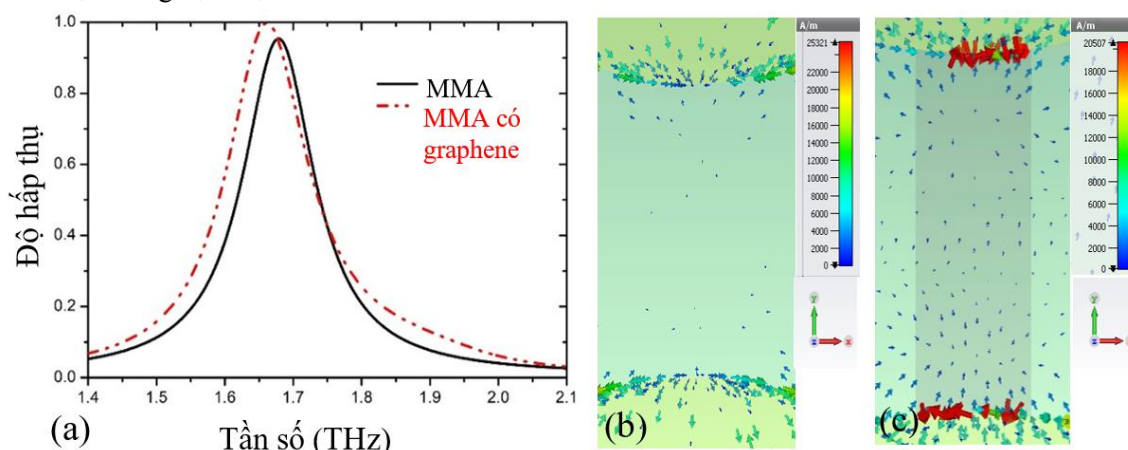
chặn lại toàn bộ sóng điện từ qua vật liệu do vậy để Si không ảnh hưởng đến tính chất điện từ của vật liệu đồng thời độ hấp thụ của MMA sẽ được xác định từ tham số tán xạ theo phương trình:

$$A = 1 - R = 1 - (S_{11})^2 \tag{1}$$

Trong đó, R là độ phản xạ của cấu trúc, S_{11} là tham số tán xạ của cấu trúc.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG TÍNH TOÁN VÀ THẢO LUẬN

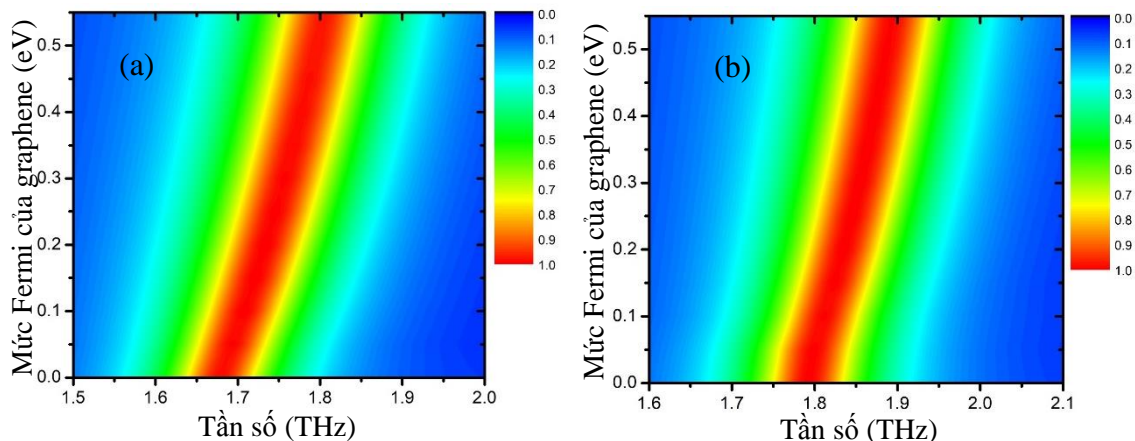
Hình 2a trình bày kết quả mô phỏng phổ hấp thụ của MMA trong hai trường hợp không có graphene và có các dải graphene với năng lượng Fermi là 0 eV. Có thể thấy ở cả hai phổ hấp thụ đều xuất hiện một đỉnh cộng hưởng với độ hấp thụ cao, cụ thể với MMA không có graphene (đường màu đen nét liền) đỉnh hấp thụ tại tần số 1,678 THz với độ hấp thụ 95,4%, với MMA tích hợp các dải graphene (đường màu đỏ nét đứt) đỉnh hấp thụ tại tần số 1,661 THz và độ hấp thụ 99,8%. Khi MMA được tích hợp các dải graphene hình dấu cộng dưới các bộ cộng hưởng kim loại thì tần số cộng hưởng đã dịch về vùng tần số thấp, đồng thời cường độ hấp thụ tại tần số cộng hưởng tăng và gần như đạt tuyệt đối. Kết quả trên được giải thích là do các dải graphene đóng vai trò như cầu nối khiến cho tương tác giữa các bộ cộng hưởng ở các ô cơ sở kế tiếp nhau mạnh hơn. Kết quả mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt tại vùng không gian giữa hai đĩa kim loại ở hai ô cơ sở liền kề dọc theo hướng tác dụng điện trường của sóng tới (dọc theo trục Oy) được trình bày trong hình 2b, hình 2c. Kết quả cho thấy khi MMA được tích hợp dải graphene, dòng điện phân bố tập trung nhiều hơn trong vùng không gian giữa hai đĩa kim loại ở hai ô cơ sở kế tiếp, đồng thời điện tích cũng tập trung nhiều hơn ở hai đầu của hai đĩa kim loại đóng vai trò như một lưỡng cực điện.



