

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Mẫn Hoài Nam

**NGHIÊN CỨU TÍCH HỢP VẬT LIỆU PLASMONIC HAI CHIỀU
GRAPHENE VÀ MoS_2 TRÊN CẤU TRÚC VẬT LIỆU BIẾN HÓA
HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỬ Ở VÙNG TẦN SỐ GHz VÀ THz**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Vật liệu điện tử

Mã số: 9 44 01 23

Hà Nội – 2025

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Người hướng dẫn khoa học:

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. Bùi Xuân Khuyển

Người hướng dẫn khoa học 2: GS. TS. Vũ Đình Lâm

Phản biện 1: PGS. TS. Nguyễn Thị Hiền

Phản biện 2: PGS. TS. Đỗ Thị Hương Giang

Phản biện 3: PGS. TS. Nguyễn Thị Hòa

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi 9 giờ 00, ngày 21 tháng 01 năm 2025

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Cho đến nay, hướng nghiên cứu về vật liệu biến hóa (metamaterials – MM) có cấu trúc nhân tạo ở kích thước vật lý nhỏ hơn bước sóng hoạt động nhiều lần là lĩnh vực được coi trọng phát triển mạnh về lý thuyết và thực tiễn [1- 3]. Trong quá trình phát triển của MM, đã có rất nhiều những khó khăn, thách thức cản trở việc ứng dụng chúng vào thực tế, chẳng hạn như mở rộng/điều khiển chủ động dải tần số, hiện thực hóa cấu trúc ba chiều, tích hợp với thiết bị điện tử hiện hành hoặc thu nhỏ cấu trúc ở kích thước micro-nano mét [13-23]. Chúng ta đã chứng kiến rất nhiều những cải tiến lớn trong đó phải kể đến ý tưởng về sự kết hợp giữa: MM với lợi thế về cấu trúc nhân tạo và vật liệu Plasmonics tiềm năng bởi tương tác giữa ánh sáng và điện tử tự do trong các kim loại quý. Các tính chất thú vị của sóng plasmon bề mặt (surface plasmon polaritons – SPP, lan truyền trên biên phân cách giữa điện môi và kim loại) đã được tận dụng trong rất nhiều các cấu trúc của MM để tạo ra nhiều hiệu ứng kỳ diệu không quan sát thấy trong vật liệu tự nhiên về: chiết suất mang giá trị âm, hiệu ứng Cherenkov/Doppler ngược [1-5]. Về mặt bản chất, MM có cấu trúc rời rạc/tuần hoàn và cơ chế hoạt động đều dựa trên sự tương tác mạnh giữa ánh sáng và vật chất. Do đó, khi kết hợp với vật liệu plasmonics (đặc biệt là vật liệu hai chiều – 2DP) sẽ mang đến nhiều giải pháp công nghệ tiên tiến (MM-2DP) giúp giải quyết các khó khăn thách thức đã nêu [24-47].

Hiện tại, một số tính chất ưu việt của vật liệu 2DP (độ truyền qua, độ dẫn điện tốt và giá trị độ dẫn có thể điều khiển dễ dàng thông qua thể hóa học, điện trường/từ trường) mới chỉ được nghiên cứu hầu hết dựa trên tính toán lý thuyết hay mô phỏng ở tần số THz cho các ứng dụng điều chỉnh về biên độ cũng như tần số dải hấp thụ. Vấn đề về chế tạo và ứng dụng các cấu trúc đó hiện vẫn đang gặp nhiều khó khăn do chi phí cao vì thường sử dụng các công nghệ chế tạo hiện đại đắt tiền. Mặt khác, công nghệ viễn thông, thông tin liên lạc trong các thiết bị thông minh hoạt động ở vùng GHz

(4G/5G) cho mục tiêu quân sự, dân sự và chăm sóc sức khỏe hiện đang là lĩnh vực ưu tiên phát triển ở nước ta và nhiều quốc gia trên thế giới. Do đó, việc hiện thực hóa sớm các mô hình vật liệu hấp thụ sóng điện từ dựa trên vật liệu biến hóa tích hợp với vật liệu plasmonic hai chiều (MPA- 2DP) ở vùng GHz có cấu trúc đơn giản, kích thước lớn và chi phí hợp lý đang được tiến hành sôi nổi ở các nhóm nghiên cứu ngoài nước [45,47].

Một số các hướng nghiên cứu cần triển khai để sớm đưa các mô hình MPA-2DP hoạt động trong thực tế ở vùng GHz đó là nghiên cứu phát triển đa dạng công nghệ chế tạo vật liệu MPA và đồng thời là công nghệ tích hợp vật liệu 2DP vào các cấu trúc MPA nhằm: kiểm soát được sự biến đổi về biên độ và tần số của phổ hấp thụ thông qua chiều dày của các vật liệu 2DP được sử dụng; không cần sử dụng mặt nạ để tiết kiệm chi phí và thời gian chế tạo; điều khiển tính chất hấp thụ khi thay thế hoàn toàn lớp kim loại bằng 2DP tuần hoàn; hiện thực hóa sự hấp thụ hai chiều dựa trên cấu trúc đẳng hướng; điều khiển biên độ và tần số hấp thụ dựa trên tác động cưỡng bức (cơ nhiệt, điện, quang và pha tạp); điều khiển hiệu ứng chuyển đổi phân cực trong mô hình bất đối xứng. Do đó, chúng tôi lựa chọn đề tài của luận án là: ***“Nghiên cứu tích hợp vật liệu plasmonic hai chiều graphene và MoS₂ trên cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ ở vùng tần số GHz và THz”*** nhằm tối ưu đặc tính hấp thụ đơn/đa dải tần và dải rộng.

2. Mục tiêu của luận án:

- Làm rõ cơ chế hoạt động của một số mô hình vật liệu biến hóa tích hợp với vật liệu plasmonic hai chiều (MPA-2DP), dựa trên đặc tính cộng hưởng điện từ và phối hợp trở kháng, cộng hưởng điện môi.

- Chế tạo và kiểm chứng thực nghiệm một số mô hình MPA-2DP trong vùng tần số GHz nhằm kiểm soát biên độ và tần số hấp thụ đa đỉnh.

3. Những đóng góp mới của luận án: Luận án đã đạt được một số kết quả chính liên quan đến vấn đề tích hợp các vật liệu plasmonic hai chiều (graphene và Molybdenum-disulfide) có tên chung là MPA-2DP, bao gồm:

+ Luận án làm rõ cơ chế hoạt động mô hình MPA-2DP tích hợp mực in dẫn điện thấp trên nền vật liệu 2 chiều graphene (điện trở thay đổi từ 7,2 đến

30,0 Ω/sq trong vùng tần số 5-10 GHz), phổ hấp thụ thu được dưới dạng đa đỉnh (độ hấp thụ tối đa đạt trên 90% tại 6,85 GHz), độ hấp thụ có thể điều khiển tới 60% tại 8,4 GHz. Do cấu trúc đối xứng, mô hình này hoạt động tốt với góc tới nhỏ hơn 60° và tại các góc phân cực khác nhau ($0-90^\circ$).

+ Luận án đã kiểm soát được sự thay đổi về biên độ và tần số hấp thụ của một số MPA-2DP trên dải tần số rộng dựa trên việc tích hợp MoS_2 (độ hấp thụ đạt trên 90% từ 10,1 -17,8 GHz), độ rộng tương đối (FBW) đạt trên 55,2%.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ ĐẶC TÍNH HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA TÍCH HỢP VẬT LIỆU PLASMONIC HAI CHIỀU

1.1. Đặc trưng hấp thụ trong môi trường vật liệu biến hoá (MM)

1.1.1. Lý thuyết chung về hấp thụ tuyệt đối năng lượng sóng điện từ trong MM

Tương tác điện từ giữa vật liệu và sóng điện từ có thể mô tả qua hệ phương trình Maxwell với các điều kiện biên thích hợp. Hệ số phản xạ và truyền qua có thể được xác định theo hệ phương trình sau:

$$\begin{aligned}\tilde{r} &= \frac{E_r}{E_i} \equiv |r|e^{i\theta_r} \\ \tilde{t} &= \frac{E_t}{E_i} \equiv |t|e^{i\theta_t}\end{aligned}$$

Trong đó θ_r và θ_t là pha phản xạ và truyền qua tương ứng. Độ phản xạ (R) và độ truyền qua (T) được xác định bởi:

$$\begin{aligned}R &= |\tilde{r}|^2 \\ T &= |\tilde{t}|^2\end{aligned}$$

Độ hấp thụ (A) được tính theo định luật bảo toàn năng lượng:

$$A = 1 - R - T$$

1.1.2. Sự phối hợp trở kháng hoàn hảo trong MPA-2DP

Phối hợp trở kháng là trạng thái cần thiết để hấp thụ hoàn hảo khi đó các thành phần $\epsilon_r = 1$ và $\mu_r = 1$ hay $Z_r = 1$. Trong trường hợp tổng quát ta có:

$$\begin{aligned}R &= |\tilde{r}|^2 = 0 \\ T &= |\tilde{t}|^2 = e^{-2n_2k_0d} \\ A &= 1 - e^{-2n_2k_0d}\end{aligned}$$

Phương trình trên chỉ ra nếu môi trường có tổn hao (n_2) lớn và chiều dày d được tối ưu có thể đạt được giá trị hấp thụ tuyệt đối (100%).

