

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO MẠCH HẤP PHỤ SÓNG ĐIỆN TỪ TRÊN CƠ SỞ MỰC IN DẪN ĐIỆN GRAPHENE TRÊN NỀN GIẤY

Đến tòa soạn: 21-05-2025

Nguyễn Thị Hồng Phượng^{1*}, Trần Văn Khanh², Huỳnh Thu Sương¹, Lê Minh Thùy³, Lã Đức Dương²

¹Trường Hóa và Khoa học Sự sống, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Viện Hóa học – Vật liệu, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự

³Trường Điện và Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

*E-mail:phuong.nguyenthong@hust.edu.vn

SUMMARY

RESEARCH AND FABRICATION OF AN ELECTROMAGNETIC WAVE ABSORPTION CIRCUIT BASED ON GRAPHENE CONDUCTIVE INK ON PAPER SUBSTRATE

In this study, we proposed a graphene-based metamaterial absorber printed on a paper substrate. The absorber, fabricated on Kodak paper using a two-axis CNC machine with graphene ink, maintains an absorption rate above 90% across a wide bandwidth of 2 GHz, from approximately 5.3 GHz to 7.3 GHz, even under bending conditions. Notably, the graphene-based metamaterial absorber (GMA) still maintains an absorption rate greater than 70% within the frequency range of 5.67 GHz to 5.78 GHz at an incident angle of 80°. The absorber's flexibility was clearly demonstrated under various bending radii while maintaining high absorption performance, making it suitable for flexible metamaterial absorption applications.

Keywords: graphene conductive ink, electromagnetic wave absorption, graphene-based absorber, paper substrate

1. MỞ ĐẦU

Siêu vật liệu hấp phụ (Metamaterial absorbers - MAs) thường được sử dụng để làm cho một vật thể trở nên vô hình trong các ứng dụng radar hoặc quân sự. Các MAs truyền thống sử dụng các chất nền cứng như FR4 [1, 2], Roger [3] và Duroid [4]. Những vật liệu này mang lại khả năng hấp thụ cao cho MAs nhưng lại có độ linh hoạt hạn chế do khó uốn cong theo các bề mặt. Hơn nữa, các vật liệu này không thân thiện với môi trường vì khó phân hủy, điều này có thể hạn chế ứng dụng của chúng trong tương lai. Giấy làm chất nền đã nổi lên như một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn cho các ứng dụng MA linh hoạt nhờ khả năng phủ lên các bề mặt cong hoặc lõm và tính phân hủy sinh học của nó. Ví dụ, các MA làm từ giấy là giải

pháp lý tưởng để cách ly sóng điện từ trong các phòng như phòng thẩm vấn. Bằng cách phủ giấy MA lên cửa sổ hoặc tường, nó không chỉ đóng vai trò trang trí mà còn đảm bảo an toàn thông tin, khiến người ngoài khó phát hiện. Các nghiên cứu trước đây về MAs sử dụng chất nền giấy đã sử dụng mực bạc [5-7], cho thấy khả năng hấp thụ gần như hoàn hảo ở các góc phân cực trực diện trong một dải tần rộng. Tuy nhiên, khả năng hấp thụ giảm đáng kể khi góc tới vượt quá 60°. Độ dẫn điện cao của mực bạc không có lợi cho các ứng dụng hấp thụ sóng do điện trở tổn hao ohmic thấp. Thêm vào đó, mực nano bạc rất đắt và yêu cầu các quy trình nung tốn kém như laser, đèn nháy tia cực tím, và nung vi sóng [8]. Gần đây, graphene đã được giới thiệu như một lựa chọn thay thế chi phí thấp với điện trở tấm cao hơn mực

nano bạc và có thể điều chỉnh được [9, 10]. Điện trở tấm cao của graphene khiến nó phù hợp cho các ứng dụng hấp thụ vì giúp tiêu tán năng lượng sóng tới dưới dạng tổn hao ohmic. Tuy nhiên, graphene chủ yếu được sử dụng cho các MAs có khả năng điều chỉnh trong dải tần THz [11, 12].

