

SPMMS  
2023



SPMMS  
2023

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, 5 – 7/11/2023

# HỘI NGHỊ VẬT LÝ CHẤT RẮN VÀ KHOA HỌC VẬT LIỆU TOÀN QUỐC LẦN THỨ XIII

TUYỂN TẬP BÁO CÁO

QUYỂN 1



HỘI NGHỊ VẬT LÝ CHẤT RẮN  
VÀ KHOA HỌC VẬT LIỆU TOÀN QUỐC LẦN THỨ XIII

QUYỂN 1

ISBN: 978-604-471-702-9



9 786044 717029

SÁCH KHÔNG BÁN



NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI



# SPMS 2023

## HỘI NGHỊ VẬT LÝ CHẤT RẮN VÀ KHOA HỌC VẬT LIỆU TOÀN QUỐC LẦN THỨ XIII

**TUYỂN TẬP BÁO CÁO**

QUYỂN 1

NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI  
Tháng 10 năm 2023

## MỤC LỤC

HIGHLY EFFECTIVE ELECTROMAGNETIC WAVE ATTENUATION USING COMPOSITES MADE OF $\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ FERRITE AND POROUS CARBON BASED ON RICE HUSK, Pham Van Thin, Nguyen Thi Thanh, Nguyen Xuan Thau, Nguyen Van Tuan, Le Dinh Vi, Nguyen Tran Ha, Nguyen Vu Tung, Tran Quang Dat* .....	1
CẤU TRÚC, TÍNH CHẤT TỪ VÀ ĐÓT NÓNG CẢM ỨNG TRONG CÁC HẠT NANO LỖI/VỎ $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \text{Fe}_3\text{O}_4$ , Lê Thị Hồng Phong, Phạm Hồng Nam, Tạ Ngọc Bách, Phạm Thanh Phong, Ivan Skorvanek, Đỗ Hùng Mạnh* .....	7
TỐI ƯU VÀ MÔ HÌNH HÓA CÁC ĐIỀU KIỆN CHẾ TẠO HẠT NANO $\text{Fe}_3\text{O}_4$ BẰNG PHƯƠNG PHÁP RSM VÀ ANN-PSO, Vũ Đức Lân, Tạ Thị Kiều Hạnh, Nguyễn Phước Trung Hòa, Vũ Năng An, Võ Hoa Sơn, Lê Văn Hiếu .....	12
MAGNETIC AND MICROWAVE ABSORPTION PROPERTIES OF $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{SiO}_2$ NANOCOMPOSITES WITH CORE- SHELL STRUCTURE , Nguyen Anh Duc*, Tran Thi Viet Nga, Nguyen Van Quang and Nguyen Truong Giang .....	17
CHẾ TẠO VÀ NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA PHA TẠP ION Mo VÀO CÁC HẠT NANO $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , Đào Thị Thủy Nguyệt*, Lương Ngọc Anh, Nguyễn Phúc Dương .....	21
NGHIÊN CỨU CẤU TRÚC VÙNG LẶN CẬN CỦA HẠT NANO PHERIT ĐỒNG THÔNG QUA PHÂN TÍCH PHỔ EXAFS, Tô Thanh Loan*, Nguyễn Kim Thanh .....	26
MÔ PHÒNG ĐIỀU KHIỂN TÍNH CHẤT CỘNG HƯỞNG TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA NHẪM NÂNG CAO HIỆU SUẤT TRUYỀN NĂNG LƯỢNG KHÔNG DÂY, Bùi Hữu Nguyên*, Lê Đắc Tuyên, Tống Bá Tuấn, Nguyễn Thị Diệu Thu, Hồ Quỳnh Anh, Ngô Như Việt, Bùi Xuân Khuyển, Vũ Đình Lâm.....	31
HIỆU ỨNG THAY THẾ Bi LÊN TÍNH CHẤT ĐIỆN VÀ TÍNH CHẤT TỪ CỦA PEROVSKITE KÉP $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ CÓ KÍCH THƯỚC NANO MÉT, Đào Thị Thủy Nguyệt, Nguyễn Phúc Dương, Nguyễn Văn Quy, Lương Ngọc Anh* .....	35
ẢNH HƯỞNG CỦA PHƯƠNG PHÁP CHẾ TẠO VÀ CÁC ĐIỀU KIỆN CÔNG NGHỆ ĐẾN TÍNH CHẤT VẬT LIỆU NANO SIÊU THUẬN TỪ CẤU TRÚC SPINEL $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ , Lê Doãn Phúc, Ngô Thị Quỳnh Trang, Bùi Văn Việt, Phạm Tiến Thành, Hồ Thị Anh, Nguyễn Huy Tiệp, Phạm Đức Thắng, Lê Anh Tuấn, Nguyễn Thị Minh Hồng* .....	40
ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ DÀY LÊN TÍNH CHẤT CỦA VẬT LIỆU MÀNG BFO PHA TẠP ION $\text{Nd}^{3+}$ , Ngô Thu Hương.....	45
NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA PHA TẠP Gd ĐẾN HIỆU ỨNG SINH NHIỆT CỦA HỆ HẠT NANO $\text{CoGd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ , Nguyễn Trọng Hùng, Lưu Hữu Nguyên, Lê Thế Tâm, Nguyễn Hoài Nam, Phan Thị Hồng Tuyết, Phạm Thanh Phong, Phạm Hồng Nam* .....	49
ĐẶC TRƯNG MULTIFERROIC CỦA VẬT LIỆU NANO TỔ HỢP $0,8\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3-0,2\text{NiFe}_2\text{O}_4$ , Trần Đăng Thành*, Đào Sơn Lâm, Nguyễn Thị Việt Chinh, Đinh Chí Linh, Trần Bảo Trung, Phạm Hồng Nam, Đặng Đức Dũng .....	53
ẢNH HƯỞNG CỦA Na LÊN CHUYỂN PHA TỪ CỦA MANGANITE $\text{La}_{0,7}\text{Ca}_{0,3}\text{MnO}_3$ , Nguyễn Thị Dung, Nguyễn Thị Việt Chinh, Đinh Chí Linh, Đào Sơn Lâm, Nguyễn Thị Ngọc Anh, Đỗ Hùng Mạnh, Lê Việt Bái, Trần Đăng Thành* .....	58
NGHIÊN CỨU MÔ PHÒNG MỞ RỘNG VÙNG HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA BẰNG CÁCH THAY ĐỔI TÍNH ĐỐI XỨNG CỦA CẤU TRÚC Ô CƠ SỞ,	

