

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

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

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Nguyễn Hải Anh

**NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN ĐẶC TÍNH VÙNG CHIẾT
SUẤT ÂM DỰA TRÊN HIỆU ỨNG TƯƠNG TÁC
TRƯỜNG GẦN CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA KẾT HỢP
TÁC ĐỘNG NGOẠI VI**

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:

1. Người hướng dẫn 1: *PGS.TS. Nguyễn Thị Hiền, Trường Đại học Khoa học, Đại học Thái Nguyên*
2. Người hướng dẫn 2: *GS.TS. Vũ Đình Lâm, Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam*

Phản biện 1: PGS. TS. Nguyễn Hoàng Nam

Phản biện 2: PGS. TS. Trịnh Xuân Hoàng

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện
hợp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và
Công nghệ Việt Nam vào hồi, 9 giờ 00, ngày 22 tháng 12 năm 2025

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
2. Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Vật liệu biến hóa hay còn gọi là Metamaterial (MM) là vật liệu được sắp xếp và điều khiển cấu trúc một cách tuần hoàn (hoặc có thể không tuần hoàn), qua đó tạo thành các ô cơ sở có kích thước nhỏ hơn nhiều so với bước sóng hoạt động, có các tính chất mới chưa được tìm thấy trong tự nhiên cũng như chưa quan sát thấy trong các vật liệu tổ hợp trước đây. Vật liệu biến hóa chiết suất âm (Negative refractive index metamaterials/ NRI-MM) là một hướng nghiên cứu nổi bật trải dài xuyên suốt lịch sử nghiên cứu của MM. NRI-MM có khả năng đảo ngược cơ bản sự lan truyền của sóng điện từ, cho phép ánh sáng truyền theo hướng "ngược lại" tại các mặt phân cách và tạo ra những ứng dụng đặc biệt từ tàng hình cho đến thấu kính hoàn hảo vượt qua giới hạn nhiễu xạ.

Một trong những rào cản lớn nhất cho ứng dụng thực tế của NRI-MM là vùng tần số hoạt động hạn chế. Hiện tượng chiết suất âm phụ thuộc mạnh vào cộng hưởng của các cấu trúc MM, dẫn đến đáp ứng tần số có đỉnh nhọn với độ rộng băng thông điển hình chỉ xoay quanh 5-10% vùng tần số trung tâm. Bên cạnh sự hạn chế của băng tần, một thách thức phức tạp hơn nữa của NRI-MM là sự hạn chế trong khả năng điều khiển chủ động của vùng từ thẩm âm, chiết suất âm sau khi chế tạo. Muốn thay đổi tần số hoạt động hoặc độ lớn chiết suất âm, các nhà nghiên cứu buộc phải thiết kế lại và chế tạo lại toàn bộ cấu trúc, dẫn tới sự tốn kém và không khả thi cho ứng dụng thực tế. Bên cạnh việc mở rộng băng tần hoạt động của NRI, các nỗ lực tạo MM có khả năng điều khiển cũng gặp phải một số giới hạn nhất định như làm tăng tổn hao và giảm hiệu suất truyền qua chiết suất âm. Kết quả là hầu hết các thiết bị NRI-MM đều là băng hẹp, đơn chức năng và thụ động.

Để giải quyết những vấn đề này, các nhà nghiên cứu đã phát hiện hiệu ứng tương tác trường gần. Hiệu ứng này xảy ra khi các phần tử ở gần nhau, khiến cho các trường như điện trường và từ trường của chúng tương tác với nhau, từ đó làm suy biến các mode cộng hưởng cơ bản và tạo ra các mode cộng hưởng mới. Cụ thể tương tác trường gần sử dụng ở đây là hiệu

ứng lai hóa plasmon [13], [14], [15]. Tuy nhiên, phương pháp này có hạn chế là kém linh hoạt trong việc điều chỉnh. Bằng cách tích hợp các vật liệu thông minh, chúng ta có thể thay đổi được tương tác trường gần, từ đó điều khiển được độ rộng cũng như các đặc tính khác của vùng từ thẩm âm và chiết suất âm.

Tại thời điểm xây dựng đề cương của luận án Tiến sĩ năm 2022, hướng nghiên cứu về mở rộng bằng tương tác trường gần cũng như tích hợp các tác động ngoại vi để điều khiển vùng tần số hoạt động của vật liệu biến hóa chiết suất âm đang là hướng nghiên cứu được rất nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới quan tâm. Kế thừa quá trình nghiên cứu và phát triển của nhóm nghiên cứu tại Việt Nam cũng như xu hướng chung của thế giới, luận án của nghiên cứu sinh sẽ đi sâu vào nghiên cứu kết hợp giữa phương pháp lai hóa và điều khiển bằng tác động ngoại vi, từ đó điều khiển được các đặc tính của vùng từ thẩm âm và chiết suất âm, nhằm khắc phục các hạn chế trên.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Lựa chọn được hệ vật liệu có tính linh hoạt (như mềm dẻo, tính chất điện từ có thể điều khiển dựa trên các tác động ngoại vi), dễ tích hợp và có chi phí thấp, nhằm thay thế một phần hoặc toàn phần các thành phần vật liệu truyền thống trong MM, mà trọng tâm là các MM có vùng từ thẩm âm, chiết suất âm được hình thành dựa trên hiệu ứng tương tác trường gần. Việc tối ưu hóa hệ vật liệu này hướng tới điều chỉnh các tham số hoạt động quan trọng như tần số cộng hưởng, độ rộng dải, biên độ đáp ứng và hệ số phẩm chất trong vùng tần số GHz/THz.

Làm rõ cơ chế vật lý của hiệu ứng tương tác trường gần trong hệ vật liệu biến hóa khi chịu ảnh hưởng của tác động ngoại vi, từ đó đánh giá định lượng khả năng điều khiển đặc tính chiết suất âm và từ thẩm âm. Đồng thời, xác định ảnh hưởng của các yếu tố ngoại vi (nhiệt, điện) đến sự dịch chuyển tần số, sự biến đổi biên độ đáp ứng và khả năng mở rộng hoặc thu hẹp vùng chiết suất âm hình thành từ tương tác trường gần trong vùng tần số GHz/THz.

3. Nội dung nghiên cứu

Nghiên cứu tập trung vào việc điều khiển đặc tính vùng từ thẩm âm và chiết suất âm của vật liệu biến hóa thông qua (i) Khai thác hiệu ứng lai hóa plasmon (bậc 1 và bậc 2) để mở rộng vùng cộng hưởng (ii) Tích hợp các vật liệu chức năng (graphene, VO_2) vào cấu trúc để điều khiển chủ động bằng tác động ngoại vi (điện áp, nhiệt độ) (iii) Nghiên cứu cơ chế tương tác trường gần và ảnh hưởng của tổn hao điện môi, độ dẫn kim loại (iv) Thiết kế, mô phỏng, chế tạo và đo đạc các cấu trúc hoạt động trong vùng GHz và THz.

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Khoa học: Làm rõ bản chất vật lý của cơ chế lai hóa và điều khiển bằng tác động ngoại vi; xây dựng hệ thống lý thuyết về vật liệu biến hóa chiết suất âm có khả năng tái cấu hình.

Thực tiễn: Thiết kế được cấu trúc có băng thông mở rộng, điều khiển linh hoạt, hoạt động trong dải tần 5G/6G (252-321 GHz theo chuẩn IEEE 802.15.3d-2017), ứng dụng cho thiết bị viễn thông, ăng-ten tái cấu hình, cảm biến và y sinh học.

5. Những đóng góp mới

Luận án đã tập trung giải quyết các vấn đề về điều khiển đặc tính vùng chiết suất âm dựa trên hiệu ứng lai hóa của NRI-MM kết hợp tác động ngoại vi, bao gồm:

(i) Luận án đã làm rõ được bản chất điện từ cũng như cơ chế điều khiển bằng tác động ngoại vi điện dựa trên tích hợp graphene đối với NRI-MM lai hóa bậc I hoạt động ở vùng tần số THz. Hai cấu trúc được thiết kế có khả năng chuyển đổi giữa truyền qua chiết suất âm và phản xạ và khả năng chuyển đổi liên tục giữa truyền qua chiết suất dương và truyền qua chiết suất âm bằng cách thay đổi mức Fermi của graphene.