Dựa trên ý tưởng đó, nghiên cứu này đề xuất siêu vật liệu sử dụng graphene (GMA) hấp thụ hoạt động trong dải tần 5,7–5,8 GHz cho các ứng dụng không dây chuẩn 5G, được in trên chất nền giấy bằng công nghệ in phun mực điều khiển số (CNC). Cấu trúc hình chữ thập, kết hợp với hệ số tổn hao cao của giấy Kodak và điện trở tấm cao của mực graphene, cho phép GMA duy trì khả năng hấp thụ cao trên 70% ở góc tới lên đến 80°. Mô phỏng cho thấy khả năng hấp thụ gần như hoàn hảo vẫn được giữ nguyên ngay cả khi bộ hấp thụ linh hoạt bị uốn cong theo các bán kính khác nhau.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Nguyên vật liệu

Các tấm nano graphene được mua từ Công ty Cổ phần VNgraphene. Acid oleic, ethanol, cellulose acetate butyrate (CAB), và ethyl acetate (EA) được cung cấp bởi hãng Sigma Aldrich. Giấy ảnh được lấy từ công ty Kodak tại Việt Nam. Tất cả các hóa chất và vật liệu đều được sử dụng nguyên trạng, không qua bất kỳ quá trình tinh chế bổ sung nào.

2.2. Chế tạo mực dẫn điện trên cơ sở graphene

a. Biện tính nano graphene

Để tạo ra bột graphene ta xuất phát từ dung dịch graphene phân tán cho biến tính với acid oleic bằng cách cho dung dịch graphene vào máy high shear mixer khuấy cắt ở tốc độ 5000 vòng/phút đồng thời gia nhiệt bằng phương pháp cách

thủy. Khi dung dịch phân tán graphene đạt nhiệt độ trong khoảng từ 70 đến 80°C thì dùng cấp nhiệt, cho acid oleic với hàm lượng 2,5% vào và tiếp tục khuấy cắt trong 1 tiếng. Lúc này các phân tử acid oleic sẽ bám dính lên bề mặt graphene đồng thời việc khuấy cắt sẽ giúp giảm kích cỡ hạt graphene. Sau khi biến tính, dung dịch được đưa vào tủ sấy ở nhiệt độ 140°C và sấy đến khi nước bay hơi hoàn toàn và ta thu được bột graphene.

b. Chế tạo mực in dẫn điện

Thêm 93,25 g dung môi ethylacetate và 0,75 chất kết dính CAB vào máy khuấy cắt tốc độ cao và khuấy ở tốc độ 4000-5000 rpm cho đến khi chất kết dính hòa tan hoàn toàn. Sau đó, thêm 6 g nano graphene đã được biến tính vào dung dịch và tiếp tục khuấy với cùng tốc độ trong 20 phút. Sau khi trộn, đảm bảo không có các hạt lớn ở đáy cốc và nano graphene đã được phân tán hoàn toàn. Dùng que thủy tinh để lấy mẫu mực và vẽ lên giấy; nếu mực có vẻ mịn màng và tinh tế, thì mực dẫn điện dựa trên vật liệu nano graphene đã được chế tạo thành công.

2.3. Phương pháp đo điện trở suất 4 mũi dò

Bốn mũi dò là thiết bị dùng để đo điện trở suất của vật liệu, bằng cách cho 4 mũi dò tiếp xúc với bề mặt vật liệu trên 1 đường thẳng.

Công thức tính điện trở suất khi đó sẽ là:

$$\rho = 2\pi \cdot l \frac{U}{I}$$

Trong đó:

l là khoảng cách giữa hai mũi dò,

U là hiệu điện thế giữa hai mũi dò trong,

I là dòng đi qua mẫu từ hai mũi dò ngoài.