METHOD, Nguyen Minh Ngoc, Luu Thi Lan Anh, Nguyen Kim Thanh, Nguyen Cong Tu*	255
FREE-DAMAGE PLASMA GAS-SANDWICHED GRAPHENE FOR FLEXIBLE DISPLAY AND PRESSURE SENSOR, Phuong V. Pham	260
PHƯƠNG PHÁP TRUY HỒI ĐẾN KẾT QUẢ TÍNH TOÁN CÁC THAM SỐ TRƯỜNG ĐIỆN TỬ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CÓ CHIẾT SUẤT ÂM, Nguyễn Hải Anh, Phạm Thanh Sơn, Bùi Xuân Khuyến, Bùi Sơn Tùng, Lê Đắc Tuyên, Phạm Minh Tân, Vũ Hải Yên, Lô Thị Huệ, Vũ Đình Lâm, Nguyễn Thị Hiền*	263
STUDY AND DESIGN OF A MINIATURIZED SUSPENSION SYSTEM FOR DISPLACEMENT ALONG Z-AXIS, Dang Van Hieu*, Tran Trong An, and Chu Manh Hoang	269
NGHIÊN CỨU TỔNG HỢP VẬT LIỆU $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ BẰNG PHƯƠNG PHÁP THỦY NHIỆT NHẪM ỨNG DỤNG CHO CẢM BIẾN KHÍ $\text{NO}_2$ , Lưu Hoàng Minh, Phạm Thị Thuỳ Thu, Trần Thị Quỳnh Hoa, Nguyễn Thị Hạnh, Đỗ Thị Thu Hạnh, Nguyễn Thị Thủy, Phạm Văn Tòng*	272
KHẢO SÁT TÍNH CHẤT MÀNG MỎNG $\text{MoO}_x$ ĐƯỢC CHẾ TẠO BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHÚN XẠ CATHODE, Đỗ Hồng Minh, Nguyễn Thành Long, Nguyễn Quang Hoà, Bùi Nguyên Quốc Trinh*	278
TỔNG HỢP VÀ NGHIÊN CỨU CÁC ĐẶC TRƯNG NHẠY KHÍ $\text{NH}_3$ Ở NHIỆT ĐỘ PHÒNG DỰA TRÊN CÁC MÀNG $\text{PANi}$ CẤU TRÚC NANO, Hoàng Thị Hiến, Bùi Hà Trung, Chu Văn Tuấn*, Hồ Trường Giang	282
FABRICATION OF PLASMONIC NANOSTRUCTURES BASED ON IMPRINTING PROCESS, Nguyen Quoc Chien, Nguyen Van Duong, Luu Thi Lan Anh, Vu Ngoc Hung, Chu Manh Hoang*	287
RE-EVALUATING THE VOLUME EFFECT IN DOUBLE-GATE TUNNEL FIELD EFFECT TRANSISTORS, Bui Huu Thai, Chun-Hsing Shih, Nguyen Dang Chien*	291
STUDY ON THE INFLUENCE OF AIR DAMPING ON SENSITIVITY OF ONE-AXIS ACCELEROMETER, Nguyen Van Cuong, Bui Manh Cuong, Chu Manh Hoang*	296
SỰ ẢNH HƯỞNG CHIỀU DÀY ĐỂ TỐI ĐỘ HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỬ THANG THz VÀ ỨNG DỤNG TRONG CẢM BIẾN, Phạm Văn Điện, Vũ Thị Ngọc Viện, Nguyễn Anh Dũng, Phạm Văn Hải, Nguyễn Thị Thúy, Trần Mạnh Cường	300
A GLUCOSE SENSOR BASED ON $\text{MoS}_2$ NANORODS FUNCTIONALIZED WITH Ag NANOPARTICLES, Vu Van Thu, Nguyen Dac Dien*, Phuong Dinh Tam, Hoang Lan, Nguyen Thi Nguyet, Nguyen Thi Thuy, Vu Thi Phuong Thuy	303
CẢM BIẾN KHÍ HYDRO HOẠT ĐỘNG Ở NHIỆT ĐỘ PHÒNG TRÊN CƠ SỞ TIẾP XÚC SCHOTTKY GIỮA MÀNG MỎNG $\text{SnO}_2$ VÀ Pt, Võ Thanh Đước*, Nguyễn Tùng Lâm, Trịnh Minh Ngọc, Chử Mạnh Hưng, Nguyễn Văn Toán, Nguyễn Văn Duy, Nguyễn Đức Hòa	310
TÍCH HỢP ESP32 VÀO BO MẠCH CHO CẢM BIẾN NDIR ĐO KHÍ $\text{CO}_2$ ĐỂ ỨNG DỤNG NỀN TẢNG IOT TRONG NUÔI TRỒNG NẤM ĂN, Phạm Duy Tân*, Đặng Tuấn Đạt*, Phạm Quang Ngân, Phạm Đình Tuấn, Nguyễn Ngọc Khải, Bùi Xuân Khuyến, Hồ Trường Giang, Vũ Đình Lâm	315