1.1.3. Đặc tính hấp thụ của MPA có cấu trúc bất đẳng hướng

Xét cấu trúc MPA tổng quát như là một tấm vật liệu đồng nhất gồm 03 lớp: cấu trúc kim loại tuần hoàn/điện môi/tấm kim loại liên tục [59]. Chúng ta có thể xem xét tương tác chọn lọc của sóng điện từ khi truyền tới cấu trúc mặt trước, thường gây ra bởi cộng hưởng từ và cộng hưởng điện. Tại bước sóng hấp thụ $\lambda = 5,94 \mu\text{m}$, $\epsilon_{\text{eff}} = 2,432 + 24,175i$ và $\mu_{\text{eff}} = 1,003 + 25,517i$ dẫn tới $z_{\text{eff}} = 1,02 + 0,03i$, và $n_{\text{eff}} = 1,736 + 24,849i$. Chiết suất có phần ảo đạt giá trị lớn $n'' = 24,849$ là nguồn gốc cho sự tiêu tán năng lượng hấp thụ tại bước sóng này. Cường độ sóng điện từ khi xuyên qua bề mặt mẫu MPA có thể biểu diễn bởi: $I = I_0 e^{-2\alpha z}$, trong đó $\alpha = n''k = 2\pi n/\lambda = 26.28 \mu\text{m}^{-1}$. Khi sóng điện từ bị phản xạ ngược trở lại do tấm kim loại liên tục mặt sau, cường độ suy giảm theo $I/I_0 = e^{-4\alpha z} = 7,8 \times 10^{-5}$. Do đó 99,98% năng lượng của sóng điện từ tới bị hấp thụ bên trong MPA [59,60].

1.1.4. Mô hình cấu trúc MPA bất đẳng hướng dựa trên hiệu ứng trong suốt cảm ứng điện từ

Để có thể tạo ra nhiều cộng hưởng, chúng ta có thể khai thác sự tương tác giữa các cấu trúc cộng hưởng trong vật liệu biến hóa dựa trên hiệu ứng truyền qua cảm ứng điện từ (EIT) [61,62]. Một mô hình tiêu biểu của phương pháp này được thiết kế bao gồm hai lớp: lớp cấu trúc cộng hưởng gồm 3 thanh kim loại ở trên và lớp điện môi ở dưới. Các thanh kim loại dọc đóng vai trò là chế độ sáng được kích thích trực tiếp bởi trường tới trong khi hai thanh kim loại ngang không thể được kích thích trực tiếp và được coi là chế độ tối. Chế độ tối có thể được kích thích bởi chế độ sáng thông qua việc dịch chuyển vị trí thanh kim loại dọc (kích thích gián tiếp). Quỹ đường kích thích trực tiếp $|0\rangle \rightarrow |1\rangle \rightarrow |0\rangle$ và quỹ đường kích thích gián tiếp $|0\rangle \rightarrow |1\rangle \rightarrow |2\rangle \rightarrow |0\rangle$ sẽ giao thoa triệt tiêu với nhau để tạo ra một cửa sổ truyền qua. Hiện tượng này thường được biết đến với tên gọi là hiệu ứng EIT. Trong trường hợp cấu trúc đối xứng, phổ chỉ xuất hiện một đáy truyền qua tương ứng với sự kích thích cộng hưởng của chế độ sáng. Khi cấu trúc bất đối xứng,

một vùng truyền xuất hiện ở vị trí của đáy truyền qua ban đầu và nằm giữa hai cộng hưởng mới được tạo ra. Sự tách 02 đáy truyền qua do tương tác trường gần (NF) dẫn tới hình thành hai cộng hưởng mới. Tại hai tần số cộng hưởng mới, sự phối hợp trở kháng của cấu trúc với môi trường hoạt động có thể xảy ra, khi kết hợp với cộng hưởng từ mạnh, năng lượng của sóng điện từ tới sẽ được hấp thụ hoàn toàn bên trong cấu trúc.

1.1.5. Đặc tính hấp thụ của MPA có cấu trúc đẳng hướng

Vật liệu MM được thiết kế với lớp kim loại liên tục ở mặt sau được gọi chung là cấu trúc bất đẳng hướng do chỉ hấp thụ một chiều. Khác với các cấu trúc MPA bất đẳng hướng, loại cấu trúc đẳng hướng cần điều khiển hai cộng hưởng: cộng hưởng điện và cộng hưởng từ gần nhau [65]. Mặc dù, MPA đẳng hướng có lợi thế trong hoạt động độc lập thực tế nhưng gặp khó khăn trong kỹ thuật chế tạo: cần đảm bảo sự sắp xếp tuyệt đối đồng trục giữa hai lớp cấu trúc kim loại của tấm điện môi.

1.2. Đặc tính điện từ của vật liệu hai chiều có cấu trúc tuần hoàn

1.2.1. Mô hình lý thuyết Kubo cho đặc tính dẫn điện của Graphene

Lớp vật liệu graphene được đặc trưng bởi giá trị độ dẫn bề mặt, được xác định thông qua dòng điện bề mặt xuất hiện khi điện trường tác động có phương tiếp tuyến với mặt phẳng graphene. Sử dụng mô hình độ dẫn Kubo có thể xác định được độ dẫn của graphene. Ở trạng thái phi từ, độ dẫn được coi là đẳng hướng với hai thành phần độ dẫn intraband (σ_{intra}) và interband (σ_{inter}) sẽ đóng góp chủ yếu. Tại nhiệt độ phòng (300K), $|\mu_C| \geq (k_B T)$ và $(k_B T) \leq \hbar\omega$, khi đó, đóng góp của độ dẫn inter-band được xác định là rất nhỏ so với thành phần độ dẫn intra-band. Vì vậy, chúng ta có thể mô tả độ dẫn bề mặt của lớp graphene theo lý thuyết Drude, trong đó độ dẫn bề mặt của graphene phụ thuộc vào tần số và thể hóa học (năng lượng Fermi).

1.2.2. Mô hình lý thuyết cho đặc tính dẫn điện của molybdenum disulfide (MoS₂)

MoS₂ dạng màng ở kích thước nanomet (MoS₂-NS) là vật liệu đa lớp tương tự như graphene. Tại vùng tần số cao, giá trị phần thực của độ điện thẩm trong cả hai trường hợp vật liệu khối và màng nano đều giảm theo lý thuyết Debye:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (1.38)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau + \frac{o}{\omega \varepsilon_0} \quad (1.39)$$

1.3. Một số mô hình MPA tích hợp vật liệu plasmonic hai chiều (MPA-2DP)

1.3.1. Cấu trúc MPA tích hợp một phần graphene

Thiết kế ô cơ sở của cấu trúc MPA-graphene bao gồm bốn lớp: các cộng hưởng bằng kim loại (vàng) có bề dày $t_m = 0,1 \mu\text{m}$ [25,26] và một mặt phẳng kim loại được ngăn cách bởi một lớp điện môi có độ điện thẩm tương đối là $\varepsilon_d = 1,6$ [27] và tích hợp 1 lớp graphene độ dày mỗi lớp là $t_g = 0,34 \text{ nm}$ ngay bên dưới cấu trúc kim loại tuần hoàn mặt trước. Kết quả khảo sát cho thấy biên độ và tần số hấp thụ bị ảnh hưởng mạnh bởi bán kính vòng cộng hưởng. Nhóm nghiên cứu này đã xây dựng các siêu ô cơ sở bằng cách sắp xếp các vòng cộng hưởng có bán kính khác nhau và sắp xếp các vòng cộng hưởng đồng trục. Kết quả cho thấy khi cấu trúc ô cơ sở được tối ưu, động rộng phổ hấp thụ đã được mở rộng đáng kể.

1.3.2. Cấu trúc MPA dựa trên cộng hưởng mặt trước hoàn toàn bằng vật liệu 2DP

MPA có các cấu trúc cộng hưởng ở mặt trước được làm hoàn toàn từ graphene đã được nghiên cứu [34,35]. Kết quả cho thấy độ hấp thụ và độ rộng phổ hấp thụ phụ thuộc đáng kể vào độ dẫn của graphene. Khi độ dẫn của graphene nhỏ, phổ hấp thụ có dạng dải hẹp, khi tăng độ dẫn lên, các đỉnh hấp thụ hẹp được mở rộng và hình thành MPA dải rộng.