2.4. Mô phỏng điện từ cấu trúc hấp thụ

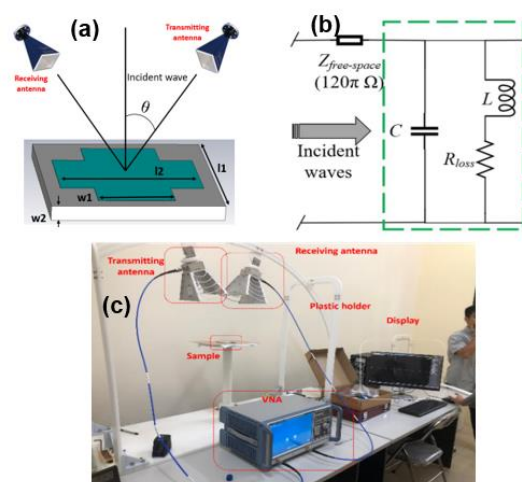
GMA

Mục tiêu của việc mô phỏng là nhằm xác định tần số cộng hưởng tối ưu của cấu trúc hấp thụ, đánh giá hiệu suất hấp thụ sóng điện từ trong dải tần mục tiêu, và kiểm tra khả năng duy trì hiệu suất hấp thụ dưới các góc tới khác nhau cũng như trong điều kiện uốn cong. Đồng thời, mô phỏng còn giúp xác minh cơ chế cộng hưởng điện của cấu trúc và tác động của các thông số hình học đến hiệu suất hấp thụ, từ đó hỗ trợ quá trình thiết kế tối ưu trước khi chế tạo thực nghiệm.

GMA được thiết kế nhằm hấp thụ hiệu quả sóng điện từ trong dải tần 5,8 GHz, tương thích với các ứng dụng không dây chuẩn 5G, là một dãy lặp lại của các cell đơn hình chữ thập giống hệt nhau như được minh họa trong Hình 1(a). Cell đơn gồm ba lớp: Lớp dưới cùng là một lớp mỏng làm từ tấm nhôm, đóng vai trò làm lớp nền. Lớp giữa là giấy ảnh Kodak ($\epsilon_r = 2,85$, $\tan\delta = 0,05$), làm chất nền linh hoạt với độ dày là w_2 và chiều dài l_1 . Lớp trên cùng được tạo thành từ mực graphene với cấu trúc hình chữ thập có kích thước w_1 và l_2 . Mô phỏng được thực hiện trong phần mềm CST Studio Suite 2021, sử dụng mô phỏng toàn sóng miền tần số (3D full-wave frequency domain solver) với điều kiện biên tuần hoàn theo hai trục x, y, và mặt sóng tới theo trục z. Bài báo nghiên cứu tham số với sự thay đổi góc tới từ 0° đến 80° để kiểm tra khả năng chống chịu của bộ hấp thụ đề xuất đối với bức xạ điện từ. Bộ hấp thụ đề xuất có thể hoạt động trong một dải góc tới rộng, như thể hiện trong Hình 1c, nơi mà mức độ hấp thụ cao trên 85% được duy trì đối với bức xạ điện từ với các góc tới từ 0° đến 60° .

Mô phỏng khảo sát hệ số phản xạ (S_{11}) để xác định độ hấp thụ $A = 1 - |S_{11}|^2$, với giả thiết lớp nền kim loại ngăn truyền ($S_{21} \approx 0$). Góc tới được thay đổi từ 0° đến 80° để đánh giá độ ổn định góc của thiết kế.

Nguyên lý hoạt động của GMA có thể được giải thích bằng mạch RLC tương đương và đã được giải thích chi tiết trong [4], như thể hiện trong Hình 1(b). Lưu ý rằng mực graphene có điện trở tổn hao R_{loss} cao hơn, điều này có hại cho các mạch vi sóng khác nhưng lại hữu ích cho các ứng dụng bộ hấp thụ vi sóng. Các giá trị LC có thể được điều chỉnh bằng cách thay đổi w_1 và l_2 . Tần số cộng hưởng được kiểm soát bởi L và C của bộ cộng hưởng điện trên lớp graphene. Khi l_2 giảm, C cũng giảm, dẫn đến tần số cộng hưởng tăng lên. Trong bài báo này, các tham số kích thước là $w_1=9,5$ mm, $w_2=1,3$ mm, $l_1=18$ mm, $l_2=14$ mm để hoạt động ở tần số 5,8 GHz.



Hình 1. Cell đơn bộ hấp thụ siêu vật liệu

(a) Mô hình 3D, (b) Mạch tương đương, và (c) hệ thiết bị đo.