## PHƯƠNG PHÁP TRUY HỒI ĐẾN KẾT QUẢ TÍNH TOÁN CÁC THAM SỐ TRƯỜNG ĐIỆN TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA CÓ CHIẾT SUẤT ÂM

Nguyễn Hải Anh<sup>1,2</sup>, Phạm Thanh Sơn<sup>2</sup>, Bùi Xuân Khuyển<sup>2</sup>, Bùi Sơn Tùng<sup>2</sup>, Lê Đắc Tuyên<sup>3</sup>, Phạm Minh Tân<sup>4</sup>, Vũ Hải Yến<sup>5</sup>, Lô Thị Huế<sup>6</sup>, Vũ Đình Lâm<sup>1</sup>, Nguyễn Thị Hiền<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup>Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm KHCN Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội

<sup>2</sup>Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm KHCN Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội

<sup>3</sup>Trường Đại học Mỏ - Địa Chất, Từ Liêm, Hà Nội

<sup>4</sup>Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp Thái Nguyên, Tích Lương, Thái Nguyên

<sup>5</sup>Trường Đại học Công nghệ và Truyền thông Thái Nguyên, Quyết Thắng, Thái Nguyên

<sup>6</sup>Viện Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Khoa học Thái Nguyên, Thịnh Đán, Thái Nguyên

\*Email: [hiennt@tnus.edu.vn](mailto:hiennt@tnus.edu.vn)

### Tóm tắt:

Khi trường điện từ ngoài tác động lên vật liệu biến hóa (Metamaterials-MMs), chúng sẽ tương tác với các “phân tử” MMs và tạo ra các phản ứng điện từ khác biệt so với vật liệu thông thường. Các phản ứng vĩ mô và tính chất của MMs dưới tác động trường điện từ ngoài được thể hiện qua các tham số trường điện từ: chỉ số khúc xạ  $n$ , trở kháng  $z$ , độ từ thẩm  $\omega$  và độ điện thẩm  $\varepsilon$  của vật liệu. Các phương pháp nghiên cứu MMs hiện nay hầu hết đều không thu được trực tiếp các giá trị tham số trường điện từ. Vì vậy, nhiều phương pháp sử dụng thuật toán truy hồi được đề xuất để tính toán. Trong đó phương pháp theo đề xuất của X. Chen là một trong các cách tiếp cận hiệu quả nhất. Theo phương pháp này, các tham số trường điện từ được tính toán gián tiếp thông qua các thông số phản xạ, truyền qua và pha của chúng. Tuy nhiên, một trong những yếu tố quan trọng quyết định tính đúng đắn của kết quả là việc chọn giá trị của nhánh  $m$ . Trong báo cáo này, chúng tôi sẽ đưa ra cách xác định chính xác giá trị nhánh  $m$  trong vật liệu biến hóa chiết suất âm sử dụng cấu trúc fishnet có tích hợp graphene. Các kết quả này là tiền đề quan trọng cho các nghiên cứu về vật liệu biến hóa có chiết suất âm nói riêng cũng như vật liệu biến hóa nói chung.

**Từ khóa:** Vật liệu biến hóa, thuật toán truy hồi, tham số điện từ

### GIỚI THIỆU

Hiện nay, việc phát triển những loại vật liệu mới có giá thành thấp, đồng thời có các tính chất ưu việt nhằm thay thế vật liệu truyền thống là một nhu cầu cấp bách để đáp ứng sự phát triển mạnh mẽ trong lĩnh vực khoa học kỹ thuật. Vật liệu biến hóa (Metamaterials - MMs) là một lĩnh vực nghiên cứu đầy hứa hẹn và nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học trong những năm gần đây. Khác với vật liệu tự nhiên, MMs được cấu thành từ các thành phần riêng biệt với những cấu trúc cơ bản kết hợp cùng với nhau để tạo nên các “giả nguyên tử” (meta-atom) quyết định tính chất chung của cả khối vật liệu, với cấu trúc nhỏ hơn so với bước sóng của ánh sáng hoặc tín hiệu điện từ mà chúng tương tác. Khi sóng điện từ chiếu tới vật liệu biến hóa, nó sẽ tương tác với từng thành phần cấu trúc tạo nên vật liệu, gây ra sự di chuyển của các phân tử và tạo ra các mô men cảm ứng điện từ. Những mô men này trực tiếp ảnh hưởng đến độ điện thẩm và độ từ thẩm của toàn vật liệu. Do đó, các tính chất điện từ của vật liệu biến hóa hoàn toàn có thể được điều khiển thông qua việc sắp xếp vị trí và điều chỉnh các tham số