1.4. Tiềm năng ứng dụng của MM-2DP

1.4.1. Ứng dụng giảm thiểu tác động của bức xạ THz

Hiện nay chưa có nhiều nghiên cứu tổng thể đối với sự ảnh hưởng của sóng THz tới sức khỏe con người, do đó, vấn đề về nhiễu điện từ, an ninh thông tin và tàng hình trong quân sự của các loại vật liệu ở vùng GHz-THz vẫn đang được đẩy mạnh nghiên cứu. Vật liệu 2DP được tích hợp trong cấu trúc MM có lợi thế về khả năng điều khiển linh hoạt biên độ và tần số hấp thụ trong các cấu trúc đa lớp, cấu trúc lai hóa, hay các cấu trúc siêu mỏng-nhẹ. Một số mô hình MM tích hợp vật liệu 2DP cho mục tiêu che chắn sóng

điện từ vùng THz có thể đạt được độ hấp thụ 90% trong dải tần số hoạt động từ 0,1 THz tới 2,5 THz [87].

1.4.2. Ứng dụng điều biến THz

Mật độ điện tử và mức năng lượng Fermi của Graphene có thể được điều khiển thông qua thế áp đặt bên ngoài. Do đó, các MPA tích hợp graphene có khả năng điều biến tốt, cho thấy tiềm năng sử dụng MPA-2DP có thể được mở rộng với ứng dụng đa đỉnh/dải rộng bằng cách thiết kế cấu trúc đa lớp, chọn lọc và tích trữ năng lượng sóng điện từ ở vùng GHz [88,89].

1.4.3. Ứng dụng cảm biến THz

Năm 2019, Qiu và cộng sự đã đề xuất mô hình cấu trúc MPA tích hợp vật liệu MoS_2 trên vùng ánh sáng nhìn thấy. Đối với ứng dụng cảm biến, mô hình này có thể đạt được độ nhạy 500 nm/RIU và 200 nm/RIU tương ứng với cấu trúc dạng hình vuông và tròn. Cơ chế hoạt động dựa trên cộng hưởng điện môi và cộng hưởng plasmon bề mặt của các cấu trúc vật liệu 2DP tích hợp dưới dạng tuần hoàn bên trong MPA [90].

KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

Trong chương này, luận án đã trình bày tổng quan về các nghiên cứu về đặc tính hấp thụ sóng điện từ của một số mô hình vật liệu biến hóa tích hợp vật liệu plasmonic hai chiều; phân tích làm rõ các thành tố ảnh hưởng tới cơ chế hoạt động của các mô hình lai hóa MPA-2DP dựa trên lý thuyết phối hợp trở kháng hoàn hảo hay hiệu ứng truyền qua trong suốt cảm ứng điện từ. Một số các ứng dụng nổi bật của các mô hình theo hướng nghiên cứu của luận án có thể kể đến như: che chắn sóng điện từ và cảm biến. Tuy nhiên, nghiên cứu các mô hình tích hợp có thể gặp một số thách thức như: áp dụng được các đặc trưng plasmonic của vật liệu 2DP trong mô phỏng và thực nghiệm nhằm điều khiển biên độ và tần số của phổ hấp thụ; tối ưu mô hình MPA-2DP dựa trên điều khiển chủ động (cơ nhiệt, điện, quang và pha tạp); Đánh giá đóng góp của đặc tính plasmonic của lớp vật liệu 2DP lên cơ chế tiêu tán năng lượng hấp thụ của các cấu trúc MPA, v.v.

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình tính toán lý thuyết MPA-2DP

Trong tính toán theo lý thuyết phần tử hữu hạn, để đánh giá được độ hấp thụ của mẫu, chúng ta cần xác định các thông số tán xạ thông qua mối liên hệ giữa sóng tới và sóng phản xạ và truyền qua. Thông qua tham số đặc trưng cho độ phản xạ S_{11} , chúng ta có thể đánh giá được vị trí xảy ra sự phối hợp trở kháng và thông qua S_{21} có thể đánh giá được mức độ tổn hao của môi trường. Tần số hấp thụ của cấu trúc có thể được dự đoán dựa trên mạch cộng hưởng RLC tương đương của cấu trúc đó, tùy vào thiết kế cấu trúc ô cơ sở.

2.2. Một số kỹ thuật mô phỏng MPA-2DP

Trong mô phỏng, cơ chế hấp thụ và tính chất cộng hưởng của các MPA có thể được khảo sát dựa trên các phần mềm thương mại (CST, COMSOL, ...) [93,94] được cấp bản quyền tại Phòng thí nghiệm số của Học viện KHCN. Các phần mềm này cho phép thu được phân bố điện trường, từ trường, dòng điện cảm ứng và năng lượng tổn hao, v.v. Giá trị tường minh của các tham số ϵ_{eff} và μ_{eff} (hay chiết suất hiệu dụng) có thể xác định được thông qua kỹ thuật tính toán cho môi trường MM đẳng hướng (khi sử dụng hệ số phản xạ và truyền qua).

2.3. Một số kỹ thuật chế tạo MPA và tích hợp vật liệu 2DP

2.3.1. MPA tích hợp một phần vật liệu 2DP

Mẫu chế tạo có thể bao gồm 3 lớp: kim loại/điện môi/kim loại, hoặc 2 lớp, kim loại/điện môi, tùy thuộc vào vị trí vật liệu plasmonic hai chiều được tích hợp một phần hay toàn phần. Vật liệu 2DP được sử dụng để tích hợp vào mẫu MAs sẽ là: graphene, MoS_2 . Ban đầu, các mô hình đã tối ưu trong mô phỏng và tính toán sẽ được chế tạo bằng phương pháp quang khắc thường, sau đó vật liệu 2DP sẽ được tích hợp vào mẫu đã chế tạo được.

2.3.2. MPA có cấu trúc cộng hưởng sử dụng vật liệu 2DP

Trong trường hợp thay thế hoàn toàn lớp kim loại tuần hoàn bằng mực dẫn vật liệu hai chiều, mực nano-graphene được bắn xuyên qua một mặt nạ

(có các rãnh là hình các cấu trúc đã được khắc bằng lazer) là phương pháp hiệu quả cao với mức chi phí thấp.

Phương pháp in trực tiếp là một công cụ hữu hiệu giúp chế tạo hay tích hợp nhiều loại vật liệu khác nhau trên cấu trúc MPA. Cấu trúc của vật liệu sẽ được tạo bởi mực in dẫn điện được pha tạp các thành phần kim loại như các hạt nano bạc hoặc graphene, MoS₂ và WS₂. Đây là một phương pháp mới đơn giản, nhanh chóng và có thể tích hợp nhiều loại vật liệu 2DP với kích thước lớn mà không cần sử dụng mặt nạ. Do đó, công nghệ này hoàn toàn phù hợp cho chế tạo các mô hình MPA-2DP ở dải tần số GHz.

2.4. Đo đặc và khảo sát thực nghiệm đặc tính điện từ của MPA-2DP

Trong quá trình đo đặc tại vùng tần số GHz, trong phòng cách âm, chúng tôi sử dụng hệ đo Hewlett-Packard ZNB20. Trong phương pháp đo trong không gian tự do, hai ăng ten loa có dải tần số hoạt động từ 1,0 đến 18 GHz được thiết lập sao cho có thể thay đổi góc tới của sóng điện từ đến bề mặt của MPA-2DP. Hiện tại, quá trình đo đặc này sẽ được thực hiện tại Viện Khoa học vật liệu hoặc tại Viện Khoa học và Kỹ thuật Quân sự - Việt Nam.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Để nghiên cứu đặc tính điện từ của các mô hình vật liệu MM tích hợp với vật liệu plasmonic hai chiều, phương pháp tính toán lý thuyết và mô phỏng được sử dụng trước hết để thiết kế được vật liệu MM có đặc trưng điện từ mong muốn. Quá trình thiết kế và mô phỏng cấu trúc MM trong vùng GHz và THz đều dựa trên kỹ thuật phần tử hữu hạn (CST Studio và Comsol Multiphysics) hoặc kỹ thuật FDTD (Lumerical FDTD). Dựa trên kết quả mô phỏng ban đầu, chúng ta có thể đánh giá tính khả thi về việc sử dụng hoặc tích hợp vật liệu hai chiều vào trong các cấu trúc MM hoạt động trong vùng tần số GHz hoặc THz. Sau khi đề xuất và tối ưu được cấu trúc và tính khả dĩ trong chế tạo, các cấu trúc khác nhau nhằm kiểm chứng các đặc trưng điện từ mong muốn được chế tạo dựa trên kỹ thuật quang khắc. Sau cùng, tính chất vật lý cơ bản của vật liệu được đo đặc thông qua các thiết bị như phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR), Hệ phân tích mạng (VNA ZNB20), từ đó chúng ta sẽ hiểu cơ chế hoạt động của các mô hình tích hợp đề xuất.

CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH HẤP THỤ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA TÍCH HỢP VẬT LIỆU GRAPHENE

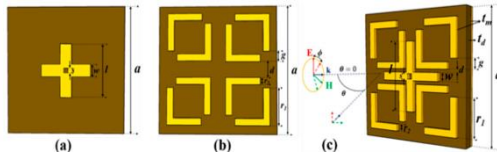
3.1. Nghiên cứu ảnh hưởng của graphene lên tính chất điện từ của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ có hiệu ứng tương tác NF trực tiếp (D-MPA)

3.1.1. Thiết kế - mô phỏng D-MPA

Ô đơn vị của D-MPA đề xuất được thể hiện trong Hình 3.1. Cấu trúc này bao gồm một lớp điện môi FR-4 ở giữa hai lớp kim loại đồng. Các tham số cấu trúc có giá trị trình bày trong Bảng 3.1.

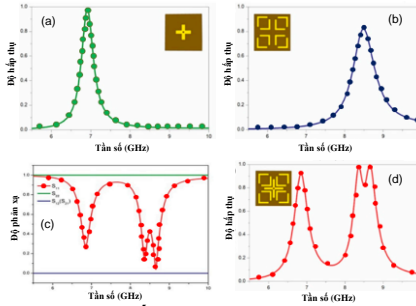
Bảng 3.1. Các thông số cấu trúc của MPA

Thông số	a	d	g	l	r_1	r_2	s	t_d	t_m	w
Giá trị (mm)	22	1	1,5	11	7	1	0,5	1,6	0,035	2



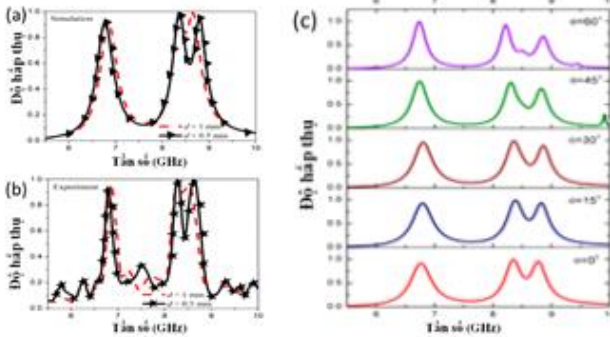
Hình 3.1. Cấu trúc đơn vị của MPA được đề xuất: (a) Cấu trúc CS, (b) Cấu trúc SRR và (c) Cấu trúc MPA kết hợp đa cộng hưởng.

Độ hấp thụ của cấu trúc CS có thể đạt tới 98,4% ở 6,85 GHz (Hình 3.2a), trong khi của cấu trúc SRR là 82,2% tại 8,5 GHz (Hình 3.2b). Bằng cách kết hợp chúng với nhau, MPA có thể tạo ra ba đỉnh hấp thụ ở 6,85 GHz (92,2%) và hai đỉnh hấp thụ gần nhau ở 8,37 (98%) và 8,65 GHz (99,8%) (Hình 3.2d). Kết quả cho thấy, việc khai thác tương tác NF của hiệu ứng EIT cho phép đạt được phổ hấp thụ đa dải của D-MPA được đề xuất hoạt động dựa trên tương tác NF “sáng – sáng”. Các thông số S_{11} , S_{21} , S_{22} và S_{12} (Hình 3.2c) cho thấy MPA đề xuất chỉ hấp thụ sóng tới lớp cấu trúc phía trước và phản xạ toàn sóng tới lớp kim loại liên tục phía sau. Hiệu ứng EIT do tương tác NF của các phần tử sáng-sáng đã khiến cho D-MPA có thể tạo ra ba cộng hưởng hấp thụ tại 3 tần số 6,85, 8,37 và 8,65 GHz. Hay nói cách khác, tương tác NF đóng vai trò quan trọng giúp tăng số lượng cộng hưởng, từ đó tạo ra sự hấp thụ đa đỉnh.



Hình 3.2 Phổ hấp thụ của (a) cấu trúc CS và (b) SRR. (c) Các thông số S_{11} , S_{22} và S_{12} (S_{21}), và (d) phổ hấp thụ của D-MPA đề xuất.

3.1.2. Nghiên cứu sự biến thiên của phổ hấp thụ của theo tham số cấu tạo của cấu trúc D-MPA

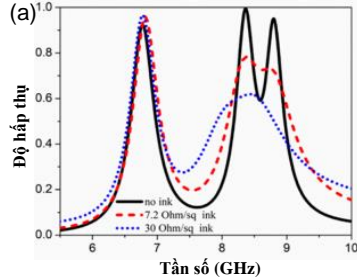


Hình 3.3. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng và (b) thực nghiệm phụ thuộc vào khoảng cách d giữa các cấu trúc SRR và CS và (c) góc tới.

Sự thay đổi phổ hấp thụ theo khoảng cách d giữa các cấu trúc CS và SRR (đặc trưng cho độ mạnh tương tác giữa NF các cộng hưởng) của MPA đã được nghiên cứu (Hình 3.3). Khi d giảm từ 1 đến 0,5 mm, sự dịch chuyển nhỏ xảy ra ở vị trí cộng hưởng hấp thụ đầu tiên (từ 6,85 đến 6,80 GHz và hai đỉnh hấp thụ tần số cao bị thay đổi rõ rệt hơn. Kết quả này cho thấy tham số d đóng vai trò quan trọng trong việc điều khiển sự tương tác NF của hai cấu trúc cộng hưởng. Khi d nhỏ hơn, tương tác NF của SRR và CS càng mạnh, làm cho đỉnh cộng hưởng tách rõ rệt hơn. Có thể kết luận rằng bằng cách kiểm soát tham số cấu trúc d , vị trí cộng hưởng (hấp thụ) được điều khiển

linh hoạt. Do đó, vùng hấp thụ từ 8,28 đến 8,75 GHz có thể được chuyển đổi từ băng rộng (ở d lớn hơn) sang vùng hấp thụ băng tần kép (ở d nhỏ hơn).

Hình 3.6 cho thấy phổ hấp thụ mô phỏng và thực nghiệm của MPA được đề xuất khi chưa tích hợp graphene và khi được tích hợp graphene. Khi điện trở bề mặt của mực graphene là $7,2 \Omega / \text{sq}$, đỉnh hấp thụ đầu tiên gần như không thay đổi vì đây là cộng hưởng hấp thụ riêng của cấu trúc CS, do đó không bị ảnh hưởng bởi tương tác của lớp vật liệu graphene. Tuy nhiên, khoảng cách giữa hai vị trí đỉnh hấp thụ thứ hai và thứ ba bị thu hẹp, vùng tần số từ 8,26 đến 8,86 GHz cho độ hấp thụ chỉ đạt 70% đến 80%. Khi điện trở tấm của mực graphene tăng từ 7,2 đến $30 \Omega / \text{sq}$, đỉnh hấp thụ đầu tiên vẫn gần như không thay đổi. Trong khi đó, các đỉnh hấp thụ thứ hai và thứ ba được biến đổi thành một đỉnh hấp thụ duy nhất ở 8,4 GHz (60%).



Hình 3.6. (a) Phổ hấp thụ mô phỏng các MPA plasmonic ban đầu và sau khi tích hợp graphene với các điện trở khác nhau của mực graphene

Kết quả mô phỏng phân bố dòng điện bề mặt chỉ ra rằng sự tương tác NF của các cấu trúc cộng hưởng “sáng-sáng” bị suy yếu khi có sự tồn tại của lớp vật liệu graphene.

3.1.3. Chế tạo và nghiên cứu đặc tính hấp thụ của D-MPA tích hợp vật liệu graphene

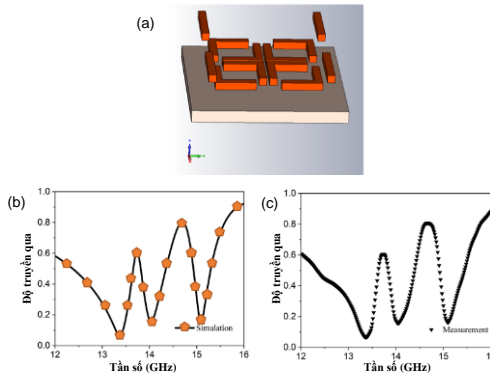
Trong chế tạo mẫu, trước hết, các cấu trúc kim loại tuần hoàn trên đế truyền thống FR-4/Polyimide dày 0,6 -1,2 mm ($\epsilon_r = 2,5 - 4,3$, tổn hao điện môi $\tan\delta \sim 0,02$) có thể chế tạo bằng kỹ thuật quang khắc. Một lớp mực graphene (Resistivity: 0,003 - 0,005 $\Omega\text{-cm}$) được phủ lên bề mặt của các cấu trúc kim loại thông qua phương pháp in phun trực tiếp. Các phổ hấp thụ đo đạc của cấu trúc D-MPA-2DP có xu hướng tương tự như kết quả mô phỏng. Khi không có mực in graphene, độ hấp thụ đạt trên 90% tại 3 đỉnh: 6,8 GHz,

8,4 và 8,8 GHz. Khi điện trở của mực in graphene tăng lên 7,2 và 30 Ohm/sq, phổ thực nghiệm cũng cho thấy sự suy giảm về biên độ (độ hấp thụ thấp nhất dưới 60%) tại hai đỉnh 8,4 và 8,8 GHz.