2.5 Chế tạo siêu vật liệu hấp phụ dựa trên graphene

Phần mềm Axidraw và máy CNC 2 trục được sử dụng trong quá trình chế tạo GMA. Mã lệnh sẽ được tải vào máy CNC sau khi hình dạng ô đơn vị đã được vẽ trên máy tính bằng phần mềm. Máy CNC sẽ in mực graphene lên giấy ảnh theo hình ảnh đã vẽ. Độ phân giải của đường in sẽ được điều chỉnh sao cho phù hợp với kích thước của dòng mực graphene. Mực

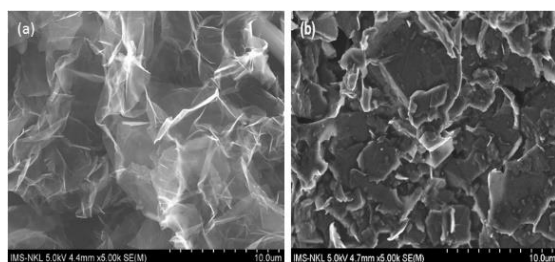
graphene có độ dẫn điện thấp ngay sau khi in do tạp chất; do đó, cần phải có quy trình thiêu kết để đốt cháy dung môi và tạp chất. Ngoài việc tăng cường liên kết giữa mực graphene và chất nền, quá trình thiêu kết còn làm nóng chảy mực để tạo ra lớp dẫn điện. Để loại bỏ tạp chất, thiết kế yêu cầu được nung ở 120°C trong một giờ.

2.6 Cài đặt đo lường

Nguyên mẫu đã chế tạo được đo bằng phép đo mặt cắt radar lưỡng tĩnh (RCS) để xác nhận hiệu suất hấp thụ của GMA, như được thể hiện trong Hình 1c. Hai ăng-ten hình phễu được đặt trên giá đỡ cao bằng nhựa, cách GMA 0,5 m và được dựng xung quanh nó để đáp ứng yêu cầu trường xa cho phép đo. Sử dụng Máy phân tích mạng (Vector Network Analyzer) để đo tín hiệu phản xạ từ mẫu. Để đo độ hấp thụ ở các góc tới khác nhau θ° , ăng ten phát được quay θ° và ăng ten thu được đặt đối xứng với ăng ten phát qua mặt phẳng tới chứa mẫu vật liệu hấp thụ.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

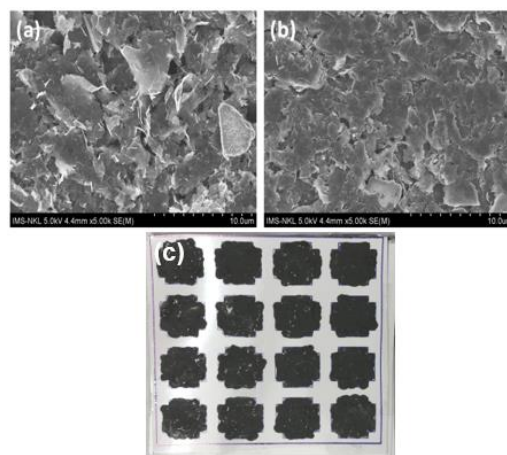
Hình thái của các lớp nano graphene (GNPs) và GNPs biến tính bởi acid oleic được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM), được thể hiện ở Hình 2 dưới đây. Có thể thấy rằng các tấm nano graphene (GNPs) có hình thái cấu trúc nếp nhăn và cuộn (Hình 2a). Sau khi biến tính bằng acid oleic, các GNPs có xu hướng tăng sự xếp chồng lên nhau của các lớp (Hình 2b).



Hình 2. Hình ảnh (SEM) của mẫu nano graphene (a) và nano graphene biến tính với acid oleic (b)

Hình thái học của mực dẫn điện dựa trên GNPs được biến tính bằng acid oleic trên chất nền giấy đã được kiểm tra bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM), như thể hiện trong Hình 3. Hình 3a trình bày hình ảnh SEM của mực graphene in trên chất nền giấy trước khi ép, hình 3b trình bày hình ảnh SEM của mực graphene sau khi ép bằng máy hai con lăn. Các lớp vảy của GNP trong công thức mực có thể được quan sát rõ ràng. Bề mặt của mực sau khi quét lên chất nền có vẻ khá thô ráp; tuy nhiên, sau khi ép, bề mặt trở nên tương đối mịn màng. Việc làm mịn này giúp tăng cường đáng kể tính dẫn điện của mực nhờ vào sự gia tăng tiếp xúc giữa các tấm graphene dưới tác dụng của lực ép.