của các thành phần cấu tạo vật liệu, đồng thời cũng tạo ra những tính chất, hiện tượng không có trong vật liệu tự nhiên như tính chiết suất âm [1], nghịch đảo định luật Snell [2], nghịch đảo định luật Doppler [3], ... Với những đặc tính độc đáo trên, MMs mở ra những khả năng mới cho việc thiết kế các thiết bị và hệ thống có hiệu suất cao hơn so với các vật liệu tự nhiên, đồng thời tạo ra một loạt ứng dụng tiềm năng trong các lĩnh vực như quang học [4], điện từ [5–8], viễn thông [9,10] và sinh học [11,12]. Tuy nhiên, để nghiên cứu các ứng dụng này một cách hiệu quả, việc hiểu rõ và xác định các tham số điện từ của MMs là vô cùng quan trọng. Các tham số điện từ cơ bản như chiết suất  $n$ , trở kháng  $z$ , độ từ thẩm  $\mu$  và hằng số điện môi  $\varepsilon$  của MMs đóng vai trò then chốt trong việc mô tả và dự đoán tương tác điện từ của chúng dưới tác động của các trường điện từ bên ngoài. Đặc biệt, đối với vật liệu biến hóa chiết suất âm, giá trị độ điện thẩm, độ từ thẩm là yếu tố rất quan trọng để xác định vùng chiết suất âm. Tuy nhiên, việc đo và xác định trực tiếp các tham số này trong thực tế là một công việc rất phức tạp và khó khăn. Do đó, nhiều phương pháp tính toán gián tiếp đã được đề xuất để xác định các tham số

điện từ của MMs [13–15]. Trong đó, tính toán dựa trên thuật toán truy hồi của X. Chen là một trong những phương pháp tiêu biểu, cho phép xác định các tham số điện từ thông qua đặc tính phản xạ, truyền qua và pha của MMs [13]. Một trong những thách thức của phương pháp này là việc xác định chính xác giá trị nhánh  $m$  trong quá trình tính toán. Trong báo cáo này, chúng tôi tập trung vào việc giải quyết vấn đề này bằng cách đưa ra phương pháp xác định giá trị nhánh  $m$  nói chung cũng như áp dụng cho trường hợp cụ thể với vật liệu biến hoá chiết suất âm sử dụng cấu trúc fishnet tích hợp graphene.

### CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Năm 1970, phương pháp Nicholson-Ross-Weir [15] thường được sử dụng để tính toán các thông số (chiết suất, trở kháng, hệ số điện môi và độ từ thẩm) của một vật liệu dưới dạng phức thông qua dữ liệu phản xạ và truyền qua. Năm 2004, trên cơ sở đó, nhóm của X. Chen [13] đã đề xuất một phương pháp cải tiến hơn để tính toán các tham số điện từ áp dụng cho MMs. Trước khi đi vào chi tiết phương pháp tính toán, cần lưu ý một số vấn đề quan trọng. Thứ nhất, các tham số có dạng phức nhằm phản ánh bản chất vốn có của môi trường, vì vậy trong quá trình tính toán, ta cần đảm bảo các tham số này sẽ không vi phạm bất kỳ định luật vật lý nào. Trên thực tế, việc sử dụng các điều kiện vật lý sẽ cho phép ta giới hạn kết quả về 1 nghiệm duy nhất. Thứ hai, các tham số này phụ thuộc vào tần số và có thể nhận giá trị rất lớn khi gần vị trí cộng hưởng. Đặc điểm này của MMs sẽ khiến cho việc xác định chỉ số nhánh (giá trị cho biết số lượng các bước sóng truyền bên trong 1 bản vật liệu) trở nên phức tạp hơn.

Để xác định độ từ thẩm và độ điện thẩm, ta coi bản vật liệu biến hoá như một môi trường hiệu dụng đồng nhất. Trong trường hợp này, chiết suất, trở kháng, độ từ thẩm và độ điện thẩm có thể được truy hồi từ kết quả của các tham số tán xạ, bao gồm hệ số phản xạ  $S_{11}$ , hệ số truyền qua  $S_{21}$  và pha. Xét một sóng phẳng chiếu vuông góc lên một bản MMs đồng nhất có độ dày  $d$ , với góc tọa độ trùng với mặt phẳng đầu tiên của tấm, có  $S_{11}$  là hệ số phản xạ,  $S_{21}$  liên quan đến hệ số truyền qua T thông qua công thức  $S_{21} = Te^{ik_0d}$ , trong đó  $k_0$  là số sóng của sóng điện từ trong chân không. Theo phương pháp Nicholson-Ross-Weir (NRW), các tham số tán xạ liên hệ với chiết suất  $n$  và trở kháng  $z$  thông qua [15,16]:

$$S_{11} = \frac{R(1 - e^{i2nk_0d})}{1 - R^2 e^{i2nk_0d}} \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - R^2)e^{ink_0d}}{1 - R^2 e^{i2nk_0d}} \quad (2)$$

Với:  $R = z - 1/z + 1$ .