(ii) Luận án đã làm rõ được bản chất điện từ cũng như cơ chế điều khiển bằng tác động ngoại vi nhiệt dựa trên tích hợp VO_2 đối với NRI-MM lai hóa bậc I và bậc II hoạt động ở vùng tần số THz. Cấu trúc có khả năng điều khiển vùng từ thẩm âm, chiết suất âm và tạo ra đỉnh truyền qua chiết suất âm có độ lọc lựa sóng điện từ cao hoạt động trong vùng tần số 6G.

(iii) Luận án đã thiết kế, chế tạo thực nghiệm và đo đạc thành công cấu trúc vật liệu biến hóa từ thẩm âm và vật liệu biến hóa chiết suất âm lai hóa bậc II tích hợp mực in graphene, đồng thời đo đạc đặc tính điện từ và làm rõ cơ chế tương tác, điều khiển của cấu trúc đã chế tạo.

Bố cục của luận án

Luận án gồm có 145 trang, bao gồm phần mở đầu, 4 chương nội dung và kết luận

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẬT LIỆU BIẾN HÓA CHIẾT SUẤT ÂM

1.1. Giới thiệu chung về vật liệu biến hóa

1.1.1. Lịch sử hình thành và phát triển của vật liệu biến hóa

Khái niệm về vật liệu có chiết suất âm được đề xuất lần đầu tiên bởi nhà vật lý lý thuyết người Nga Victor Veselago vào năm 1967 [8]. Trong công trình nghiên cứu mang tính đột phá của mình, Veselago đã dự đoán sự tồn tại của một loại vật liệu có cả độ điện thẩm và độ từ thẩm âm, dẫn đến chiết suất âm. Theo lý thuyết của ông, những vật liệu này sẽ thể hiện các tính chất quang học ngược lại so với các vật liệu thông thường như không khí hay thủy tinh. Tuy nhiên, ý tưởng của Veselago ban đầu không nhận được nhiều sự chú ý từ cộng đồng khoa học. Lý do chính là vì không có vật liệu tự nhiên nào được biết đến có cả độ điện thẩm và độ từ thẩm âm cùng lúc. Do đó, khái niệm này vẫn chỉ là lý thuyết trong suốt hơn 30 năm sau đó. Dựa trên nền tảng lý thuyết của Pendry, vào năm 2000, nhóm nghiên cứu của David R. Smith tại Đại học California, San Diego (UCSD) đã chế tạo thành công MM chiết suất âm đầu tiên [9]. Sau đó các lĩnh vực khác ứng dụng MM tiếp tục được khai phá như MM hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ (Metamaterial Perfect Absorber - MPA) [28], hiện tượng trong suốt cảm ứng điện từ (Electromagnetically Induced Transparency - EIT) ...

1.1.2. Các nguyên lý cơ bản trong nghiên cứu vật liệu biến hóa

Việc thiết kế ban đầu của MM dựa trên nền tảng của lý thuyết môi trường hiệu dụng (Effective Medium Theory - EMT). Khi nghiên cứu tương tác của bức xạ điện từ với vật chất, cần lưu ý rằng bước sóng ánh sáng vượt trội hàng trăm lần so với kích thước nguyên tử và khoảng cách liên nguyên tử. Do đó, ánh sáng không thể phân biệt từng nguyên tử riêng

lẻ, cho phép chúng ta mô hình hóa vật liệu thành một môi trường đồng nhất với hai tham số đặc trưng: hằng số điện môi (ϵ) và độ từ thẩm (μ).

Trong mô hình Maxwell-Garnett, độ điện thẩm hiệu dụng ϵ_{eff} của môi trường gồm: m môi trường hình cầu có độ điện thẩm của từng môi trường là ϵ_i được bao quanh bởi môi trường khác có độ điện thẩm ϵ_m . Khi sóng điện từ tương tác với vật liệu Meta, năng lượng được phân chia thành ba phần chính (bỏ qua nhiễu xạ và tán xạ) bao gồm phản phản xạ (R) xuất phát từ sự không tương thích trở kháng, phản hấp thụ (A) do tính chất nội tại của vật liệu và phần truyền qua (T).

1.2. Tổng quan về vật liệu biến hóa chiết suất âm

1.2.1. Vật liệu có độ điện thẩm âm

Trong tự nhiên, độ điện thẩm âm của các kim loại chỉ có thể được thu nhận ở tần số thấp hơn tần số plasma. Độ điện thẩm, ký hiệu là ϵ , của một vật liệu kim loại phụ thuộc vào tần số sóng điện từ, ω , chiều tới. Tuy nhiên, ở các tần số trong vùng hồng ngoại gần và thấp hơn, hàm số điện môi của kim loại trở thành ảo do tổn hao năng lượng lớn. Để thu được độ điện thẩm âm ở vùng tần số thấp, chẳng hạn như vùng sóng vi ba, nhà nghiên cứu Pendry đã đề xuất một mô hình lưới dây kim loại mỏng. Kết quả là, tần số plasma hiệu dụng mới được tạo ra bởi lưới dây kim loại mỏng bị đẩy lùi về phía vùng tần số thấp.

1.2.2. Vật liệu có độ từ thẩm âm

Hầu hết các vật liệu tự nhiên có độ từ thẩm dương, tức là chúng có khả năng bị từ hóa trong sự hiện diện của từ trường. Tuy nhiên, chỉ có một số ít vật liệu có độ từ thẩm âm, nghĩa là chúng phản ứng ngược lại với từ trường. Ở tần số thấp, các vật liệu này vẫn thể hiện tính chất từ, nhưng khi tần số tăng lên đến vùng GHz, những tính chất từ này thường bị dập tắt hoặc biến mất. Mặc dù không phải tất cả các vật liệu đều có tính chất từ như sắt, ni-ken hay coban, nhưng từ tính cũng có thể được tạo ra trong các vật liệu phi từ bằng cách kích thích các dòng điện tròn. Khi một dòng điện chạy qua một vòng dây, nó sẽ tạo ra một từ trường xung quanh vòng dây đó. Nếu ta cuộn dây thành một vòng tròn, từ trường sẽ tập trung ở giữa vòng dây và tạo thành một moment lưỡng cực từ. Hiện tượng này được gọi

là cảm ứng từ. Dựa trên nguyên lý này, một số cấu trúc có khả năng tạo ra độ từ thẩm âm đã được đề xuất, tiêu biểu như CWP và SRR.

1.2.3. Vật liệu biến hóa có chiết suất âm đơn và kép

Để đạt được môi trường chiết suất âm ($n' < 0$), ta cần thỏa mãn điều kiện như sau:

$$\mu' \varepsilon'' + \mu'' \varepsilon' < 0. \quad (1.12)$$

Điều kiện (1.12) cho thấy, chúng ta có thể phân chia vùng tần số có chiết suất âm thành hai vùng: chiết suất âm đơn và chiết suất âm kép. Trong vùng chiết suất âm kép, cả hai giá trị phần thực ε' và μ' đều có giá trị âm còn các giá trị phần ảo (ε'', μ'') luôn là dương. Vùng chiết suất âm đơn đạt được khi chỉ có một trong hai giá trị âm của ε' hoặc μ' , các giá trị phần ảo (ε'', μ'') trong trường hợp này cần có giá trị dương rất lớn để thỏa mãn điều kiện (1.12).