Trong cấu trúc lai hóa giữa D-MPA tích hợp plasmonic hai chiều, lớp graphene đóng vai trò là lớp điện trở làm suy yếu biên độ cộng hưởng riêng lẻ của SRR. Do đó, sự tương tác trường gần của cấu trúc cộng hưởng SRR và CS cũng bị suy yếu, làm cho sự tách biệt về tần số giữa các đỉnh thứ hai và thứ ba suy giảm. Các kết quả thu được chỉ ra rằng đặc tính hấp thụ của D-MPA có thể được điều khiển linh hoạt bằng cách tích hợp với vật liệu độ dẫn thấp (tương tự như vật liệu plasmonic hai chiều – graphene) trong dải tần số hoạt động mong muốn.

3.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của graphene lên tính chất điện từ của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ có hiệu ứng tương tác NF gián tiếp (I-MPA)

3.2.1. Nghiên cứu đặc trưng điện từ của cấu trúc vật liệu biến hóa có hiệu ứng NF gián tiếp

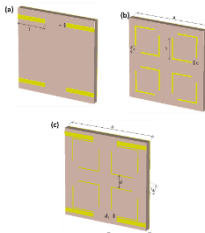


Hình 3.11. (a) Cấu trúc EIT đa đỉnh tối ưu trong vùng tần số GHz và (b) phổ truyền qua mô phỏng và (c) thực nghiệm tương ứng.

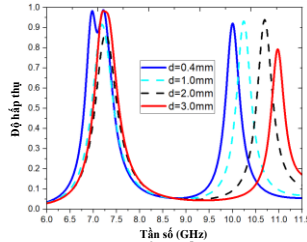
Cấu trúc I-MPA được thiết kế bao gồm vòng cộng hưởng có rãnh bất đối xứng (SRR) và dây bị cắt (CW) [Hình 3.11(a)]. Kết quả mô phỏng cho thấy hai cực đại truyền qua 60% và 80% xuất hiện tại 13,7 và 14,7 GHz trong khi các đáy không truyền qua lần lượt là 13,3; 14 và 15 GHz [Hình 3.11(b)].

Khi khoảng cách giữa CW và SRR nhỏ hơn 0,5 mm, khoảng cách giữa các vị trí đáy truyền qua được dự đoán sẽ tách xa nhau nhất do tương tác NF mạnh nhất [95-97]. Ở các giá trị d lớn hơn 0,5 mm, SRR và CW được coi là đối xứng nên các kích thích do tương tác NF giữa SRR và CW không rõ ràng hay nói các khác là chỉ có thể tạo ra 1 đáy trong phổ hấp thụ (do lưỡng cực điện được cảm ứng trên SRR). Bên cạnh đó, khi $d = 0,5$ mm, vị trí của SRR và CW trở thành bất đối xứng và tương tác NF “sáng – tối” và “sáng-sáng” giữa SRR và CW đều được tạo ra. Do đó, hiệu ứng EIT đa dải tần xuất hiện do các tương tác này.

3.2.2. Tối ưu mô hình cấu trúc I-MPA



Hình 3.12 Sơ đồ cấu trúc vật liệu MA 3 lớp (Kim loại/điện môi/kim loại): a) thanh cắt CW; b) Vòng cộng hưởng SRR; c) Cấu trúc I-MPA.

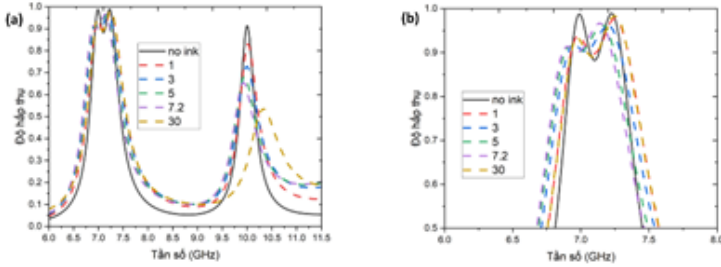


Hình 3.15. Phổ hấp thụ trong dải tần số GHz của các cấu trúc MPA khi giảm giá trị khoảng cách d từ 3 đến 0,4mm.

Để tối ưu hoá và thu được các đỉnh hấp thụ có độ hấp thụ 90% chúng tôi đã tiến hành thiết kế thêm tấm kim loại liên tục phía sau của cấu trúc CW-SRR (cấu trúc này được gọi là I-MPA). Khi giảm khoảng cách d giữa các SRR có sự thay đổi mạnh tại các đỉnh hấp thụ của cấu trúc. Tại tần số thấp hơn, xuất hiện hai đỉnh hấp thụ tại 6,97 (98,27%) và 7,22 GHz (98,75%) với $d < 0,4$ mm. Đỉnh hấp thụ thứ ba tại 10 GHz tăng từ 79,25 lên tới 92%. Quan sát chỉ ra rằng tham số d đóng một vai trò quan trọng trong việc kiểm soát các tương tác NF sáng-tối và sáng-sáng. Khi d càng nhỏ, sự tương tác trường gần của các SRR càng mạnh, làm cho vị trí các đỉnh cộng hưởng ở tần số thấp hơn tách ra xa hơn. Đỉnh hấp thụ ở vùng tần số cao hơn là do cộng hưởng của CW được cảm ứng bởi tương tác NF “sáng-tối” của SRR và CW. Do vị trí tương đối của SRR và CW thay đổi, phân bố dòng điện cảm ứng

trên CW cũng thay đổi, từ đó làm dịch chuyển tần số hấp thụ của đỉnh hấp thụ này.

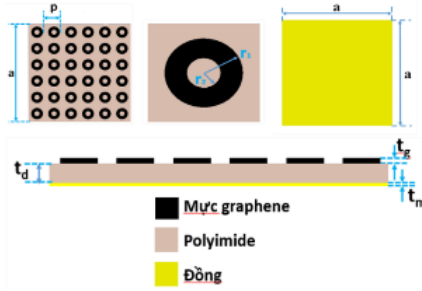
3.2.3. Thiết kế và mô phỏng cấu trúc vật liệu I-MPA tích hợp vật liệu graphene



Hình 3.17. (a) Phổ hấp thụ của cấu trúc khi thay đổi điện trở của mực graphene từ 1 đến 30 Ω/sq và (b) quan sát sự thay đổi của hai đỉnh hấp thụ tại tần số thấp.

Để mở rộng khả năng điều khiển phổ hấp thụ, chúng tôi tích hợp vật liệu graphene độ dẫn thấp vào cấu trúc I-MPA. Mực graphene được phủ lên CW và SRR. Các loại mực graphene khác nhau với điện trở mật thay đổi từ 1 đến 7,2 Ω/sq được khảo sát với $d = 0,4$ mm. Độ hấp thụ của hai đỉnh tại tần số thấp hơn giảm dần và có xu hướng hợp thành một đỉnh. Đỉnh hấp thụ riêng lẻ tại tần số cao hơn (10 GHz) giảm từ 92% xuống còn 62% khi tăng giá trị điện trở mực graphene từ 1 lên 7,2 Ohm/sq. Khi giá trị điện trở mực dẫn graphene tăng lên 30 Ohm/sq, phổ hấp thụ vẫn tồn tại 3 đỉnh xung quanh 6,9 GHz (90%), tại 7,35 GHz (96%) và tại 10 GHz (55%). Kết quả này khẳng định rằng, sự có mặt của vật liệu 2D plasmonic như graphene ảnh hưởng mạnh đến các đỉnh hấp thụ gây ra do tương tác NF (tại 6,9 GHz và 10 GHz), biên độ hấp thụ giảm do các dòng điện cảm ứng bị triệt tiêu trên bề mặt các cấu trúc thanh kim loại CW (thành phần tổn hao Ohmic được tăng cường khi điện trở mật tăng từ 1 đến 30 Ohm/sq). Ngược lại, tần số hấp thụ cơ bản tại 7,35 GHz được duy trì do sự tồn tại của cộng hưởng từ và tổn hao điện môi nội tại bên trong cấu trúc MPA.