Kết quả đo độ dẫn điện của mực sau khi ép được cải thiện đáng kể so với trạng thái chưa ép. Cụ thể, điện trở của mực dẫn điện trên cơ sở GNP biến tính bằng acid oleic được đo vào khoảng 74 Ω trước khi ép. Sau khi ép bằng máy hai con lăn, điện trở giảm đáng kể, chỉ còn khoảng 22 Ω . Do đó, kỹ thuật ép được áp dụng hiệu quả để cải thiện độ dẫn điện của mực nền GNP trong các ứng dụng thực tiễn.



Hình 3. Hình ảnh SEM của mực dẫn điện graphene in trên giấy trước (a), sau (b) khi ép, và (c) hình ảnh của bộ hấp phụ sóng điện từ trên giấy

Điện trở suất tấm của mực dẫn điện trên cơ sở GNP biến tính bằng acid oleic được xác định bằng phương pháp đo điện trở

bốn điểm trên màng mỏng. Mực dẫn điện dựa trên GNP được in lên nền có kích thước 2×2 cm, làm khô ở nhiệt độ phòng và sau đó ép bằng máy hai con lăn. Giá trị điện trở suất trung bình đo được là $7,56 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$, cho thấy mực dẫn điện trên cơ sở GNP đã được biến tính thể hiện khả năng dẫn điện đáng kể, phù hợp cho các ứng dụng điện tử và cảm biến.

Điện trở tấm của mực graphene sử dụng là $74 \Omega/\text{sq}$ [13]. Hằng số điện môi và hệ số tổn hao của chất nền giấy dày 0,254 mm được báo cáo trong [14] lần lượt là 2,85 và 0,05. Năm tờ giấy Kodak được dán chồng lên nhau để tạo thành chất nền với tổng độ dày là 1,3 mm. Một cấu trúc GMA gồm 4×4 ô đơn vị đã được chế tạo với kích thước $72 \times 72 \text{ mm}^2$, như trình bày trong hình 3c.

Độ hấp thụ của vật liệu dựa trên graphene được tính từ hệ số truyền và phản xạ theo công thức:

$$A = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (1)$$

Trong đó A là độ hấp thụ, $R(\omega) = |S_{11}|^2$ và $T(\omega) = |S_{21}|^2$ lần lượt là độ phản xạ và độ truyền qua với S_{11} , S_{12} là hệ số phản xạ và hệ số truyền qua tương ứng. Do lớp dưới cùng của GMA là tấm kim loại nhôm nên hệ số truyền qua bằng không nên độ hấp thụ sẽ được tính theo công thức:

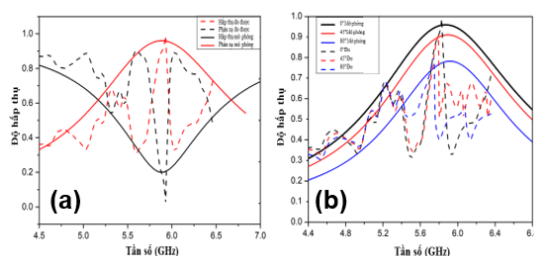
$$A = 1 - R(\omega) \quad (2)$$

Thí nghiệm đo phản xạ và hấp thụ tại góc tới vuông góc được so sánh với kết quả mô phỏng như thể hiện trong Hình 4a. Kết quả hấp thụ đo được có sự sai lệch so với mô phỏng. Trong mô phỏng, độ hấp thụ vượt quá 80% trong dải tần từ 5,5 GHz đến 6,3 GHz, trong khi kết quả đo thực nghiệm cho thấy dải tần này nằm trong khoảng từ 5,8 GHz đến 5,95 GHz. Sự sai khác nhỏ về tần số và biên độ giữa hai kết quả có thể được giải thích bởi một số yếu tố:

- Trong mô phỏng, điều kiện lý tưởng hóa (vật liệu đồng nhất, kích thước lặp vô hạn) được sử dụng, trong khi mẫu thực tế chỉ có 4×4 ô đơn vị.

- Độ chính xác của quy trình in (CNC), quá trình ép, và mức độ phân tán của mực graphene có thể ảnh hưởng đến điện trở tấm thực tế và hình học vi mô, từ đó làm lệch tần số cộng hưởng nhẹ.

- Chất nền giấy thật có thể hút ẩm hoặc thay đổi đặc tính điện môi nhẹ so với giả định trong mô phỏng.