1.3. Mô hình lai hóa và cơ chế mở rộng vùng chiết suất âm sử dụng mô hình lai hóa

1.3.1. Cơ sở lý thuyết về lai hóa

Năm 2003, J. Halas và các cộng sự đã trình bày một mô hình lai hóa để mô tả đáp ứng plasmon của các cấu trúc nano phức tạp [49]. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng các mode cộng hưởng của một hệ thống kim loại nano phức tạp có thể được hiểu như là kết quả tương tác hoặc lai hóa của các cấu trúc hình học thành phần. Lý thuyết lai hóa cung cấp một cách tiếp cận khái niệm đơn giản để thiết kế các cấu trúc nano với cộng hưởng plasmon mong muốn. Kết quả nghiên cứu của Halas cho thấy các tần số cộng hưởng Plasmon mới của hệ phức hợp được tạo ra ($|\omega_+|, |\omega_-|, |\omega_{+,cs}^+|, |\omega_{+,cs}^-|, |\omega_{-,cs}^+|, |\omega_{-,cs}^-|$) từ sự suy biến dẫn đến tách các mức năng lượng cộng

hưởng Plasmon cơ bản $(\omega_{sp} = \frac{\omega_B}{\sqrt{3}}, \quad \omega_{sp} = \sqrt{\frac{2}{3}} \omega_B \quad ,$

$\omega_{+,NS1}, \omega_{-,NS1}, \omega_{+,NS2}, \omega_{-,NS2}$).

1.3.2. Mô hình lai hóa bậc một

Như đã đề cập ở trên, cấu trúc CWP được biết đến như là một “nguyên tử từ” giúp tạo ra độ từ thẩm âm. Bên cạnh cộng hưởng từ, các cấu trúc CWP cũng thể hiện một cộng hưởng điện nhưng nằm tại tần số

khác. Mode ứng với sự phân bố trường đối xứng trong không gian gọi là mode đối xứng, có tần số riêng $|\omega_+ \rangle$. Ngược lại, mode bất đối xứng ứng với sự phân bố bất đối xứng của trường có tần số riêng $|\omega_- \rangle$. Ở đây, mode bất đối xứng $|\omega_- \rangle$ được cảm ứng bởi lực hút sinh ra do các dao động ngược pha của các điện tích nên nó sẽ nằm ở mức năng lượng thấp hơn, còn các mode đối xứng $|\omega_+ \rangle$ ứng với lực đẩy do các dao động cùng pha và nó sẽ nằm ở tần số cao với mức năng lượng cao hơn

1.3.3. Mô hình lai hóa bậc cao

Tương tự như vậy, đối với lai hóa bậc 2 và bậc 3, khi các phân tử đã lai hóa bậc một tiếp tục tương tác với các phân tử khác hoặc với nhau, chúng tạo ra các chế độ cộng hưởng phức tạp hơn.

1.4. Điều khiển vùng từ thẩm âm, chiết suất âm của vật liệu biến hóa bằng tác động ngoại vi

Vùng có chiết suất âm thường rất hẹp và phụ thuộc vào sự phân cực của sóng điện từ. Việc điều khiển đặc tính chiết suất âm thực chất là điều khiển hai đại lượng độ từ thẩm và độ điện thẩm. Vì vậy, một trong các hướng thu hút rất nhiều sự quan tâm nghiên cứu là dùng các tác động ngoại vi (như nhiệt, điện, quang, từ...) để điều khiển các tính chất điện từ của MM, bằng cách này có thể điều khiển được vùng tần số cộng hưởng của MM theo yêu cầu.

1.4.1. Điều khiển đặc tính vùng từ thẩm âm và chiết suất âm bằng tác động ngoại vi nhiệt

Khi nhiệt độ tăng lên, VO_2 chuyển pha từ trạng thái cách điện sang trạng thái kim loại, với độ dẫn điện tăng dần. Quá trình này làm ngắn mạch các khe hở của SRR, dần dần làm mất đi khả năng cộng hưởng từ của cấu trúc. Với InSb, Khi nhiệt độ tăng, mật độ hạt tải trong InSb tăng lên theo công thức thực nghiệm. Sự gia tăng mật độ hạt tải này dẫn đến giảm độ tự cảm động học của cấu trúc, được biểu diễn bằng công thức $L_{mk} = \frac{\pi m^*}{2t_m N e^2}$, trong đó N là mật độ hạt tải. Độ tự cảm động học giảm làm tăng tần số cộng hưởng từ gốc và tăng hiệu quả của lai hóa bậc hai giữa các mode cộng hưởng từ.

1.4.2. Điều khiển đặc tính vùng từ thẩm âm và chiết suất âm bằng tác động ngoại vi điện trường

Bên cạnh việc điều khiển vùng có độ từ thẩm âm, chiết suất âm bằng kích thích nhiệt như đã giới thiệu ở phần trên, tính chất này còn có thể được điều khiển bằng các kích thích điện trường hay từ trường khi kết hợp với tinh thể lỏng. Bằng việc tác động điện từ trường vào MM có chứa các tinh thể lỏng có trục quang học dị hướng, chúng ta có thể điều biến vùng có độ điện thẩm và từ thẩm để làm thay đổi các hiện tượng điện từ.

1.4.3. Điều khiển đặc tính vùng từ thẩm âm và chiết suất âm bằng tác động ngoại vi từ trường

Tương tự như điều khiển vùng tần số có độ từ thẩm âm của vòng cộng hưởng có rãnh bởi điện trường ngoài, vùng này cũng có thể được điều khiển bằng từ trường ngoài bằng cách thêm vật liệu sắt từ vào trong cấu trúc.

1.4.4. Điều khiển đặc tính vùng từ thẩm âm và chiết suất âm bằng tác động ngoại vi điện

Nghiên cứu của Xia Zhang và cộng sự [64] chứng minh khả năng điều khiển chủ động chiết suất âm thông qua việc thay đổi điện thế đặt lên graphene. Điểm đột phá của công trình là khả năng điều khiển tính chiết suất âm của vật liệu bằng cách thay đổi điện thế đặt lên lớp graphene.

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

2.1.1. Phương pháp mô phỏng

Phương pháp mô phỏng sử dụng phần mềm CST còn cung cấp các hiểu biết về sự tương tác của MM với sóng điện từ một cách cụ thể – điều rất khó để thực hiện và biểu diễn bằng thực nghiệm. CST giúp thể hiện rõ ràng sự phân bố của điện trường và từ trường xung quanh cấu trúc, từ đó làm rõ cách thức tương tác với sóng điện từ và cơ chế hấp thụ sóng của vật liệu, đồng thời cũng cho phép xác định dòng điện bề mặt để phân tích bản chất cộng hưởng của cấu trúc.

2.1.2. Phương pháp tính toán

Năm 1970, các thông số của vật liệu như chiết suất, hệ số điện môi, độ từ thẩm và trở kháng được tính toán dưới dạng phức dựa trên các dữ liệu về độ phản xạ và truyền qua bằng phương pháp Nicholson-Ross-Weir. Cho tới năm 2004, dựa trên cơ sở đó, X. Chen và đồng nghiệp đã đưa ra một phương pháp tính cải tiến hơn để tính toán các tham số điện từ đối với MM, cho phép xác định các tham số điện từ thông qua các tham số tán xạ và pha của MM [73]. Trong lĩnh vực nghiên cứu MMs, tương tác giữa sóng điện từ với cấu trúc vật liệu thường tạo ra các cộng hưởng điện từ, mà tại đó xuất hiện các tính chất độc lạ của vật liệu. Các tính chất điện từ này hoàn toàn có thể dự đoán và giải thích được thông qua mô hình mạch điện tương đương LC. Từ mô hình LC, ta hoàn toàn có thể tính toán được sự phụ thuộc các tần số cộng hưởng điện từ vào các tham số cấu trúc, từ đó tính được chính xác các tần số này ứng với một cấu trúc xác định nào đó.