Từ [17,18], giá trị của trở kháng được truy hồi từ tham số tán xạ bằng cách tính ngược lại phương trình (1) và (2):

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (3)$$

$$e^{ink_0d} = X \pm i\sqrt{1 - X^2} \quad (4)$$

Với:  $X = 1/2S_{21}(1 - S_{11}^2 + S_{21}^2)$ . Trong phương trình (3), dấu  $\pm$  chỉ ra bước chọn nhánh đầu tiên. Dấu của trở kháng được xác định theo nguyên tắc coi vật liệu MMs là môi trường thụ động, do đó phần thực của trở kháng  $z'$  và phần ảo của chiết suất  $n''$  trong phương trình (5) và (6) được xác định bởi điều kiện:

$$z' \geq 0 \quad (5)$$

$$n'' \geq 0 \quad (6)$$

Như vậy, cần phải chọn giá trị của trở kháng sao cho thỏa mãn điều kiện (4) trên toàn bộ dải tần hoạt động. Khi đã xác định được  $z$ , giá trị của  $e^{ink_0d}$  thu được từ  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  và  $z$  được tính như sau:

$$e^{jnk_0d} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11} \frac{z - 1}{z + 1}} \quad (7)$$

Độ lớn của  $|e^{jnk_0d}|$  thu được từ phương trình luôn nhỏ hơn hoặc bằng 1, đảm bảo cho dấu phần ảo của chiết suất luôn thỏa mãn phương trình (6). Cuối cùng, ta thu được công thức để xác định chiết suất:

$$n = \frac{1}{k_0d} \left\{ \left[ \ln(e^{ink_0d}) \right]'' + 2m\pi \right. \\ \left. - i \left[ \ln(e^{ink_0d}) \right]' \right\} \quad (8)$$

Trong đó  $m$  là số nguyên liên quan đến chỉ số nhánh của  $n'$ . Tại đây, chúng ta đối mặt với việc lựa chọn nhánh phức tạp hơn: chọn giá trị đúng của  $m$ . Việc xác định phần thực của  $n$  tương đối khó khăn do sự tồn tại của các nhánh khi giải phương trình hàm logarithm (8).

Mặc dù giá trị của trở kháng  $z$  và phần ảo của chiết suất  $n''$  có thể tính toán một cách cụ thể thông qua phương trình (3) và (8). Tuy nhiên, cách tính toán này có một nhược điểm là các tham số tán xạ lấy từ kết quả mô phỏng và thực nghiệm đều có thể có sai số nên sẽ dẫn đến các sai số của  $n$  và  $z$ . Các giá trị sai số này tuy nhỏ nhưng sẽ gây ra sự đổi dấu tại những vị trí mà các tham số có giá trị xấp xỉ 0. Vấn đề này có thể được xử lý bằng cách đưa vào các giá trị ngưỡng cho các điều kiện (5) và (6). Cụ thể, khi giá trị tuyệt đối của  $z$  lớn hơn giá trị ngưỡng, điều kiện (5) có thể được áp dụng. Với các trường hợp còn lại, dấu của trở kháng sẽ tương ứng với giá trị của chiết suất có phần ảo không âm. Điều kiện này tương đương với  $|e^{ink_0d}| \leq 1$ .

Từ phương trình (8), phần thực của chiết suất  $n'$  vẫn chưa được xác định rõ ràng do vấn đề chọn nhánh của  $m$  khi giải phương trình hàm logarit của phương trình (7). Việc xác định chỉ số nhánh  $m$  của vật liệu Meta tương đối phức tạp. Trước tiên, nhánh của  $n'$  tại tần số ban đầu được xác định như sau: từ

$$\mu = nz \quad (9)$$

$$\varepsilon = n/z \quad (10)$$

ta có:

$$\mu'' = n'z'' + n''z' \quad (11)$$

$$\varepsilon'' = \frac{1}{|z|^2}(-n'z'' + n''z') \quad (12)$$

Vì vật liệu biến hoá được coi là môi trường thụ động, do đó phần ảo của độ điện thẩm và độ từ thẩm phải nhận giá trị dương ( $\mu'' \geq 0$  và  $\varepsilon'' \geq 0$ ). Thông qua tính toán ta thu được điều kiện:

$$|n'z''| \leq n''z' \quad (13)$$

Ở tần số ban đầu, nhánh đúng của kết quả giải phương trình logarit là nhánh với giá trị số nguyên  $m$  thỏa mãn phương trình (13). Nếu có nhiều kết quả thì với mỗi giá trị nhánh  $m$ , ta xác định giá trị của  $n'$  tại tất cả các tần số tiếp theo bằng cách sử dụng phương pháp lặp được đề cập ở phần tiếp theo. Với các tần số tiếp theo, để xác định  $n'$  ta sử dụng tính liên tục của chiết suất và mô hình lặp dựa trên các tham số đã thu được ở trên. Giả sử có giá trị chiết suất  $n(f_0)$  tại tần số  $f_0$ , ta sẽ thu được giá trị  $n(f_1)$  tại tần số tiếp theo  $f_1$  bằng cách khai triển Taylor hàm  $e^{in(f_1)k_0(f_1)d}$ :