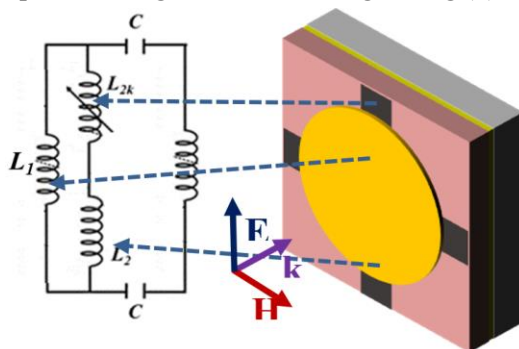
Hình 2. (a) Phổ hấp thụ của MMA trong hai trường hợp có và không có graphene; phân bố điện trường giữa hai đầu của hai đĩa kim loại dọc theo hướng tác dụng điện trường của sóng tới trong hai trường hợp (b) không có graphene và (c) có graphene với năng lượng Fermi bằng 0 eV.

Hình 3 trình bày kết quả mô phỏng các phổ hấp thụ của MMA tích hợp graphene khi năng lượng Fermi của nó thay đổi. Hình 3a là phổ hấp thụ của MMA tích hợp graphene với đĩa cộng hưởng Au có đường kính 50 μm , hình 3b là phổ hấp thụ của MMA tích hợp graphene với đĩa cộng hưởng Au có đường kính 46 μm . Có thể thấy, với các đường kính đĩa Au khác nhau, đỉnh hấp thụ của MMA ở các tần số khác nhau. Khi đường kính đĩa Au giảm thì tần số cộng hưởng của MMA tăng, kết quả này là do cộng hưởng của MMA có bản chất là cộng hưởng từ do tương tác giữa đĩa Au với lớp kim loại liên tục. Trong cả hai trường hợp với các đường kính đĩa Au là 46 μm và 50 μm , kết quả mô phỏng cho thấy khi năng lượng Fermi tăng thì tần số tại đỉnh hấp thụ tăng trong khi đó cường độ hấp thụ gần như không đổi. Cụ thể, với MMA mà đĩa Au có đường kính bằng 50 μm , khi năng lượng Fermi của graphene tăng từ 0 eV đến 0,5 eV thì tần số

tại đỉnh hấp thụ của MMA tương ứng tăng từ 1,67 THz đến 1,81 THz. Với MMA mà đĩa Au có đường kính đĩa bằng 46 μm , khi năng lượng Fermi tăng từ 0 eV đến 0,5 eV thì tần số tại đỉnh hấp thụ của MMA tương ứng tăng từ 1,79 THz đến 1,90 THz.



Hình 3. Độ hấp thụ của MMA tích hợp graphene khi năng lượng Fermi của graphene thay đổi trong hai trường hợp của đường kính đĩa Au cộng hưởng (a) 50 μm và (b) 46 μm .



Hình 4. Mô hình mạch điện tương đương của một ô cơ sở của cấu trúc vật liệu MMA.

Đặc tính hấp thụ của MMA tích hợp graphene có thể được lý giải qua mô hình mạch điện tương đương. Mô hình mạch điện tương đương của một ô cơ sở của cấu trúc MMA tích hợp graphene được mô tả trong hình 4. Các nghiên cứu trước đây đã chứng minh rằng, cấu trúc MMA đĩa tròn cho cộng hưởng với sóng điện từ là cộng hưởng từ [11]. Tụ điện tương đương được tạo bởi đĩa Au trên cùng và lớp Au liên tục, khi đó điện dung C được xác định bằng biểu thức.