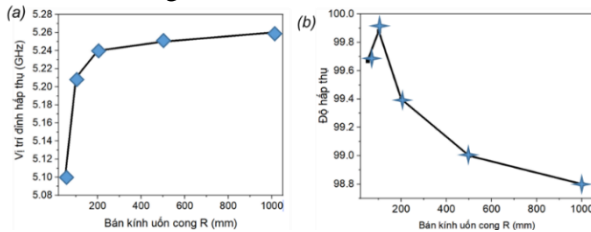
3.3. Điều khiển đặc trưng hấp thụ của vật liệu MPA tích hợp vật liệu graphene



Hình 3.20. Minh họa cấu tạo của cấu trúc MPA-2DP hoạt động ở vùng GHz.

Hình 3.20 mô tả cấu trúc của vật liệu MPA-2DP sử dụng lớp mực in graphene. Vật liệu có cấu trúc gồm lớp kim loại đồng liên tục ở mặt sau, lớp điện môi dẻo polyimide ở giữa và lớp mực graphene có điện trở bề mặt là $7,2 \Omega/\text{sq}$ được tạo các cấu trúc cộng hưởng tuần hoàn ở mặt trước. Kết quả mô phỏng cho thấy vật liệu có độ hấp thụ đạt tới 99,99% tại tần số 5,26 GHz ở trạng thái phẳng. Khi bị uốn cong, phổ hấp thụ mô phỏng của vật liệu bị suy giảm nhẹ về biên độ và tần số bị dịch xanh khi bán kính uốn cong tăng dần. Cụ thể, khi được uốn cong với bán kính uốn $R = 1000$ mm, độ hấp thụ đạt 98,8% tại 5,26 GHz. Trong điều kiện khi $R = 500$ mm, 100 mm, và 50 mm, độ hấp thụ tương ứng đạt 98,99% (5,25 GHz), 99,88% (5,21 GHz) và 99,67% - 5,1 GHz (Hình 3.26).

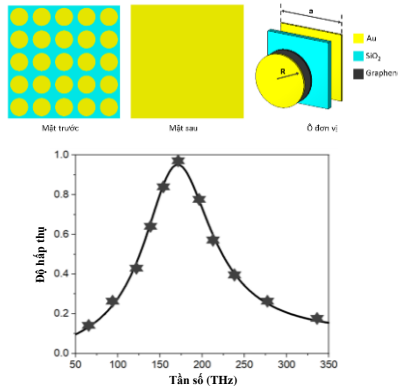
Như vậy, với mẫu vật liệu được đề xuất, phổ hấp thụ không phụ thuộc nhiều vào đặc tính đàn hồi của vật liệu, nó vẫn duy trì tốt đặc tính hấp thụ ngay cả khi bị uốn cong với bán kính uốn $R = 50$ mm.



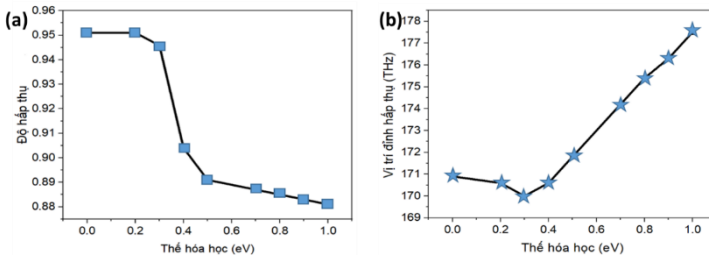
Hình 3.26. Sự phụ thuộc (a) vị trí và (b) cường độ đỉnh hấp thụ vào độ uốn cong.

*** Mô hình MPA-2DP có thể điều khiển tần số và độ hấp thụ bằng điện áp**

Nhằm điều khiển tần số và độ hấp thụ bằng điện áp, một lớp graphene được đặt xen giữa lớp SiO₂ và cấu trúc cộng hưởng hình tròn (Hình 3.28). Khi thế hóa học tăng lên, cường độ hấp thụ của MPA giảm xuống đồng thời vị trí của đỉnh hấp thụ bị dịch chuyển. Khi thế hóa học tăng từ 0 đến 0,3 eV, đỉnh hấp thụ bị dịch chuyển về phía tần số thấp. Nếu tiếp tục tăng μ_c , đỉnh hấp thụ dịch chuyển về phía tần số cao hơn. Sự thay đổi về biên độ và tần số hấp thụ có thể được lý giải do sự thay đổi về mật độ điện tích cảm ứng sinh ra khác nhau do điện thế áp đặt với giá trị khác nhau. So sánh tỷ lệ năng lượng tiêu tán trên các lớp vật liệu cho thấy, lớp kim loại chiếm ưu thế do tổn hao Ohmic trên vùng tần số cao.



Hình 3.28. Cấu trúc vật liệu biến hóa tích hợp graphene và Phổ hấp thụ mô phỏng cho cấu trúc MPA-2DP tương ứng



Hình 3.30. Sự thay đổi (a) cường độ hấp thụ và (b) vị trí đỉnh hấp thụ theo giá trị của thế hóa học của tấm graphene.

Sự tăng thể hóa học đến 1,0 eV sự giảm về biên độ hấp thụ có thể được giải thích dựa trên vị trí và cường độ của các cộng hưởng plamon của lớp graphene có thể bị dịch chuyển sang vùng tần số khác. Một nguyên nhân khác cũng có thể kể đến từ sự chuyển tiếp giữa các vùng interband và intraband của lớp graphene.

Kết luận chương 3

Chương này trình bày một số kết quả quan trọng chính về nghiên cứu đặc tính hấp thụ đa dải tần dựa trên cấu trúc có hiệu ứng tương tác NF trực tiếp (D-MPA) và gián tiếp (I-MPA). Thông qua sự tích hợp vật liệu plasmonic hai chiều (graphene), các tương tác trường gần ảnh hưởng đến cộng hưởng của các phân tử mode sáng và mode tối dẫn tới sự thay đổi trong biên độ và tần số hấp thụ trong dải tần số GHz. Cụ thể:

- Cấu trúc D-MPA: tương tác NF mạnh tại khoảng cách $d = 0,5\text{mm}$ giữa các cộng hưởng SRR và CS, tương tác NF bị suy giảm khi tích hợp lớp một phần lớp vật liệu graphene có điện trở mặt tăng trong khoảng $7,2 \Omega/\text{sq}$ đến $30 \Omega/\text{sq}$. Hệ quả là độ hấp thụ duy trì trên 90% tại tần số tại tần số 6,8 GHz và độ hấp thụ suy giảm xuống dưới 60% tại 8,2 GHz và 8,8 GHz.

- Cấu trúc I-MPA: tương tác NF mạnh tại khoảng cách $d = 0.4\text{mm}$ giữa các cộng hưởng SRR và CW, các đỉnh hấp thụ do tương tác NF bị ảnh hưởng mạnh xung quanh tần số 6,9 và 10,0 GHz, độ hấp thụ duy trì trên 90% tại 7,35 GHz khi giá trị điện trở mặt của lớp graphene tăng lên đến $30 \Omega/\text{sq}$.

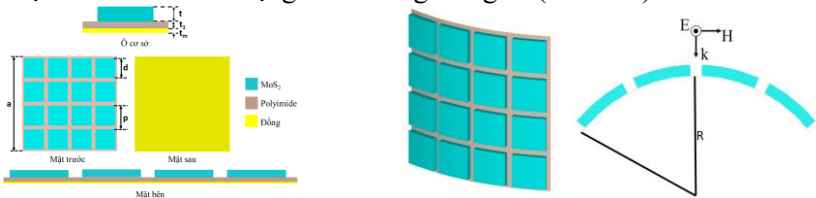
- Đặc tính plasmonic của graphene ảnh hưởng đến các cộng hưởng cơ bản/bậc cao đã được luận án khảo sát ở một số mô hình cấu trúc biến dạng (uốn cong) trong vùng tần số GHz và mô hình điều khiển điện áp ngoài trong vùng tần số THz: tại vùng tần số GHz, sự có mặt của lớp vật liệu graphene tạo ra tổn hao Ohmic giữ vai trò chính trong sự duy trì các đỉnh hấp thụ cao trên 90% cho các trường hợp bị biến dạng cong. Trên vùng tần số THz, đặc tính plasmonic của lớp graphene được điều khiển thông qua thể hóa học (từ 0,2 đến 1,0 eV) đã ảnh hưởng đến biên độ (độ hấp thụ giảm từ 95,1% đến 88,1%) và tần số hấp thụ (từ 170,6 đến 177,5 THz).