Hình 4. (a) Kết quả mô phỏng và đo lường tại góc tới 0° và (b) Kết quả mô phỏng và đo lường tại các góc tới khác nhau.

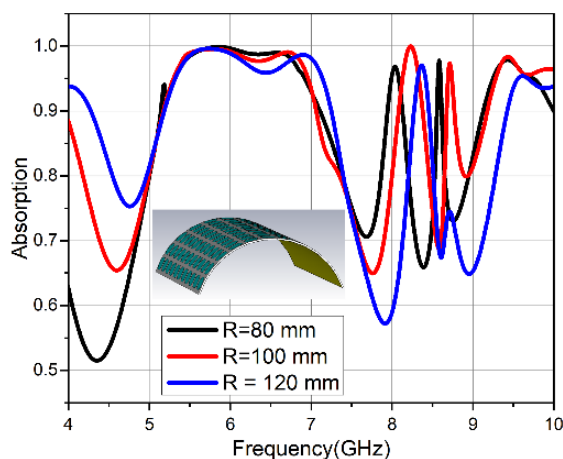
Hình 4b thể hiện ảnh hưởng của góc tới đến hiệu suất hấp thụ. Cấu trúc vẫn duy trì độ hấp thụ cao trên 70% ngay cả khi góc tới tăng lên tới 80° , chứng tỏ tính ổn định góc tới của GMA. Điều này là do:

- Mẫu in bằng mực graphene tạo ra cộng hưởng điện đa chiều, ít bị ảnh hưởng bởi hướng phân cực và góc tới.

- Sự kết hợp giữa cấu trúc cộng hưởng và điện trở tấm cao của lớp graphene giúp tiêu tán năng lượng sóng tới hiệu quả trong nhiều điều kiện chiếu xạ.

Ở góc tới 45° , độ hấp thụ giảm xuống còn 81%. Khi góc tới tăng lên 80° , độ hấp thụ tiếp tục giảm xuống 70% trong dải tần từ 5,67 GHz đến 5,78 GHz. Sự chênh lệch giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm xuất phát từ việc mô phỏng giả định một số lượng phần tử cấu trúc là vô hạn, trong khi mẫu chế tạo thực tế chỉ có số lượng hữu hạn. Bên cạnh đó, các sai số trong

chế tạo và điều kiện đo lường cũng có thể gây ra sự khác biệt trong kết quả.



Hình 5. Độ hấp thụ trong điều kiện uốn cong

Để quan sát độ hấp thụ đối với các điều kiện uốn khác nhau, GMA được phủ trên bề mặt cong polyetylen terephthalate (PET) với bán kính lần lượt là 80, 100 và 120 mm. Như có thể thấy trong Hình 5, ngay cả khi bị uốn cong, GMA vẫn duy trì mức hấp thụ hơn 90% trên băng thông 2 GHz từ khoảng 5,3 GHz đến 7,3 GHz. Điều này chứng tỏ tính khả thi của việc sử dụng các vật liệu rẻ tiền và linh hoạt như giấy với graphene để mang lại kết quả tương tự như các chất nền đắt tiền khác.

- Cấu trúc hấp thụ dựa trên cộng hưởng điện tại từng ô đơn vị (local resonance), nên không phụ thuộc quá nhiều vào mặt phẳng phẳng.

- Việc sử dụng nền giấy linh hoạt và mực GNPs có độ bám dính cao giúp cấu trúc không bị rạn nứt hay suy giảm tính dẫn khi uốn cong.

- Ngoài ra, các cộng hưởng không bị phá vỡ khi cong do mỗi ô đơn vị hoạt động độc lập, nhờ đó giữ được hiệu suất hấp thụ tốt.

4. KẾT LUẬN

Trong công trình này, chúng tôi đã đề xuất siêu vật liệu hấp thụ dựa trên graphene in trên chất nền giấy. Bộ hấp

thụ, được chế tạo trên giấy Kodak bằng máy CNC 2 trục với mực graphene, duy trì độ hấp thụ trên 90% trong băng tần 2 GHz, từ khoảng 5,3 GHz đến 7,3 GHz, ngay cả khi bị uốn cong. Đặc biệt, GMA duy trì độ hấp thụ trên 70% trong dải tần từ 5,67 GHz đến 5,78 GHz tại góc tới 80°. Tính linh hoạt của bộ hấp thụ đề xuất cũng được minh họa dưới các bán kính uốn cong khác nhau, duy trì độ hấp thụ cao, điều này khiến nó trở thành một lựa chọn phù hợp cho các ứng dụng siêu vật liệu hấp thụ linh hoạt.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2024.BKA.16.