2.2. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm

2.2.1. Phương pháp chế tạo thực nghiệm

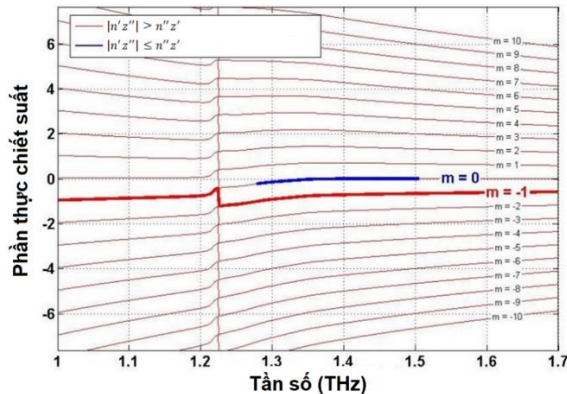
Để chế tạo MM nói chung và NRI-MM nói riêng hoạt động trong dải tần số GHz, người ta thường áp dụng công nghệ quang khắc. Kỹ thuật quang khắc hoạt động theo nguyên lý sử dụng ánh sáng để thay đổi tính chất của lớp vật liệu cảm quang được phủ lên bề mặt, từ đó tạo ra hình ảnh mong muốn.

2.2.2. Phương pháp đo đặc thực nghiệm tham số tán xạ

Thông thường, để phân tích các đặc tính vật liệu như phổ truyền qua và phản xạ, ta có thể sử dụng hệ thống đo Vector Network Analyzer được đặt tại Viện Khoa học Vật liệu – Viện Hàn Lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Hệ thống thiết bị bao gồm hai ăng ten, trong đó một ăng ten vừa phát vừa thu tín hiệu phản xạ, và ăng ten còn lại thu tín hiệu truyền qua.

CHƯƠNG 3. ĐIỀU KHIỂN ĐẶC TÍNH ĐIỆN TỪ VÙNG TỪ THẨM ÂM, CHIẾT SUẤT ÂM CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA DỰA TRÊN LAI HÓA BẬC 1

3.1 Kết quả nghiên cứu tính toán xác định các tham số điện từ của vật liệu biến hóa có cấu trúc lưới đĩa kim loại



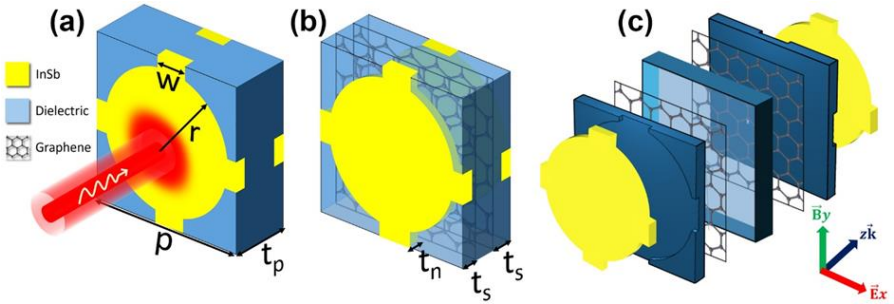
Hình 3.3. Phần thực của chiết suất tương ứng với các nhánh

Để nghiên cứu và điều khiển các đặc tính vùng từ thẩm âm và chiết suất âm, việc xác định chính xác các tham số điện từ hiệu dụng như độ điện thẩm (ϵ), độ từ thẩm (μ), chiết suất (n) và trở kháng (z) là vô cùng quan trọng. Luận án đã áp dụng phương pháp truy hồi của Chen và cộng sự để tính toán các tham số này từ dữ liệu mô phỏng về hệ số truyền qua (S_{21}), hệ số phản xạ (S_{11}) và pha. Đặc biệt, nghiên cứu đã làm rõ quy trình xác định chỉ số nhánh m trong công thức tính chiết suất - một bước quan trọng để đảm bảo tính liên tục và chính xác của giá trị chiết suất theo tần số. Kết quả tính toán cho cấu trúc lưới đĩa kim loại InSb cho thấy vùng cộng hưởng từ xuất hiện xung quanh 1,25 THz và vùng chiết suất âm kếp trong khoảng 1,25-1,35 THz do sự chồng chập của vùng điện thẩm âm và từ thẩm âm. Phương pháp tính toán này đã được sử dụng làm cơ sở cho toàn bộ các nghiên cứu tiếp theo trong luận án.

3.2. Điều khiển đặc tính vùng từ thẩm âm, chiết suất âm của cấu trúc vật liệu biến hóa lai hóa bậc I hoạt động vùng THz tích hợp graphene

3.2.1. Thiết kế mô phỏng cấu trúc vật liệu biến hóa

Hình 3.7(a) và 3.7(b) minh họa sơ đồ biểu diễn ô cơ sở của cấu trúc lưới đĩa có chiết suất âm được tích hợp graphene. MM có cấu trúc dạng lưới đĩa, gồm các đĩa tròn được kết nối bởi các dây liên tục theo dạng lưới. MM này được chế tạo bằng cách sử dụng hai cấu trúc lưới đĩa bán dẫn InSb làm thành phần kim loại. Trong lĩnh vực nghiên cứu chiết suất âm có thể điều chỉnh, InSb nổi bật như một vật liệu rất phù hợp vì một nhiều lý do, điển hình là khả năng kiểm soát linh hoạt nồng độ hạt tải thông qua nhiệt độ.

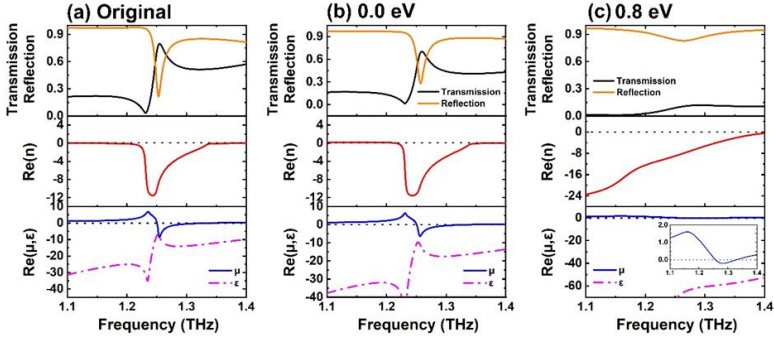


Hình 3.7. (a) Ô cơ sở của cấu trúc lưới đĩa kim loại và các tham số cấu trúc của nó (b) Ô cơ sở của cấu trúc lưới đĩa kim loại tích hợp graphene (c) Các thành phần cấu thành của cấu trúc lưới đĩa kim loại tích hợp graphene

3.2.2. Kết quả mô phỏng đặc trưng điện từ của vật liệu biến hóa

Cấu trúc MM đề xuất của chúng tôi thể hiện khả năng chuyển đổi giữa các trạng thái truyền qua và phản xạ trong khi duy trì chiết suất âm. Bên cạnh đó, tương tác của cấu trúc MM với bức xạ điện từ nằm trong dải tần số THz có thể được điều khiển thông qua việc điều chỉnh mức thể hóa học của graphene, từ đó tạo ra sự chuyển tiếp liên tục giữa các trạng thái truyền qua và phản xạ của sóng điện từ trong khi vẫn đảm bảo tính chất chiết suất âm của vật liệu.