CHƯƠNG 4: NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH HẤP THỤ TRONG MỘT SỐ MÔ HÌNH VẬT LIỆU BIẾN HÓA TÍCH HỢP VẬT LIỆU MoS_2

4.1. Nghiên cứu đặc trưng hấp thụ của MPA-2DP tích hợp MoS_2 trong vùng tần số GHz.

4.1.1. Thiết kế cấu trúc ô cơ sở MPA-2DP tích hợp MoS_2 trong vùng tần số GHz.

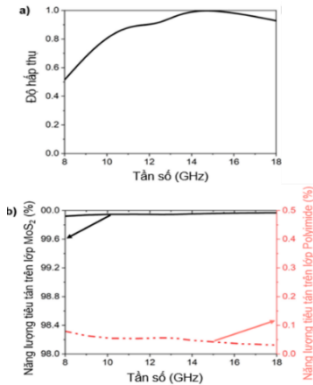
Vật liệu biến hóa được thiết kế với cấu trúc gồm ba lớp: lớp kim loại đồng liên tục ở mặt sau, lớp điện môi dẻo làm từ polyimide ở giữa và lớp mực in MoS_2 được cấu tạo bởi các cấu trúc dạng hình vuông đơn giản (Hình 4.1).



Hình 4.1. Minh họa cấu trúc ô cơ sở và trạng thái đàn hồi của MPA-2DP.

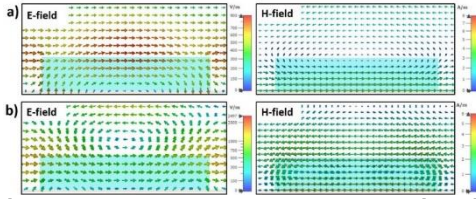
4.1.2. Mô phỏng các đặc trưng điện từ của MPA-2DP tích hợp MoS_2 ở trạng thái phẳng

Kết quả mô phỏng cho thấy vật liệu thể hiện tính chất hấp thụ tốt với độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần số từ 10,1 GHz đến 17,6 GHz (Hình 4.3(a)). Tỷ lệ năng lượng tiêu tán trong lớp MoS_2 và lớp chất nền điện môi Polyimide với tổng năng lượng được vật liệu hấp thụ đã được mô phỏng cho thấy gần như 100% năng lượng hấp thụ được tiêu tán trên lớp mực MoS_2 , trong khi đó phần năng lượng tiêu tán trên lớp điện môi chỉ chiếm chưa tới 0,05%.



Hình 4.3. (a) Phổ hấp thụ của MPA-2DP đề xuất, (b) tỉ lệ năng lượng tiêu tán trong các lớp cấu trúc của vật liệu.

4.1.3. Phân tích cơ chế hấp thụ của MPA-2DP tích hợp MoS₂



Hình 4.4. Phân bố điện trường và từ trường tại các tần số: a) 11,7 GHz và b) 15,3 GHz

Kết quả mô phỏng phân bố điện trường và từ trường cho thấy rằng tại tần số 11,7 GHz, một điện trường hình khuyên được hình thành, tạo ra một lưỡng cực từ tập trung trong khối MoS₂. Ngược lại, ở tần số 15,3 GHz, có thể quan sát thấy một lưỡng cực điện trong khối MoS₂ được hình thành do từ trường hình khuyên trong khối lập phương. Từ điểm này, ta có thể kết luận băng tần rộng của cấu trúc được đề xuất đạt được do sự kết hợp của hai chế độ cộng hưởng Mie, TE₀₁₁ và TM₀₁₁.

4.1.4. Sự ảnh hưởng của góc tới và góc phân cực lên đặc tính hấp thụ của MPA-2DP tích hợp MoS₂

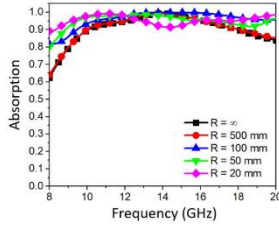
Do đặc tính đối xứng của cấu trúc, phổ hấp thụ gần như không thay đổi khi góc phân cực thay đổi từ 0 đến 80°. Vật liệu cũng thể hiện tính chất ổn định với góc tới rộng, khi góc tới của sóng điện từ tăng lên đến 60°, phổ hấp thụ vẫn duy trì đặc trưng hấp thụ dải rộng, với độ hấp thụ đạt trên 80% trong dải tần số từ 11,1 đến 15,6 GHz.

4.1.5. Ảnh hưởng của biến dạng cong lên đặc trưng hấp thụ của MPA-2DP tích hợp MoS₂

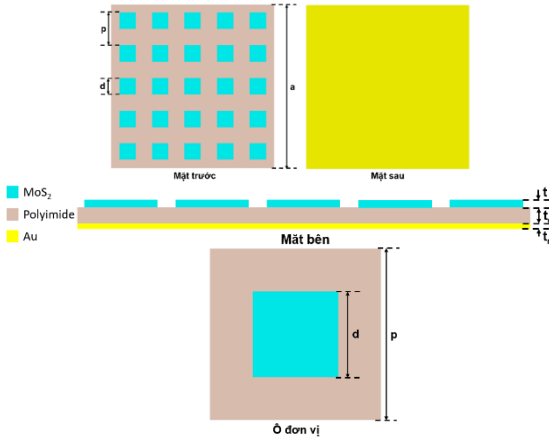
Kết quả mô phỏng cho thấy có sự mở rộng phổ hấp thụ khi uốn cong với các bán kính uốn R = 100 mm, 50 mm và 20 mm. Khi bán kính uốn giảm từ 500 mm đến 20 mm, FBW đã tăng từ 55,2% lên 97,2%. Sự mở rộng của phổ hấp thụ có thể được giải thích dựa trên sự bất đối xứng của cấu trúc. Khi vật liệu ở dạng uốn cong, sóng điện từ tới bề mặt của vật liệu dưới các góc tới khác nhau. Điều này dẫn đến điện trường và từ trường phân bố trên bề mặt vật liệu sẽ không đồng nhất. Khi bán kính cong giảm xuống, sự không đồng nhất này tăng lên, và sẽ cảm ứng ra các cộng hưởng mới do sự bất đối

xúng về mặt điện từ của vật liệu. Do đó, khi bán kính uốn cong giảm, phổ hấp thụ của vật liệu được mở rộng.

Hình 4.7. Phổ hấp thụ của vật liệu khi được uốn cong với các bán kính uốn khác nhau.



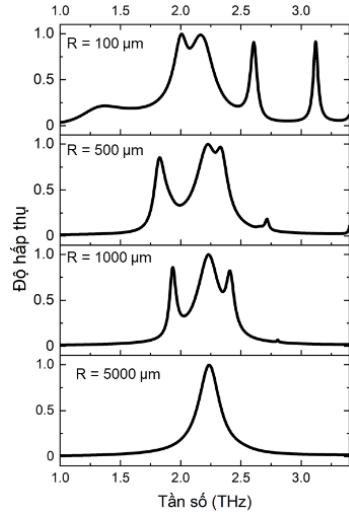
4.2. Điều khiển biên độ và tần số hấp thụ của MPA-2DP tích hợp MoS₂ trong vùng tần số THz



Hình 4.10. Mô hình vật liệu MPA-2DP tích hợp vật liệu MoS₂

Mô hình vật liệu biến hóa được đề xuất có cấu trúc gồm ba lớp: lớp polyimide ở giữa kim loại vàng liên tục ở mặt sau. Lớp vật liệu hai chiều MoS₂ được tạo hình các cấu trúc cộng hưởng ở mặt trước, có hằng số điện môi phức phụ thuộc vào tần số và được tính toán sử dụng mô hình Drude. Kết quả mô phỏng cho thấy, vật liệu cho một đỉnh hấp thụ tại tần số 2,2 THz với độ hấp thụ đạt 99,7%.

Khi uốn cong với bán kính uốn khác nhau, chúng tôi có thể điều khiển phổ hấp thụ của nó từ trạng thái đơn đỉnh (khi vật liệu ở dạng phẳng) sang trạng thái hấp thụ đa đỉnh (khi vật liệu bị uốn cong với bán kính uốn từ $100\ \mu\text{m}$). Bằng cách uốn cong vật liệu, cả tần số và độ hấp thụ của vật liệu đã được điều khiển. Thông qua sự biến dạng cong của các cấu trúc cộng hưởng tạo bởi MoS_2 , sự phân bố trường điện từ cục bộ xung quanh chúng có thể kích thích các chế độ cộng hưởng plasmonic mới ở các tần số khác nhau khi sóng THz chiếu tới (góc tới khác nhau) mỗi cấu trúc cộng hưởng. Điều này tương ứng với hiệu ứng đa cộng hưởng khi mẫu bị uốn cong như trong tài liệu tham khảo [99-102].



Hình 4.13. Phổ hấp thụ mô phỏng MPA-2DP tích hợp vật liệu MoS_2 uốn cong với $R = 5000\ \mu\text{m}$, $1000\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$, và $100\ \mu\text{m}$.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

Luận án đã thiết kế và nghiên cứu mô phỏng cấu trúc MPA-2DP dựa trên vật liệu MoS_2 , có có khả năng thay đổi đặc tính cộng hưởng trong vùng tần số GHz-THz.