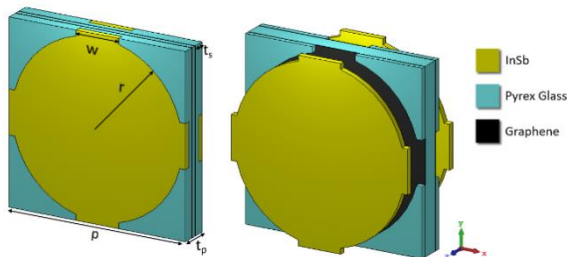
$$e^{in(f_1)k_0(f_1)d} \approx e^{in(f_0)k_0(f_0)d} \left(1 + \Delta + \frac{1}{2}\Delta^2\right) \quad (14)$$

Với  $\Delta = in(f_1)k_0(f_1)d - in(f_0)k_0(f_0)d$  và  $k_0(f_0)$  biểu thị số sóng trong chân không tại tần số  $f_0$ .  $f_0$  là tần số ban đầu mà các tham số đã được xác định,  $f_1$  là tần số kế tiếp. Trong phương trình (14), chỉ số nhánh  $[m$  trong (8)] của phần thực  $n(f_1)$  là giá trị duy nhất chưa xác định. Vì vế bên trái của phương trình (14) được xác định từ phương trình (7), do đó phương trình (14) là phương trình bậc hai ứng với biến là  $n(f_1)$  và sẽ có 2 nghiệm. Vì đã xác định được giá trị của  $n''(f_1)$  theo (7), ta có thể chọn được đúng một trong hai nghiệm bằng cách so sánh phần ảo của chúng với  $n''(f_1)$ , Nghiệm có phần ảo gần nhất với  $n''(f_1)$  là nghiệm đúng, và được ký hiệu là  $n_0$ . Vì  $n_0$  là kết quả xấp xỉ tốt nhất của  $n(f_1)$ , ta sẽ chọn nhánh  $m$  trong phương trình (8) sao cho  $n'(f_1)$  gần nhất có thể với giá trị  $n'_0$ .

## MÔ PHỎNG VÀ THIẾT KẾ

Để minh họa quá trình truy hồi, chúng tôi sử dụng tham số tán xạ của MMs chiết suất âm có cấu trúc lưới đĩa tích hợp graphene. Cấu trúc MMs đề xuất cùng ô cơ sở được mô tả trong Hình 1(a), bao gồm thành phần kim loại là hai lưới đĩa bằng bán dẫn InSb và lớp điện môi là kính Pyrex. Lớp graphene được tích hợp vào giữa lớp điện môi để điều khiển chủ động các đáp ứng cộng hưởng điện và cộng hưởng từ của mẫu với điện từ trường ngoài, từ đó cho phép kiểm soát linh hoạt vùng chiết suất âm. Với cấu trúc lưới đĩa đề xuất, thành phần cặp đĩa tạo ra độ từ thẩm âm và dây liên tục tạo ra độ điện thẩm âm dưới tần số plasma. MMs có kích thước ô cơ sở  $p = 62 \mu\text{m}$  và chiều dày  $t_p = 10 \mu\text{m}$ . Độ rộng của dây liên tục  $w = 15 \mu\text{m}$ , bán kính của đĩa tròn  $r = 30 \mu\text{m}$ . Khoảng cách từ bề mặt hiệu dụng tới tấm graphene là  $t_s = 4 \mu\text{m}$ . Khi điều chỉnh tối ưu hóa các tham số cấu trúc, phần điện thẩm âm và từ thẩm âm sẽ chồng chập nhau trên cùng một dải tần số, ta thu được đặc tính chiết suất âm của MMs. Nhìn vào phổ truyền qua và phản xạ thu được từ các kết quả mô phỏng và đo đạc rất khó để khẳng định tính chiết suất âm và một số đặc tính khác của vật liệu này. Vì vậy, việc tính toán các tham số điện từ bao gồm trở kháng, chiết suất, độ điện thẩm và độ từ thẩm đóng vai trò rất quan trọng khi nghiên cứu MMs chiết suất âm. Để mô phỏng các tham số tán xạ của mẫu MMs khi tương tác với sóng điện từ, phương pháp tích phân hữu hạn và phần mềm CST Studio Suite [19] đã được sử dụng. Quá trình tính toán

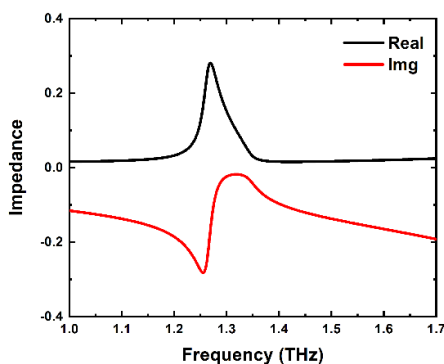
được thực hiện bằng phần mềm MATLAB [20] sử dụng code do nhóm chúng tôi đã nghiên cứu soạn thảo dựa trên thuật toán của Chen đã trình bày ở trên. Phần tiếp theo báo cáo sẽ trình bày các bước thực hiện tính toán sau khi thu được tham số tán xạ  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  và pha từ mô phỏng.