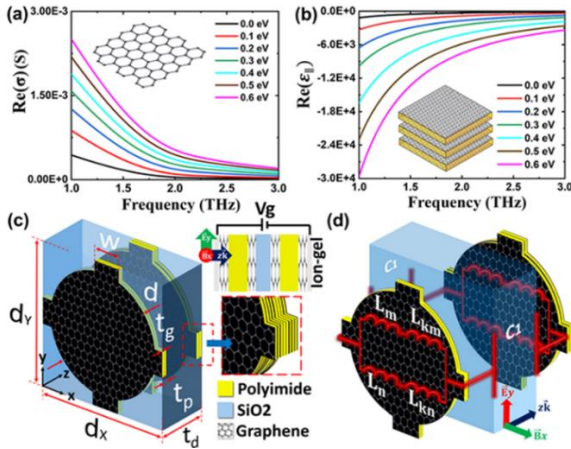
Phổ truyền qua và phần thực của chiết suất, độ từ thẩm và độ điện thẩm của cấu trúc lưới đĩa tích hợp graphene được mô tả trong Hình 3.10(b) và 3.10(c) cho hai giá trị năng lượng Fermi khác nhau là 0,0 eV và 0,8 eV, tương ứng. Việc bổ sung một tấm graphene với năng lượng Fermi 0,0 eV [Hình 3.10(b)] vào mẫu cấu trúc ban đầu dẫn đến sự giảm độ truyền qua của chiết suất âm (từ 0,80 xuống 0,70), cho thấy sự suy giảm của đặc tính chiết suất âm



Hình 3.10. Phổ truyền qua mô phỏng và phần thực của chiết suất, độ từ thẩm và độ điện thẩm được trích xuất của (a) cấu trúc lưới đĩa kim loại; cấu trúc lưới đĩa kim loại tích hợp graphene với (b) $EF = 0 \text{ eV}$ (c) và $EF = 0,8 \text{ eV}$

3.3. Điều khiển đặc tính điện từ vùng từ thẩm âm, chiết suất âm của vật liệu biến hóa tích hợp graphene thay thế thành phần kim loại dựa trên lai hoá bậc 1

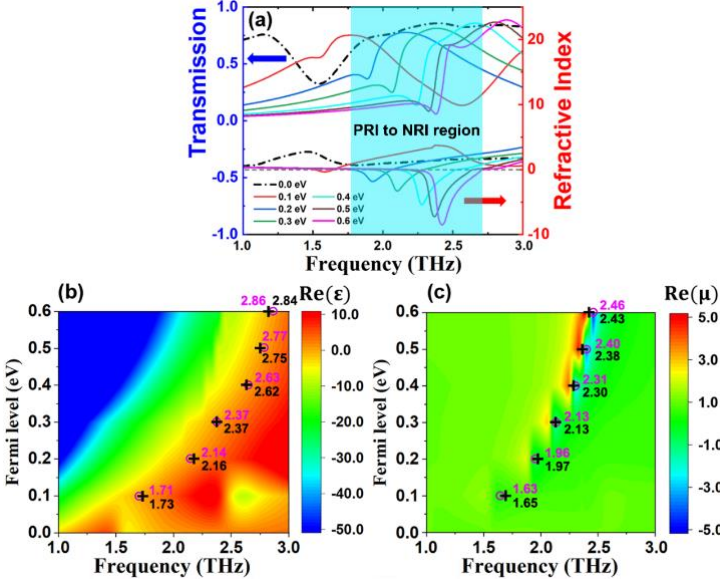
3.3.1. Thiết kế mô phỏng cấu trúc vật liệu biến hóa



Hình 3.19. (a) Phần thực của độ dẫn bề mặt của graphene từ 0,0 eV đến 0,6 eV (b) phần thực của hằng số điện môi trong mặt phẳng của composite graphene (c) ô cơ sở của MMHGC với các thông số hình học và thành phần cấu thành của nó và (d) mạch LC tương đương của MMHGC.

Cấu trúc MM tích hợp graphene (Metamaterial based on a hyperbolic-graphene composite - MMHGC) hoạt động trong vùng tần số THz với khả năng chuyển đổi chủ động giữa chiết suất âm (NRI) và chiết suất dương (positive refractive index - PRI) trên một dải tần số rộng, với đa lớp graphene đóng vai trò trực tiếp làm thành phần kim loại. Hình 3.19(c) trình bày biểu diễn ba chiều của ô cơ sở của cấu trúc MMHGC đề xuất. Thiết kế bao gồm composite graphene hai lớp (GC) trong cấu trúc dishnet thể hiện các tính chất kim loại [119], tất cả được đặt trong ma trận điện môi với $\varepsilon_d = 3.9$ và $\mu_d = 1.0$, tạo ra cấu trúc sandwich composite-composite nhiều lớp.

3.2.2. Kết quả mô phỏng đặc trưng điện từ của vật liệu biến hóa



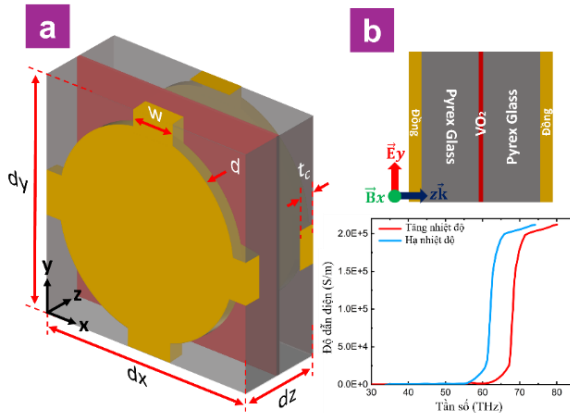
Hình 3.20. (a) Phổ truyền qua và phần thực của chiết suất $[Re(n)]$ của MMHGC tương ứng với các mức Fermi khác nhau, phần thực của (b) hằng số điện môi và (c) độ từ thẩm của MMHGC tương ứng với các mức Fermi khác nhau

Khi mức Fermi bằng 0,0 eV, dải truyền qua nằm trong vùng tần số từ 1,0 đến 3,0 THz. Trong trường hợp này, cả thành phần thực của độ từ thẩm (μ) và hằng số điện môi (ϵ) đều mang giá trị dương, thể hiện đặc tính truyền qua chiết suất dương (PRI) của vật liệu. Khi mức Fermi được nâng lên 0,1 eV, đỉnh truyền qua ban đầu chuyển thành âm 1,59 THz. Điều này được thể hiện bởi sự giảm xuống dưới mức không của chỉ số chiết suất. Tăng mức Fermi từ 0,2 đến 0,6 eV thay đổi phổ truyền qua, thể hiện hành vi chiết suất âm (NRI). Hơn nữa, thông qua Hình 3.20(b) và 3.20(c), với mức Fermi cao hơn, đỉnh truyền qua dịch chuyển về phía tần số cao hơn, phù hợp với xu hướng quan sát thấy trong phổ $\text{Re}(n)$, ϵ , μ và tần số.

3.4. Điều khiển đặc tính điện từ vùng từ thẩm âm, chiết suất âm của vật liệu biến hóa tích hợp VO_2 dựa trên lai hoá bậc 1

3.4.1. Thiết kế mô phỏng cấu trúc vật liệu biến hóa

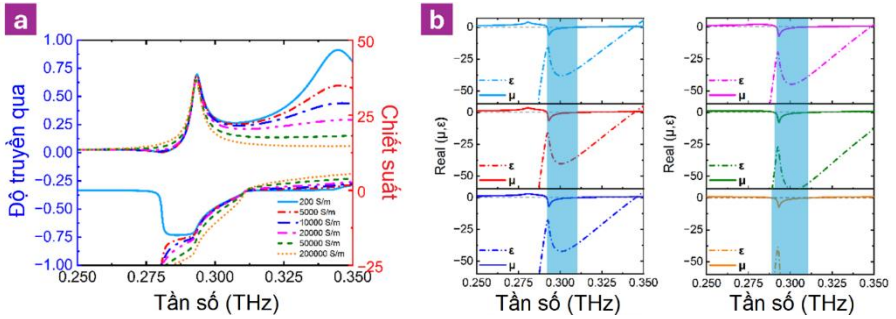
Chúng tôi trình bày một cấu trúc NRI-MM sử dụng VO_2 hoạt động trong dải tần THz. Cấu trúc MM-NRI trong Hình 3.17 được thiết kế dạng lưới đĩa sử dụng đồng làm thành phần kim loại (độ dẫn điện $5,96 \times 10^7 \text{ S/m}$, độ dày $30 \mu\text{m}$) và được chế tạo trên đế điện môi Pyrex glass với hằng số điện môi là $0,1448 \text{ S/m}$