Cam kết: Tôi xin cam đoan đây là công trình của tập thể nghiên cứu và chưa gửi đăng nội dung này ở bất kỳ tạp chí nào.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Z. Wu, J. Zhao, K. Chen, and Y. Feng (2022). An Active Metamaterial Absorber With Ultrawideband Continuous Tunability. *IEEE Access*, **10**, 25290–25295.
- [2] H. Singh, A. Gupta, R. S. Kaler, S. Singh, and A. S. Gill (2022). Designing and Analysis of Ultrathin Metamaterial Absorber for W Band Biomedical Sensing Application”. *IEEE Sens. J.*, **22(11)**, 10524–10531.
- [3] N. Bai, C. Feng, Y. Liu, H. Fan, C. Shen, and X. Sun (2017). Integrated Microstrip Meander Line Traveling Wave Tube Based on Metamaterial Absorber. *IEEE Trans. Electron Devices*, **64(7)**, 2949–2954.
- [4] M. Dinh, N. Ha-Van, N. T. Tung, and M. Thuy Le (2021). Dual-Polarized Wide-Angle Energy Harvester for Self-Powered IoT Devices. *IEEE Access*, **9**, 103376–103384.
- [5] M. M. Tirkey and N. Gupta (2021). Broadband Polarization-Insensitive Inkjet-Printed Conformal Metamaterial

- Absorber. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **63(6)**, 1829–1836.
- [6] M. Yoo, H. K. Kim, S. Kim, M. Tentzeris, and S. Lim (2015). Silver Nanoparticle-Based Inkjet-Printed Metamaterial Absorber on Flexible Paper. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, **14**, 1718–1721.
- [7] M. M. Tirkey and N. Gupta (2018). A Paper Based Perfect Electromagnetic Wave Absorber Using Conducting Grid Pattern. *15th International Conference on ElectroMagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC)*, 1–4.
- [8] L. Mo et al., (2019). Silver Nanoparticles Based Ink with Moderate Sintering in Flexible and Printed Electronics. *Int. J. Mol. Sci.*, **20(9)**, 2124.
- [9] S. Zakir et al., (2023). Polarization-Insensitive, Broadband, and Tunable Terahertz Absorber Using Slotted-Square Graphene Meta-Rings, *IEEE Photonics J.*, **15(1)**, 1–8.
- [10] S. K. Gupta and P. K. Basu (2022). Tunability in Graphene Based Metamaterial Absorber Structures in Mid-Infrared Region. *IEEE Photonics J.*, **14(3)**, 1–5.
- [11] M. A. Jabbar, M. A. Naveed, M. Zubair, M. Q. Mehmood, and Y. Massoud (2023). Wideband Polarization Insensitive Tunable Graphene-Supported Terahertz Metamaterial Absorber. *IEEE Photonics J.*, **15(6)**, 1–8.
- [12] H. Yu, P. Xiang, Y. Zhu, S. Huang, and X. Luo (2022). Polarization Insensitive Broadband Concentric- Annular-Strip Octagonal Terahertz Graphene Metamaterial Absorber. *IEEE Photonics J.* **14(1)**, 1–6.
- [13] L. V. Long et al., (2021). Flexible Broadband Metamaterial Perfect Absorber Based on Graphene-Conductive Inks. *Photonics*, **8(10)**.
- [14] M. U. Memon, M. M. Tentzeris, and S. Lim (2017). Inkjet-printed 3D Hilbert-curve fractal antennas for VHF band. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, **59(7)**, 1698–1704.
- [15] S. Chejarla, S. r. Thummaluru, and R. k. Chaudhary (2019). Flexible metamaterial absorber with wide incident angle insensitivity for conformal applications. *Electron*, **55(3)**, 133–134.
- [16] X. Kong, J. Xu, J. Mo, and S. Liu (2017). Broadband and conformal metamaterial absorber, *Front. Optoelectron.*, **10(2)**, 2.