Hình 1: (a) Cấu trúc ô cơ sở của MMs và thông số hình học (b) Các thành phần cấu tạo của MMs

### KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

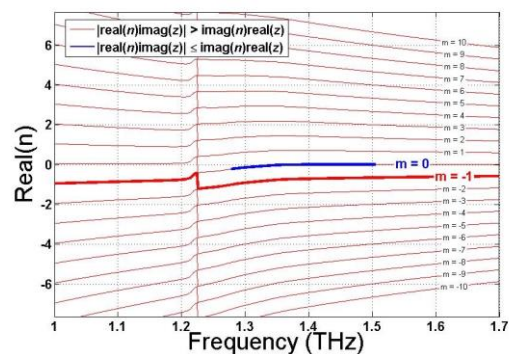
Bước đầu tiên trong quá trình truy hồi là loại bỏ ảnh hưởng của lớp không gian đệm giữa mẫu và nguồn phát sóng điện từ. Lớp không gian đệm này cần thiết trong quá trình mô phỏng để đảm bảo rằng các tương tác trường gần của MMs không tác động lên nguồn phát, nhưng lại tạo ra sự dịch pha cho phổ phản xạ và phổ truyền qua. Sự dịch pha này có thể triệt tiêu bằng cách nhân  $S_{11}$  và  $S_{21}$  với  $e^{-i2k_0 d_{pad}}$ , với  $d_{pad}$  là độ dày của lớp không gian đệm. Tiếp theo, bằng cách áp dụng phương trình (3), với các giá trị  $S_{21}$ ,  $S_{11}$  từ kết quả mô phỏng tương tác sóng điện từ cấu trúc đề xuất, ta sẽ thu được phổ của trở kháng và biểu diễn trên hình số 2.



Hình 2: Phần thực và phần ảo của trở kháng

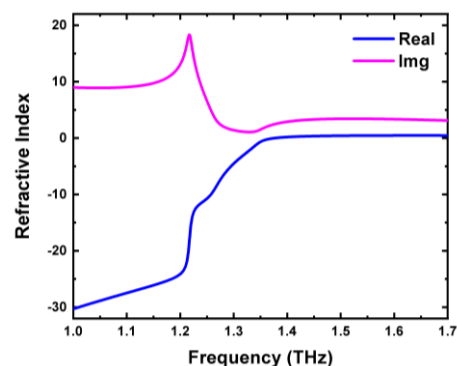
Sau khi thu được các kết quả trở kháng theo tần số như trên hình 2, ta có thể tính toán phần thực của chỉ số khúc xạ cho nhiều giá trị của nhánh thông qua phương trình (8), (14) và kết hợp thêm các điều kiện (6), (13). (kết quả mô tả trên Hình 3). Trong đồ thị, đường màu xanh nước biển tại

nhánh  $m = 0$  chỉ ra các giá trị  $n$  tương ứng với mỗi nhánh thỏa mãn bất đẳng thức (13). Theo như phân tích ở phần 2, chỉ có một nhánh có nhiều giá trị của  $n$  thỏa mãn bất đẳng thức này, thì đó là nhánh cần được chọn. Một điều cần lưu ý là tại tần số 1.22 THz, giá trị của chiết suất  $n$  cho tất cả các nhánh có sự nhảy vọt đột ngột. Để duy trì tính liên tục của chỉ số khúc xạ, chúng ta cần chọn một nhánh khác thỏa mãn tính liên tục tại điểm đó. Quan sát hình 3 cho thấy trường hợp này nhánh  $m = -1$  sẽ cho vùng tần số dưới 1.22 THz thỏa mãn sự liên tục của chiết suất với vùng tần số cao. Vậy nhánh có giá trị  $m = -1$  sẽ được chọn là nhánh đúng để thực hiện các tính toán tham số trường điện từ tiếp theo.



Hình 3: Phần thực của chiết suất tương ứng với các nhánh

Sau khi đã chọn đúng nhánh, ta có thể dễ dàng tính toán giá trị của chiết suất từ công thức nào, kết quả tính toán này được đưa ra trên hình 4.

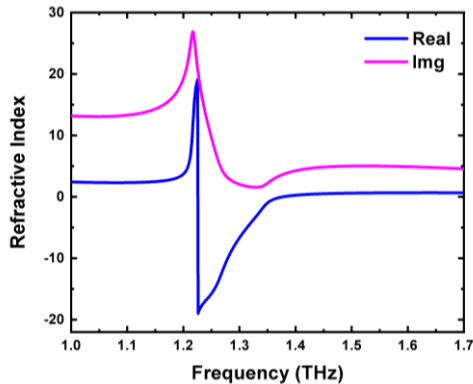


Hình 4: Phần thực và phần ảo của chiết suất

Nếu không lựa chọn nhánh  $m$  phù hợp sẽ dẫn tới kết quả tính toán chiết suất bị sai. Một trong kết quả tính toán chiết suất chưa đúng được đưa ratrên hình 5. Ta có thể dễ dàng quan sát thấy tại vùng tần số 1.22 THz, giá trị của chiết suất không có sự

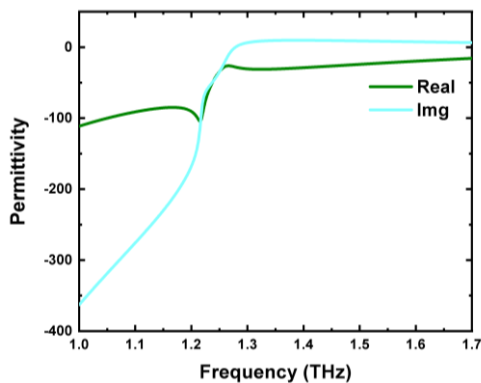


liên tục từ vùng tần số thấp tới vùng tần số cao - nơi mà phần lớn các kết quả của  $n$  thỏa mãn bất đẳng thức (11). Như vậy từ kết quả đưa ra trên hình 4 và 5 có thể thấy vai trò rất quan trọng quyết định tính chính xác của giá trị chiết suất trong việc chọn nhánh  $m$ . Với giá trị nhánh  $m$  không đúng ta có thể sẽ thu nhận và phỏng đoán các kết quả tính chất vật liệu hoàn toàn sai với thực tế.