Hình 3.23. (a) Cấu trúc vật liệu biến hóa dạng lưới đĩa tích hợp VO_2 với các tham số cấu trúc tối ưu (b) Mặt cắt của cấu trúc vật liệu biến hóa dạng lưới đĩa và sự phụ thuộc của độ dẫn điện VO_2 theo nhiệt độ

3.4.2. Kết quả mô phỏng đặc trưng điện từ của vật liệu biến hóa

Hình 3.24 thể hiện sự biến đổi đáng chú ý của đáp ứng điện từ trong cấu trúc MM khi vật liệu trải qua quá trình chuyển pha điện môi-kim loại. Quan sát phổ truyền qua của cấu trúc MM tại Hình 3.24(a) cho thấy tính ổn định đáng chú ý của vùng truyền qua chiết suất âm, với độ truyền qua duy trì khoảng 70% tại tần số 0,293 THz trong suốt quá trình VO_2 chuyển từ pha điện môi sang pha kim loại. Sự ổn định này tương phản rõ rệt với sự suy giảm mạnh mẽ được quan sát trong vùng truyền qua chiết suất dương ở tần số cao hơn với đỉnh truyền qua PRI trải qua sự suy giảm nghiêm trọng từ trên 90% xuống gần như bằng không. Đáp ứng bất đối xứng giữa hai đỉnh truyền qua này giúp cấu trúc MM đạt được tính chọn lọc tần số cao tại vùng chiết suất âm kép.

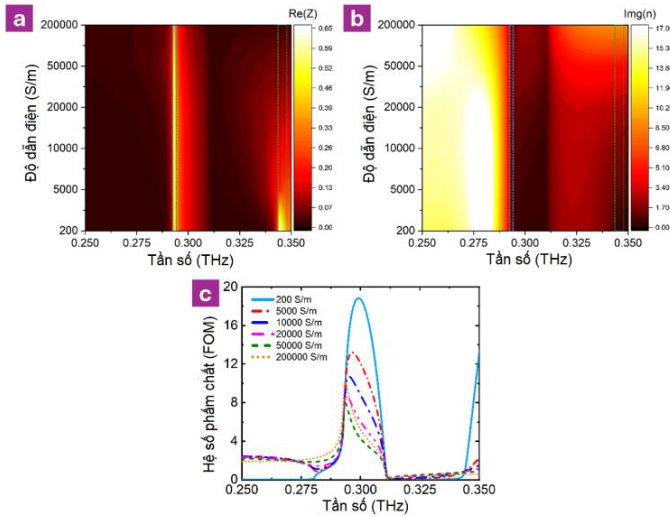


Hình 3.24. Phổ truyền qua, chiết suất và (b) các tham số hiệu dụng và vùng chiết suất âm kép ($D-NRI$) (màu xanh) của cấu trúc vật liệu biến hóa theo tần số với các giá trị độ dẫn điện của VO_2 khác nhau

Phần thực của trở kháng trong Hình 3.25(a) thể hiện sự thay đổi của điều kiện phối hợp trở kháng khi độ dẫn điện VO_2 tăng từ 200 S/m lên

200.000 S/m. Một vùng phối hợp trở kháng được xác định rõ ràng xung quanh tần số 0,293 THz, tương ứng đỉnh truyền qua NRI.

Đáng chú ý, điều kiện phối hợp trở kháng tại vùng tần số này duy trì ổn định và hầu như không thay đổi trong suốt toàn bộ quá trình chuyển pha, phù hợp với hiện tượng quan sát được của đỉnh NRI. Ngược lại, với vùng tần số cao PRI, đặc biệt là xung quanh đỉnh truyền qua PRI tại 0,346 THz cho thấy những thay đổi lớn trong sự phối hợp trở kháng, chuyển từ trạng thái phối hợp tốt ở độ dẫn điện thấp sang gần như không phối hợp (xấp xỉ bằng không) ở các giá trị độ dẫn điện cao. Sự mất phối hợp trở kháng ở tần số cao hơn trong khi bảo toàn nó ở tần số NRI giải thích cơ chế đẳng sau truyền qua chọn lọc tần số được quan sát trong Hình 3.24.



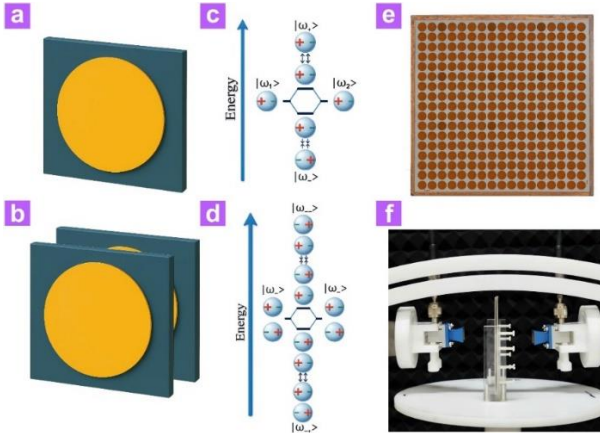
Hình 3.25. (a) Phần thực của trở kháng, (b) Phần ảo của chiết suất và (c) Hệ số phẩm chất (FOM) của cấu trúc vật liệu biến hóa theo tần số với giá trị độ dẫn điện của VO_2 khác nhau

CHƯƠNG 4. ĐIỀU KHIỂN ĐẶC TÍNH ĐIỆN TỪ VÙNG TỬ THẨM ÂM, CHIẾT SUẤT ÂM CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA DỰA TRÊN LAI HÓA BẬC 1I

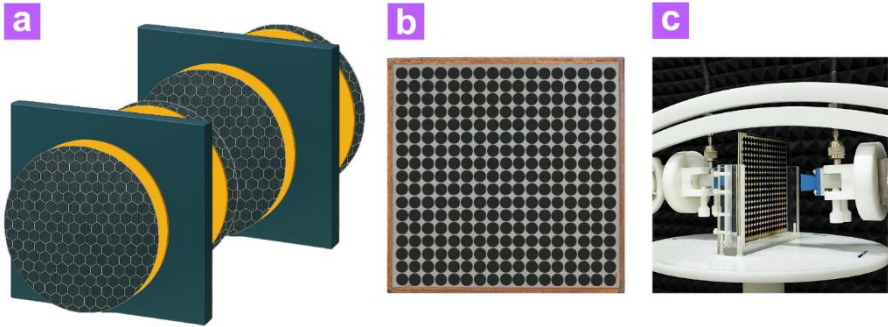
4.1. Điều khiển đặc tính điện từ vùng tử thẩm âm, chiết suất âm của vật liệu biến hóa dựa trên lai hóa bậc 1I hoạt động vùng GHz tích hợp mực in graphene

4.1.1. Thiết kế mô phỏng cấu trúc vật liệu biến hóa

Hình 4.1(a) và 4.1(b) minh họa ô cơ sở của cấu trúc cặp đĩa, tương ứng với cấu hình (a) một lớp và (b) hai lớp, vật liệu điện môi sử dụng là Roger RT6006. Hình 4.1(c) và 4.1(d) thể hiện sơ đồ lai hóa bậc một và bậc hai ứng với cấu hình một lớp và hai lớp đĩa tương ứng. Cuối cùng, mẫu thực nghiệm đã chế tạo cùng với hệ thống đo truyền qua được minh họa lần lượt tại Hình 4.1(e) và 4.1(f). Để hiện thực hóa ý tưởng điều khiển phổ truyền qua trong vùng tử thẩm âm nhờ hiệu ứng lai hóa, nghiên cứu tiến hành mô phỏng, chế tạo và đo đạc thực nghiệm với các lớp mực graphene có điện trở khác nhau, với độ dày cố định là $t_{ml} = 0,035 \text{ mm}$, được phủ trực tiếp lên lớp đồng của cấu trúc.