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

Trong đó, các tham số cấu trúc t_s, d lần lượt là độ dày của lớp SiO_2 và đường kính của đĩa Au. Các tham số ϵ_0, ϵ_s lần lượt là hằng số điện và độ điện thẩm của SiO_2 , c_1 là hệ số hình học 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 [14]. Trong khi đó, do tích hợp lưới graphene nên hệ số tự cảm của cấu trúc MMA tích hợp graphene khá phức tạp, như được chỉ ra trong hình 4. Độ tự cảm L của cấu trúc gồm hai thành phần: L_1, L_f lần lượt là hệ số tự cảm do đĩa Au và dây lưới graphene tạo ra. Trong đó, L_f lại được tách thành hai thành phần nối tiếp nhau là độ tự cảm L_2 và độ tự cảm động lượng L_{2k} [15]. Các giá trị L_1 và L_2 được xác định phụ thuộc vào tham số hình học và độ từ thẩm của chất điện môi, cụ thể:

$$L_1 = \frac{\mu\pi t_s}{4}, L_2 = \frac{\mu t_s (a-d)}{2w} \quad (3)$$

Giá trị độ tự cảm động lượng của lưới graphene được xác định:

$$L_{2k} = \frac{(a-d).m^*}{wt_g Ne^2} \quad (4)$$

Trong đó, m^* , N , e lần lượt là khối lượng hiệu dụng, mật độ hiệu dụng và điện tích của hạt tải. Từ đó, hệ số tự cảm L được xác định:

$$L = \frac{L_1(L_2 + L_{2k})}{L_1 + L_2 + L_{2k}} \quad (5)$$

Tần số cộng hưởng f xác định được bằng biểu thức: $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Từ biểu thức (2) có thể thấy, khi đường kính d của đĩa kim loại tăng thì điện dung của tụ điện tăng dẫn đến tần số cộng hưởng giảm. Kết quả này phù hợp với kết quả mô phỏng chỉ ra ở Hình 3, rõ ràng với đường kính d của đĩa kim loại bằng 50 μm (phổ hấp thụ ở hình 3a) thì đỉnh hấp thụ có tần số nhỏ hơn tần số của đỉnh hấp thụ của MMA với đường kính d của đĩa kim loại bằng 46 μm (phổ hấp thụ ở hình 3b).

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng graphene như một lớp nguyên tử carbon với độ dày 0,34 nm theo mô hình Drude, hằng số điện môi của graphene như sau [16]:

$$\varepsilon_g = 1 + \frac{i\sigma_g}{\omega\varepsilon_0\Delta} \quad (6)$$

Trong đó: Δ là độ dày của lớp graphene; σ_g là độ dẫn của graphene. Độ dẫn của graphene được tối giản như sau:

$$\sigma_g = \frac{je^2 E_F}{\pi\hbar^2(\omega + j\Gamma)} \quad (7)$$

Trong đó: E_F là mức năng lượng Fermi; ω là tần số góc; e là điện tích của electron; \hbar là hằng số Planck rút gọn và $\Gamma = 0,151.10^{12}$ rad/s ($\sim 0,1$ meV) là tốc độ tán xạ [17]. Khi lớp graphene được đặt dưới một điện thế, mức năng lượng Fermi E_F sẽ thay đổi và độ dẫn của lớp graphene cũng thay đổi theo. Bằng cách điều khiển điện thế đặt vào graphene sẽ thay đổi được độ dẫn và hằng số điện môi của graphene. Mối liên hệ giữa điện thế đặt lên graphene và mức năng lượng Fermi E_F được xác định như sau [18]:

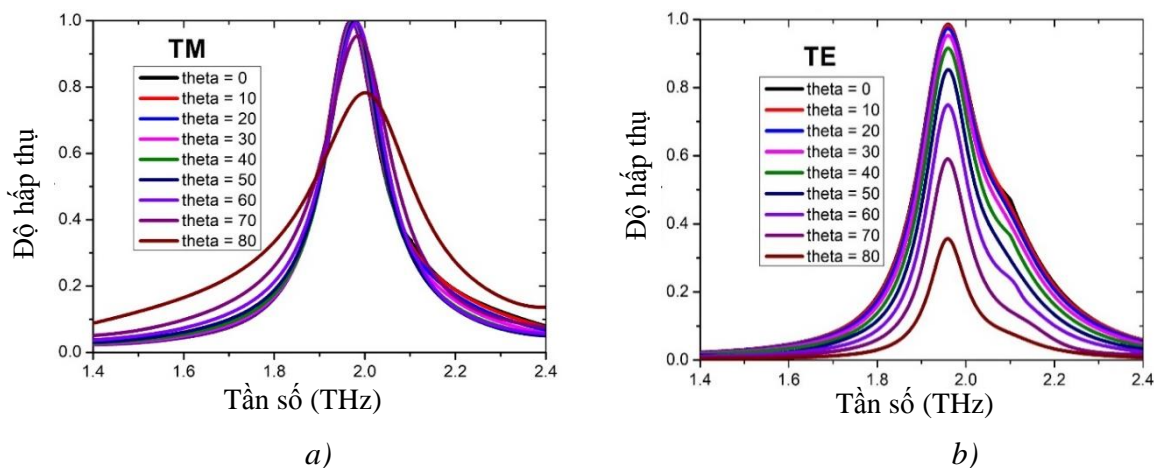
$$\mu_c = \hbar v_F \sqrt{\frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon_s V_g}{et_s}} \quad (8)$$