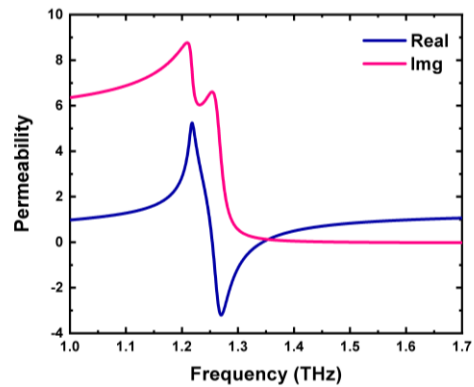
Hình 5: Phần thực và phần ảo của chiết suất (Trường hợp không chọn lại nhánh  $m$ )

Cuối cùng, sau khi đã thu được giá trị của chiết suất, từ các công thức (9) và (10), ta sẽ tính toán được giá trị độ điện thẩm và độ từ thẩm của cấu trúc đề xuất khi tương tác với sóng điện từ và được biểu diễn trên hình 6 và 7.



Hình 6: Phần thực và phần ảo của độ điện thẩm

Từ kết quả mô phỏng và tính toán ta xác định được mẫu MMs đề xuất có cộng hưởng từ xung quanh vùng tần số 1.25 THz và vùng chiết suất âm kép từ 1.25 – 1.35 THz do sự chồng chập của vùng có từ thẩm âm và chiết suất âm.



Hình 7: Phần thực và phần ảo của độ từ thẩm

## KẾT LUẬN

Như vậy, trong báo cáo này chúng tôi đã trình bày cách xác định chính xác giá trị nhánh  $m$  về mặt lý thuyết cũng như áp dụng tính toán trong trường hợp cụ thể là vật liệu biến hóa chiết suất âm sử dụng cấu trúc fishnet tích hợp graphene. Việc lựa chọn giá trị nhánh  $m$  là yếu tố quan trọng để đảm bảo tính đúng đắn của kết quả tính toán các tham số trường điện từ hay nói khác đi là tính chất của trường điện từ. Các kết quả này góp phần quan trọng trong việc nghiên cứu và ứng dụng các vật liệu biến hóa nói chung và vật liệu biến hóa có chiết suất âm nói riêng.

## Lời cảm ơn

Công trình này được thực hiện với sự hỗ trợ về kinh phí của Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 103.02-2021.94

## Tài liệu tham khảo

1. V. G. Veselago, Sov. Phys. Uspekhi **10**, 509–514 (1968).
2. R. W. Ziolkowski, Opt. Express **11**, 662 (2003).
3. J. Chen, Y. Wang, B. Jia, T. Geng, X. Li, L. Feng, W. Qian, B. Liang, X. Zhang, M. Gu, and S. Zhuang, Nat. Photonics **5**, 239–242 (2011).
4. J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett. **85**, 3966–3969 (2000).
5. M. Ghasemi Baboly, A. Raza, J. Brady, C. M. Reinke, Z. C. Leseman, and I. El-Kady, Appl. Phys. Lett. **109**, 183504 (2016).
6. B. A. Webb and R. W. Ziolkowski, Appl. Phys. Lett. **118**, 094102 (2021).
7. J. Bonache, I. Gil, J. Garcia-Garcia, and F. Martin, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **54**, 265–271 (2006).

8. Z. Wang, F. Cheng, T. Winsor, and Y. Liu, *Nanotechnology* **27**, 412001 (2016).
9. G. Geetharamani and T. Aathmanesan, *Wirel. Pers. Commun.* **113**, 2289–2300 (2020).
10. A. A. Abdelhamid and S. R. Alotaibi, *Comput. Mater. Contin.* **73**, 917–933 (2022).
11. S. Tabassum, S. Nayemuzzaman, M. Kala, A. Kumar Mishra, and S. K. Mishra, *Sensors* **22**, 6896 (2022).
12. H.-J. Lee and J.-G. Yook, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 254103 (2008).
13. X. Chen, T. M. Grzegorzczak, B.-I. Wu, J. Pacheco, and J. A. Kong, *Phys. Rev. E* **70**, 016608 (2004).
14. Z. Szabó, G.-H. Park, R. Hedge, and E.-P. Li, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **58**, 2646–2653 (2010).
15. A. M. Nicolson and G. F. Ross, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **19**, 377–382 (1970).
16. A. L. De Paula, M. C. Rezende, and J. J. Barroso, *2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011)* (IEEE, 2011), pp. 488–492 (2011).
17. D. R. Smith, S. Schultz, P. Markoš, and C. M. Soukoulis, *Phys. Rev. B* **65**, 195104 (2002).
18. P. Markos and C. Soukoulis, *Opt. Express* **11**, 649 (2003).
19. <https://www.3ds.com/products/services/simulia/products/cst-studio-suite/>
20. <https://www.mathworks.com/product/matlab.html>