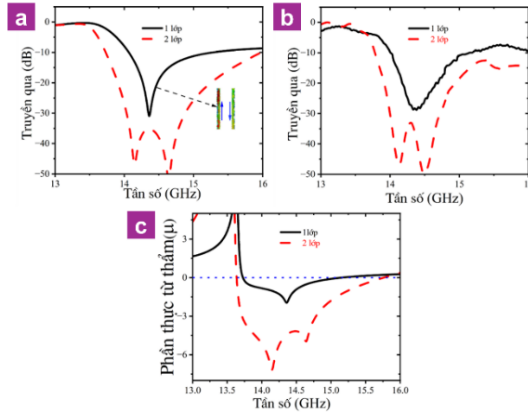
Hình 4.1. *Ô cơ sở của cấu trúc cặp đĩa a) một lớp và b) hai lớp; Giảm đồ lai hóa c) bậc 1 ứng với cấu trúc cặp đĩa một lớp; d) bậc 2 ứng với cấu trúc cặp đĩa hai lớp; e) mặt cắt ngang của cấu trúc cặp đĩa chế tạo được và f) thiết lập đo phổ truyền qua mẫu chế tạo*



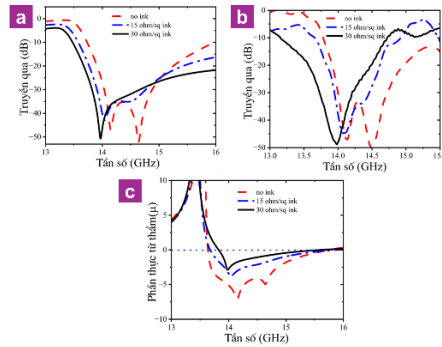
Hình 4.8. a) Ô cơ sở; b) mẫu chế tạo được và c) hình ảnh thiết lập phép đo phổ truyền qua của cấu trúc cặp đĩa hai lớp tích hợp mực dẫn graphene

Hình 4.8(a) minh họa ô cơ sở của hệ cộng hưởng hai lớp có tích hợp lớp dẫn điện mà không thay đổi các thông số thiết kế ban đầu; vật liệu nền vẫn là điện môi Roger RT6006. Trong đó, lớp graphene bao phủ hoàn toàn bề mặt kim loại như thể hiện trên Hình 4.8(a). Hình 4.8(b) trình bày mẫu cấu trúc thực tế đã được chế tạo có phủ lớp graphene, trong khi Hình 4.8(c) là hình ảnh thiết lập phép đo phổ truyền qua thu được từ mẫu này.

4.1.2. Kết quả mô phỏng đặc trưng điện từ của vật liệu biến hóa



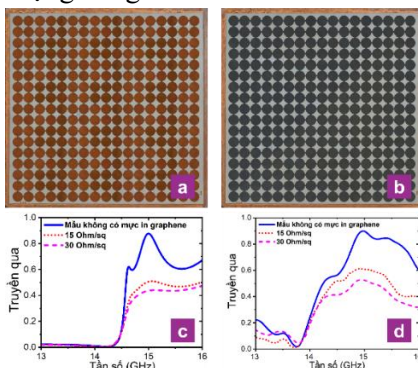
Hình 4.2. Phổ truyền qua a) mô phỏng, b) đo đạc và c) kết quả tính toán phân thực của độ từ thẩm cấu trúc cặp đĩa đề xuất 1 lớp và hai lớp



Hình 4.9. Phổ truyền qua a) mô phỏng b) đo đạc và c) tính toán độ từ thẩm của cấu trúc cặp đĩa 2 lớp không tích hợp và tích hợp mực dẫn graphene với điện trở khác nhau

Hình 4.2(a) thể hiện kết quả mô phỏng phổ truyền qua đối với hai cấu hình: một lớp và hai lớp. Theo đó, cấu trúc một lớp cho thấy sự xuất hiện của một dải cấm hẹp tại tần số 14,36 GHz. Khi chuyển sang cấu hình hai lớp, dải cấm này được mở rộng và phân tách thành hai đỉnh suy giảm rõ rệt tại các tần số 14,101 GHz và 14,623 GHz. Hình 4.2(b) trình bày các kết quả đo thực nghiệm tương ứng, cho thấy sự tương đồng cao với dữ liệu mô phỏng đã trình bày trong Hình 4.2(a), qua đó xác nhận độ chính xác của mô hình mô phỏng. Hình 4.9(a) và 4.9(b) lần lượt trình bày kết quả mô phỏng

và thực nghiệm phổ truyền qua trong hai trường hợp: cấu trúc không tích hợp lớp mực dẫn và có tích hợp lớp mực graphene với điện trở bề mặt thay đổi từ $15 \text{ } \Omega/\text{sq}$ đến $30 \text{ } \Omega/\text{sq}$. Quan sát cho thấy, xu hướng thay đổi trong cả hai kết quả là tương đồng – khi điện trở bề mặt của lớp graphene tăng lên, vùng không truyền qua tương ứng với vùng có từ thẩm âm trở nên hẹp hơn và độ suy giảm tín hiệu cũng giảm đi, cũng như hiệu ứng lai hóa giữa hai lớp cấu trúc giúp mở rộng vùng có từ thẩm âm.

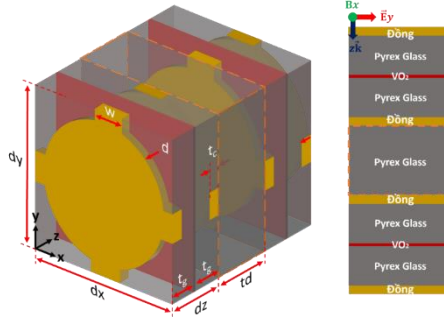


Hình 4.12. Ô cơ sở của cấu trúc lưới đĩa kim loại a) không phủ mực in và b) phủ mực in graphene; Phổ truyền qua c) mô phỏng và d) đo đạc của cấu trúc lưới đĩa kim loại không phủ mực in và phủ mực in với hai giá trị điện trở là $15 \text{ } \Omega/\text{sq}$ và $30 \text{ } \Omega/\text{sq}$

Sau khi phân tích cấu trúc cặp đĩa có độ từ thẩm âm, luận án tiếp tục khảo sát khả năng điều chỉnh vùng chiết suất âm thông qua cơ chế lai hóa bằng cách nghiên cứu cấu trúc lưới đĩa kim loại. Các lớp mực graphene được phủ trực tiếp lên lớp đồng của cấu trúc. Hình 4.12(a) và 4.12(b) lần lượt trình bày mẫu cấu trúc thực tế trong trường hợp không phủ và có phủ lớp graphene. Hình 4.12(c) và 4.12(d) tương ứng trình bày phổ truyền qua thu được từ mô phỏng và thực nghiệm cho các trường hợp trên. Kết quả cho thấy sự tương đồng cao giữa mô phỏng và thực nghiệm, với xu hướng biến đổi nhất quán: khi điện trở bề mặt của lớp graphene tăng lên, vùng truyền qua tương ứng với vùng có chiết suất âm (sẽ được chứng minh chi tiết ở Hình 4.13) bị suy giảm. Đáng chú ý, độ suy giảm tại đỉnh thứ hai (14,98 GHz) mạnh hơn đáng kể so với đỉnh thứ nhất (14,63 GHz).