Trong đó: $v_F \sim 10^6$ m/s là tốc độ Fermi trong graphene; ε_0 là hằng số điện; ε_s là hằng số điện môi của vật liệu điện môi; V_g là điện thế đặt vào graphene và t_s là độ dày lớp điện môi.

Từ biểu thức (4) có thể thấy hệ số tự cảm động lượng của lưới graphene phụ thuộc vào mật độ điện tử tự do. Trong khi đó, mật độ điện tử tự do của lưới graphene có thể điều khiển được thông qua độ dẫn của nó. Khi mức năng lượng Fermi của graphene tăng dần từ 0,0 eV đến 0,5 eV, độ dẫn của graphene tăng, mật độ điện tử tự do tăng. Dựa vào biểu thức (4) có thể thấy khi mật độ điện tử tự do tăng thì hệ số tự cảm động lượng của lưới graphene giảm, do đó hệ số tự cảm tổng cộng giảm và tần số cộng hưởng tăng. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với kết quả mô phỏng đã được chỉ ra ở hình 3. Như vậy, bằng cách điều khiển điện thế V_g đặt vào lưới graphene và lớp

kim loại liên tục như trong hình 1 có thể điều khiển độ dẫn của graphene và do đó điều khiển được tần số hấp thụ của MMA tích hợp graphene.

Cấu trúc MMA được thiết kế có tính đối xứng cao theo phương Oz, do đó tính chất hấp thụ của nó vẫn giữ ổn định khi góc tới của sóng điện từ thay đổi. Kết quả mô phỏng phổ hấp thụ của MMA tích hợp graphene khi góc tới của sóng điện từ thay đổi được trình bày trong hình 5 cho thấy tính chất hấp thụ của MMA tích hợp graphene vẫn giữ ổn định khi góc tới tăng cao. Cụ thể trong trường hợp phân cực từ tính chất hấp thụ vẫn giữ ổn định khi góc tới tăng đến 70° , trong trường hợp phân cực điện tính chất hấp thụ của MMA vẫn giữ ổn định khi góc tới tăng đến 50° . Trong trường hợp phân cực điện khi góc tới tăng, tần số tại đỉnh hấp thụ vẫn không đổi tuy nhiên cường độ hấp thụ tại đỉnh hấp thụ giảm dần nhưng vẫn đạt được trên 80% khi góc tới là 50° .



Hình 5. Độ hấp thụ của MMA tích hợp graphene với các góc khác nhau của sóng tới:
a) Phân cực từ TM; b) Phân cực điện TE.

4. KẾT LUẬN

Bằng mô phỏng kết hợp với mô hình mạch điện tương đương, chúng tôi đã chứng minh được rằng cấu trúc MMA với bộ cộng hưởng là các đĩa kim loại tích hợp với lưới graphene hình dấu cộng có thể cho khả năng hấp thụ gần như tuyệt đối trong vùng tần số THz. Tần số tại đỉnh hấp thụ có thể được điều khiển thông qua tham số cấu trúc là đường kính đĩa kim loại. Bên cạnh đó tần số tại đỉnh hấp thụ cũng có thể được điều khiển thông qua hiệu điện thế đặt vào lưới graphene và lớp kim loại liên tục. Khi hiệu điện thế này thay đổi dẫn đến năng lượng Fermi của graphene thay đổi. Khi năng lượng Fermi của graphene tăng dần thì tần số tại đỉnh hấp thụ của MMA tích hợp graphene tăng dần trong khi cường độ hấp thụ không thay đổi. Với cấu trúc MMA đơn giản chúng tôi hoàn toàn có thể lựa chọn vùng tần số THz mà MMA cộng hưởng để điều khiển nó. Cấu trúc được thiết kế để có thể chế tạo được bằng phương pháp quang khắc trong các nghiên cứu tiếp theo.