+ Trong vùng tần số GHz: Vật liệu thể hiện đặc tính hấp thụ dải rộng, với độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần số từ 10,1 đến 17,6 GHz. Khi vật liệu bị uốn cong, độ rộng phổ hấp thụ được tăng lên đáng kể.

+ Trong vùng tần số THz: đặc tính cộng hưởng đơn đỉnh hoặc đa đỉnh của mẫu MPA-2DP tích hợp MoS_2 có thể đạt được dựa trên điều chỉnh độ cong của mẫu từ $100\text{-}5000\ \mu\text{m}$. Các đỉnh hấp thụ mới đạt được giá trị độ hấp thụ trên 90% trên cùng dải tần số hoạt động.

KẾT LUẬN CHUNG

Luận án đã đạt được mục tiêu đề ra và thu được một số kết quả về nghiên cứu đặc tính hấp thụ đa dải tần dựa trên các cấu trúc MPA-2DP tích hợp một phần/toàn phần vật liệu plasmonic hai chiều (graphene và MoS_2):

(i) Đối với MPA-2DP tích hợp vật liệu graphene một phần dạng phần tử cộng hưởng được kích thích trực tiếp (D-MPA): tương tác trường gần (NF) giữa các cộng hưởng trực tiếp SRR và CS được khảo sát và đánh giá là mạnh tại khoảng cách $d = 0,5\text{mm}$ giữa chúng, kết quả mô phỏng và thực nghiệm xác nhận tương tác NF bị suy giảm khi tích hợp lớp một phần lớp vật liệu graphene có điện trở mặt tăng trong khoảng $7,2 \Omega/\text{sq.}$ đến $30 \Omega/\text{sq.}$ Hệ quả là độ hấp thụ duy trì trên 90% tại tần số tại tần số 6,8 GHz và độ hấp thụ suy giảm xuống dưới 60% tại 8,2 GHz và 8,8 GHz; MPA-2DP tích hợp vật liệu graphene một phần dạng I-MPA: tương tác NF mạnh tại khoảng cách $d = 0,4\text{mm}$ giữa các cộng hưởng SRR và CW, kết quả mô phỏng xác nhận các đỉnh hấp thụ sinh ra do tương tác NF bị ảnh hưởng mạnh xung quanh tần số 6,9 và 10,0 GHz, trong khi độ hấp thụ duy trì trên 90% tại 7,35 GHz khi giá trị điện trở mặt của lớp graphene tăng lên đến giá trị $30 \Omega/\text{sq.}$

(ii) Bên cạnh sự điều khiển linh hoạt tần số và biên độ hấp thụ do tương tác NF của các hệ D-/I-MPA ở trên, đặc tính plasmonic của graphene ảnh hưởng đến các cộng hưởng cơ bản/bậc cao đã được luận án khảo sát ở một số mô hình cấu trúc MPA-2DP tích hợp toàn phần qua biến dạng (uốn cong) trong vùng tần số GHz và mô hình điều khiển điện áp ngoài trong vùng tần số THz. Kết quả cho thấy, tại vùng tần số GHz, sự có mặt của lớp vật liệu graphene (tích hợp toàn phần/thay thế cho lớp kim loại cộng hưởng trên bề mặt) tạo ra tổn hao Ohmic giữ vai trò chính trong sự duy trì các đỉnh hấp thụ cao trên 90% cho các trường hợp bị biến dạng cong. Trên vùng tần số THz, đặc tính plasmonic của lớp graphene được điều khiển thông qua thế hóa học (từ 0,2 đến 1,0 eV) đã ảnh hưởng đến biên độ (độ hấp thụ giảm từ 95,1% đến 88,1%) và tần số hấp thụ (từ 170,6 đến 177,5 THz).

(iii) Một số cấu trúc MPA-2DP tích hợp toàn phần vật liệu MoS_2 đã được khảo sát qua khả năng thay đổi đặc tính cộng hưởng trong vùng tần số

GHz-THz. Trong vùng tần số GHz: Cấu trúc thể hiện đặc tính hấp thụ dải rộng, với độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần số từ 10,1 đến 17,6 GHz. Đặc trưng hấp thụ của vật liệu ở trạng thái uốn cong cho thấy độ rộng phổ hấp thụ được tăng lên đáng kể; Trong vùng tần số THz: đặc tính cộng hưởng đơn đỉnh hoặc đa đỉnh của mẫu MPA-2DP tích hợp MoS_2 có thể đạt được dựa trên điều chỉnh độ cong của mẫu từ 100-5000 μm . Các đỉnh hấp thụ mới được kích thích tại 2,01 THz (99,6%), 2,17 THz (98,6%) và 2,6 THz (90,6%) và 3,12 THz (90,5%).

CÁC HƯỚNG PHÁT TRIỂN NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN

Mặc dù hướng nghiên cứu cơ bản về các cấu trúc MPA-2DP kể trên đã đạt được các kết quả bước đầu quan trọng, tuy nhiên, trong giai đoạn nghiên cứu tiếp theo một số thách thức mới cần phải giải quyết trước khi sử dụng chúng trong các ứng dụng có thể kể đến bao gồm: Thiết kế cấu trúc để tăng số lượng dải tần số chọn lọc, cải thiện độ ổn định, tăng khả năng uốn dẻo và thu nhỏ kích thước ô cơ sở khi hoạt động ở tần số thấp; đánh giá đầy đủ về đặc tính cộng hưởng của cấu trúc dạng “lai hóa” khi tích hợp thêm các vật liệu tiên tiến/linh kiện điện tử vào bên trong cấu trúc MPA-2DP; Mở rộng khả năng điều khiển biên độ và pha sóng điện từ của MPA-2DP khi tích hợp với bộ chuyển đổi phân cực sóng điện từ.

Nghiên cứu ứng dụng MPA-2DP trong thời gian tới có thể kể đến như: chế tạo vật liệu biến hóa có khả năng che chắn sóng điện từ định hướng ứng dụng trong lĩnh vực quân sự và chăm sóc sức khỏe; Phát triển các cấu trúc tích trữ năng lượng sử dụng vật liệu biến hóa định hướng ứng dụng trong lĩnh vực thông tin liên lạc và năng lượng; Phát triển các thiết bị cảm biến, hệ thiết bị giám sát/điều khiển thông số môi trường tích hợp với vật liệu biến hóa, định hướng ứng dụng trong lĩnh vực nông nghiệp công nghệ cao và y sinh.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

*Tạp chí thuộc danh mục SCIE

1. **Man Hoai Nam**, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Duong Thi Ha, Nguyen Van Ngoc, Manh Cuong Tran, Dac Tuyen Le, Vu Dinh Lam, Liangyao Chen, Haiyu Zheng, YoungPak Lee, “Graphene-Integrated Plasmonic Metamaterial for Manipulation of Multi-Band Absorption, Based on Near-Field Coupled Resonators”. *Crystals*, **12**, 525, 2022.

2. **Man Hoai Nam**, Vu Thi Hong Hanh, Nguyen Ba Tuong, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Vu Dinh Lam, Liang Yao Chen and Young Pak Lee, “Multi-Band Electromagnetically-Induced-Transparency Metamaterial Based on the Near-Field Coupling of Asymmetric Split-Ring and Cut-Wire Resonators in the GHz Regime”. *Crystals*, **11**, 164, 2021.

3. Duong Thi Ha, **Man Hoai Nam**, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Vu Dinh Lam and Quynh-Le Van, “Ultra-broadband and flexible Metamaterial absorber based on MoS₂ cubes with Mie resonances”. *Journal of the Korean Physical Society*, Volume **82**, pages 1047–1054, (2023).

*Kỷ yếu Hội nghị Quốc gia

4. Dương Thị Hà, Boudthaly Vankham, Đỗ Thùy Chi, **Mẫn Hoài Nam**, Lê Thị Hồng Hiệp, Phạm Thanh Sơn, Bùi Sơn Tùng, Nguyễn Thanh Tùng, Vũ Đình Lâm và Bùi Xuân Khuyển, “Nghiên cứu mô phỏng vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ băng tần rộng dựa trên vật liệu plasmonic hai chiều MoS₂”. *Hội nghị Vật lý Chất rắn và Khoa học Vật liệu Toàn quốc – SPMS 2021*.

*Bài báo liên quan đăng trên Tạp chí Quốc gia (NCS là tác giả liên hệ bài báo)

5. Pham Van Dien, Mai Duc Toan, Pham Quang Tuyen, Vu Minh Tu, Vu Dinh Lam, Nguyen Anh Dung, **Man Hoai Nam**, and Tran Manh Cuong, “Multi-Element Unit Cell Metamaterial Absorber For The Ghz Frequency Applications”. *HNUE JOURNAL OF SCIENCE Natural Sciences 2023*, Volume **68**, Issue 3, pp. 26-33.