4.2. Điều khiển đặc tính vùng từ thẩm âm, chiết suất âm của cấu trúc vật liệu biến hóa lai hóa bậc II hoạt động vùng THz tích hợp VO₂

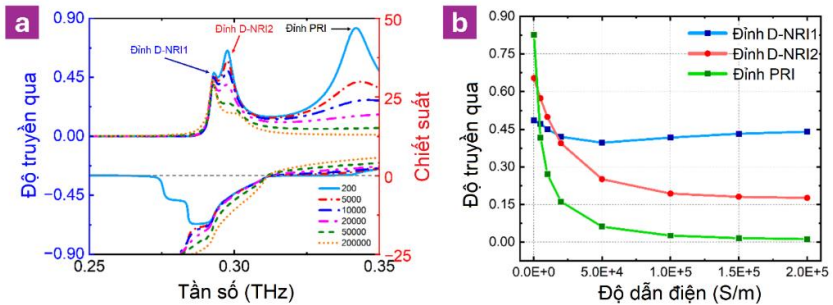
4.2.1. Thiết kế mô phỏng cấu trúc vật liệu biến hóa



Hình 4.14. Cấu trúc lưới đĩa lai hóa bậc 2 và mô hình mặt cắt của cấu trúc

Cấu trúc được đề xuất sử dụng cơ chế lai hóa plasmon bậc hai giữa 2 dimer lưới đĩa ngăn cách nhau bởi lớp Pyrex glass, trong đó mỗi dimer bao gồm một cặp lưới đĩa bằng đồng thiết kế đối xứng qua cũng qua một lớp điện môi Pyrex glass như Hình 4.14. Cấu hình đối xứng này rất cần thiết để đạt được cộng hưởng từ mạnh, như đã được chứng minh trong các nghiên cứu trước đây [18]. Việc tích hợp vanadium dioxide (VO₂) ở vị trí giữa của lớp Pyrex glass trong một trong các cấu trúc lưới đĩa tạo ra khả năng điều chỉnh linh hoạt thông qua quá trình chuyển pha điện môi-kim loại (metal-insulator phase transition/MIPT) khi thay đổi nhiệt độ [115], [132].

4.2.2. Kết quả mô phỏng đặc trưng điện từ của vật liệu biến hóa



Hình 4.15. a) Độ truyền qua và chiết suất và (b) Sự thay đổi độ truyền tại hai đỉnh D-NRI và PRI phụ thuộc theo độ dẫn điện của VO_2

Hình 4.15(a) chứng minh sự thay đổi của phổ truyền và chiết suất khi độ dẫn điện VO_2 tăng từ 200 S/m (pha điện môi) đến 200.000 S/m (pha kim loại). Cấu trúc thể hiện hai đỉnh chiết suất âm (NRI) riêng biệt tại 0,293 THz (Đỉnh D-NRI1) và 0,2977 THz (Đỉnh D-NRI2), cùng với một đỉnh chiết suất dương (Positive refractive index/PRI) tại 0,3418 THz. Hai đỉnh NRI này có nguồn gốc từ sự lai hóa giữa hai lớp lưới đĩa, tạo ra nhiều chế độ cộng hưởng trong dải tần mục tiêu. Hình 4.15(b) cho thấy độ truyền qua của mỗi đỉnh thể hiện các đáp ứng riêng biệt khi thay đổi nhiệt độ của VO_2

KẾT LUẬN

L luận án "Nghiên cứu điều khiển đặc tính vùng chiết suất âm dựa trên hiệu ứng tương tác trường gần của vật liệu biến hóa kết hợp tác động ngoại vi" đã hoàn thành các mục tiêu nghiên cứu với những đóng góp chính sau:

1. Lai hóa bậc 1 - Graphene tích hợp vào điện môi: Chứng minh khả năng chuyển đổi giữa chế độ truyền qua chiết suất âm và phản xạ tại 1,25 THz bằng điều chỉnh mức Fermi từ 0,0-1,0 eV. Độ truyền qua giảm từ 0,70 xuống 0,12 trong khi phản xạ tăng từ 0,28 lên 0,83. Cơ chế ổn định trong khoảng nhiệt độ 300K-400K.

2. Lai hóa bậc 1 - Graphene thay thế kim loại (MMHGC): Đạt được chuyển đổi chiết suất dương/âm trong dải 1,8-2,7 THz với độ truyền qua 70-85%. Tần số cộng hưởng từ dịch chuyển từ 2,0 THz lên 2,43 THz khi mức Fermi tăng từ 0,2-0,6 eV.

3. Lai hóa bậc 1 - VO_2 tích hợp: Duy trì đỉnh truyền qua chiết suất âm ổn định (~70%) tại 0,293 THz trong khi triệt tiêu đỉnh chiết suất dương (từ >90% xuống ~0%) khi độ dẫn điện VO_2 thay đổi từ 200-200.000 S/m. Đạt FOM ~50 với khả năng chọn lọc tần số cao.

4. Lai hóa bậc 2 - Mực in graphene (GHZ): Chế tạo và đo đạc thành công cấu trúc cặp đĩa hai lớp. Điều chỉnh vùng từ thẩm âm thông qua điện

trở bề mặt: hai đỉnh tại 14,101 GHz và 14,623 GHz hợp nhất thành một đỉnh tại 14,442 GHz khi điện trở tăng từ 0-30 Ω/sq .

5. Lai hóa bậc 2 – VO_2 (THz): Ba đỉnh cộng hưởng riêng biệt với đáp ứng khác nhau. Đỉnh D-NRI1 (0,293 THz) ổn định (0,42-0,48), đỉnh D-NRI2 (0,2977 THz) suy giảm (0,65 $\rightarrow$ 0,17), đỉnh chiết suất dương (0,3418 THz) triệt tiêu (0,82 $\rightarrow$ ~0) khi độ dẫn điện VO_2 tăng từ 200-200.000 S/m.

Ý nghĩa: Xây dựng cơ sở khoa học về cơ chế lai hóa plasmon và vai trò vật liệu chức năng trong điều khiển vùng từ thẩm âm/chiết suất âm, mở ra ứng dụng trong thiết bị THz tái cấu hình, cảm biến sinh học, truyền thông 5G/6G và quang điện tử tiên tiến.

KIẾN NGHỊ NHỮNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

1. Nghiên cứu ảnh hưởng của các tác động ngoại vi khác như áp suất, từ trường hoặc ánh sáng lên vùng chiết suất âm để tìm kiếm các phương thức điều khiển linh hoạt hơn.

2. Nghiên cứu thiết kế các cấu trúc hoạt động hiệu quả trong dải tần rộng hơn, hoặc có hệ số chất lượng cao hơn từ vùng GHz tới THz,

3. Nghiên cứu ứng dụng trí tuệ nhân tạo và học máy để tự động thiết kế, tối ưu hóa cấu trúc vật liệu biến hóa có đặc tính mong muốn và dự đoán hiệu suất trước khi chế tạo.

4. Phát triển phương pháp đo đặc tiêu chuẩn để có thể tính toán được các tham số hiệu dụng của mẫu vật liệu biến hóa chiết suất âm được chế tạo

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Hai Anh Nguyen**, Bui Son Tung, Xuan Ca Nguyen, Vu Dinh Lam, Nguyen Thi Hien, Bui Xuan Khuyen, “*Tunable dynamic metamaterial for negative refraction*”, Journal of Physics and Chemistry of Solids 186, 111804 (2024).

2. **Hai Anh Nguyen**, Thanh Son Pham, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Dac Tuyen Le, Hai Yen Vu, Dinh Lam Vu, Nguyen Thi Hien “*Metamaterials based on hyperbolic-graphene composite: A pathway from positive to negative refractive index at terahertz*”, Computational Materials Science 248, 113574 (2025).

3. **Hai Anh Nguyen**, Bui Xuan Khuyen, Bui Son Tung, Nguyen Thi Hien, Dinh Lam Vu, “*A comprehensive approach to retrieve effective properties in metamaterials*”, Vietnam Journal of Science and Technology (2025) (ACCEPTED)

4. **Nguyễn Hải Anh**, Phạm Thanh Sơn, Bùi Xuân Khuyển, Bùi Sơn Tùng, Lê Đức Tuyên, Phạm Minh Tân, Vũ Hải Yến, Lô Thị Huế, Vũ Đình Lâm, Nguyễn Thị Hiền, “*Phương pháp truy hồi đến kết quả tính toán các tham số trường điện từ của vật liệu biến hóa có chiết suất âm*”, Hội nghị Vật lý chất rắn và Khoa học vật liệu toàn quốc lần thứ 13 (SPMS 2023), 5-7/11, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam, Quyển 1, 263-268 (2023).