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 NCXS02.01/23-24.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. 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, p. 207402, (2008).
- [2]. W. Zhu, Y. Huang, I. D. Rukhlenko, G. Wen, and M. Premaratne, "Configurable metamaterial absorber with pseudo wideband spectrum," *Opt. Express*, vol. 20, no. 6, p. 6616, (2012).
- [3]. L. Gevorgyan et al., "Tunable ultra-broadband terahertz metamaterial absorber based on vanadium dioxide strips" *RCS Adv*, vol. 13, pp. 11984–11958, (2023).

- [4]. L. N. Le, N. M. Thang, L. M. Thuy, and N. T. Tung, "Hybrid semiconductor–dielectric metamaterial modulation for switchable bi-directional THz absorbers," *Optics Communications*, vol. 383, pp. 244–249, (2017).
- [5]. Y. Xie *et al.*, "A multifrequency narrow-band perfect absorber based on graphene metamaterial," *Diamond and Related Materials*, vol. 137, pp. 110100, (2023).
- [6]. 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, no. 4, p. 045901, (2011).
- [7]. Z. Zhou *et al.*, "Ultra-Wideband Microwave Absorption by Design and Optimization of Metasurface Salisbury Screen," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 26843–26853, (2018).
- [8]. L. Cong, S. Tan, R. Yahiaoui, F. Yan, W. Zhang, and R. Singh, "Experimental demonstration of ultrasensitive sensing with terahertz metamaterial absorbers: A comparison with the metasurfaces," *Applied Physics Letters*, vol. 106, no. 3, p. 031107, (2015).
- [9]. H. Zhou *et al.*, "Terahertz biosensing based on bi-layer metamaterial absorbers toward ultra-high sensitivity and simple fabrication," *Applied Physics Letters*, vol. 115, no. 14, p. 143507, (2019).
- [10]. T. V. Do *et al.*, "Design, fabrication and characterization of a perfect absorber using simple cut-wire metamaterials," *Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 3, no. 4, p. 045014, (2012).
- [11]. N. T. Tung and T. Tanaka, "Characterizations of an infrared polarization-insensitive metamaterial perfect absorber and its potential in sensing applications," *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, vol. 28, pp. 100–105, (2018).
- [12]. V. Chabot, D. Higgins, A. Yu, X. Xiao, Z. Chen, and J. Zhang, "A review of graphene and graphene oxide sponge: material synthesis and applications to energy and the environment," *Energy Environ. Sci.*, vol. 7, no. 5, p. 1564, (2014).
- [13]. P. R. Gray, P. J. Hurst, S. H. Lewis, and R. G. Meyer, "Analysis and Design of Analog Integrated Circuits", Fifth. Wiley, (2009).
- [14]. J. Zhou, E. N. Economou, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Unifying approach to left-handed material design," *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 24, p. 3620, (2006).
- [15]. N. T. Hien *et al.*, "Characterizations of a thermo-tunable broadband fishnet metamaterial at THz frequencies," *Computational Materials Science*, vol. 103, pp. 189–193, (2015).
- [16]. Z. Zhihong *et al.*, "Broadband single-layered graphene absorber using periodic arrays of graphene ribbons with gradient width," *Appl. Phys. Express*, vol. 8, no. 1, p. 015102, (2015).
- [17]. Y. Zhang *et al.*, "Graphene based tunable metamaterial absorber and polarization modulation in terahertz frequency," *Opt. Express*, vol. 22, no. 19, p. 22743, (2014).
- [18]. J. S. Gómez-Díaz and J. Perruisseau-Carrier, "Graphene-based plasmonic switches at near infrared frequencies," *Opt. Express*, vol. 21, no. 13, p. 15490, (2013).

ABSTRACT

Investigating the resonance frequency shift in graphene-integrated metamaterial absorber

With great application potential in fields such as high-performance thermal radiation, high-sensitivity biochemical sensors, molecular sensing techniques, and the energy field, THz metamaterial absorbers have attracted much research attention. In particular, research aimed at creating controllable absorbing metamaterials that can change their absorption properties after fabrication through external effects is vital. In this study, we propose a design for a metamaterial absorber that can change its absorption frequency by integrating a graphene mesh. An external electric field can control the resonance frequency of the structure through the Fermi energy of graphene. The MMA structure is simply designed consisting of gold disks placed on a graphene mesh. Simulation results show that the absorption frequency is controlled from 1.67 THz to 1.9 THz corresponding to a change in the Fermi energy of graphene from 0.0 eV to 0.5 eV.

Keywords: THz; Metamaterials; Absorb electromagnetic wave; Tunable.