

ELECTROMAGNETIC WAVE PROPERTIES IN THE MICROWAVE FREQUENCY OF COMPOSITE $\text{La}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{NiO}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$

Chu Thi Anh Xuan*, Nguyen Van Khiem, Do Minh Tan,
 Nguyen Thi Khanh Van, Lo Thi Hue, Le Tien Ha*

TNU – University of Sciences

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 14/4/2022	$\text{La}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{NiO}_4$ is known to be a typical dielectric with huge dielectric constant and weak paramagnetic properties at room temperature. The weak magnetic moment together with the very large imbalance between the dielectric constant and the permeability lead to weak absorption of electromagnetic waves due to the absence of the contribution of the magnetic field loss component. In order to improve the magnetic field loss and balance the magnetic and dielectric parameters, the CoFe_2O_4 ferrite was gradually added to obtain the $\text{La}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{NiO}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ composite. The reflection loss RL was determined in the microwave frequency range from 4 to 18 GHz using a vector network analysis measurement system. The maximum value obtained is down to -31.5 dB at 12.6 GHz for sample $x = 10\%$ in open circuit mode and -26 dB at 6.4 GHz for sample $x = 15\%$ in short circuit mode with an Al plate. Partial substitution of the magnetic material at an appropriate concentration into $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ is expected to obtain dielectric/ferrite composite materials that strongly absorb electromagnetic waves in the desired frequency region.
Revised: 31/5/2022	
Published: 31/5/2022	
KEYWORDS	
Electromagnetic Absorption	
Composite	
Reflection Loss	
Z-matching	
Absorber	

TÍNH CHẤT HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ TRONG VÙNG TẦN SỐ VI BA CỦA VẬT LIỆU TỔ HỢP NỀN ĐIỆN MÔI $\text{La}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{NiO}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$

Chu Thị Anh Xuân*, Nguyễn Văn Khiêm, Đỗ Minh Tân,
 Nguyễn Thị Khánh Vân, Lô Thị Huế, Lê Tiến Hà*

Trường Đại học Khoa học – ĐHTH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 14/4/2022	$\text{La}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{NiO}_4$ được biết đến là một chất điện môi điển hình có hằng số điện môi không lồ và tính thuận từ yếu ở nhiệt độ phòng. Mômen từ yếu cùng với sự bất cân bằng rất lớn giữa hằng số điện môi và độ từ thẩm dẫn đến sự hấp thụ yếu sóng điện từ do không có sự đóng góp của thành phần tổn hao từ trường. Để cải thiện tổn hao từ trường, đồng thời làm cân bằng các thông số từ tính và điện môi, vật liệu ferrite CoFe_2O_4 được dần dần thêm vào để thu được vật liệu tổ hợp $\text{La}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{NiO}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$. Độ tổn hao phản xạ RL được xác định trong dải tần số từ 4 đến 18 GHz sử dụng hệ đo phân tích mạng vectơ. Giá trị âm lớn nhất thu được đạt xuống đến -31,5 dB tại 12,6 GHz cho mẫu $x = 10\%$ trong chế độ đo hở mạch và -26 dB tại 6,4 GHz cho mẫu $x = 15\%$ trong chế độ ngắn mạch bằng một tấm Al. Việc thay thế một phần vật liệu từ tính theo một nồng độ thích hợp vào chất nền điện môi $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ được kỳ vọng sẽ thu được các vật liệu tổ hợp điện môi/ferrite hấp thụ mạnh sóng điện từ trong vùng tần số mong muốn.
Ngày hoàn thiện: 31/5/2022	
Ngày đăng: 31/5/2022	
TỪ KHÓA	
Hấp thụ điện từ	
Vật liệu tổ hợp	
Tổn hao phản xạ	
Phù hợp trở kháng	
Vật liệu hấp thụ	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5850>

* Corresponding author. Email: xuancta@tnus.edu.vn; halt@tnus.edu.vn

1. Giới thiệu

Bằng cách hấp thụ sóng tới hoặc triệt tiêu sóng phản xạ, các chất hấp thụ sóng điện từ (Electromagnetic - EM) có thể bảo vệ được các vật thể trước những tác động không mong muốn bởi bức xạ điện từ. Đặc tính này làm cho các lớp vật liệu hấp thụ sóng EM trở nên cần thiết trong các ứng dụng che chắn, chống nhiễu EM và đặc biệt là trong công nghệ tàng hình. Hiệu suất của một chất hấp thụ thường được đặc trưng bởi tính chất hấp thụ mạnh hay phản xạ yếu bức xạ điện từ của vật liệu và được xác định thông qua giá trị âm lớn của độ tổn hao phản xạ (Reflection Loss - RL). Mặc dù để đạt được sự hấp thụ hoàn toàn năng lượng sóng điện từ là rất khó, nhưng có thể đạt được sự phản xạ bằng không khi lớp vật liệu hấp thụ có (i) trở kháng nội (Z_0) bằng trở kháng của môi trường truyền sóng tới (Z_0), còn gọi là hiệu ứng cộng hưởng phù hợp trở kháng; hoặc (ii) độ dày thỏa mãn điều kiện cộng hưởng một phần tư bước sóng hay còn gọi là hiệu ứng cộng hưởng phù hợp pha. Trên thực tế, cả hai hiệu ứng trên đều có thể được quan sát thấy trong nhiều chất hấp thụ và dẫn đến một giá trị RL âm rất lớn. Các nghiên cứu trước đây đã cho thấy giá trị của RL có thể đạt xuống đến -60 dB trong các chất hấp thụ ferrite, sắt từ hoặc tổ hợp của chúng. Ví dụ, giá trị độ tổn hao phản xạ RL của vật liệu tổ hợp BaTiO₃/Fe(C) đạt xấp xỉ -64 dB [1]; vật liệu nano tổ hợp CoFe₂O₄ trong epoxy có RL ~ -60 dB [2]; CoFe-CoFe₂O₄/C/paraffin đạt RL ~ -71,73 dB (4,78 GHz) [3]; cấu trúc nano lõi/vỏ Co/C trong paraffin có RL ~ -62,12 dB (11,85 GHz) [4];... Một số công bố trong nước trên hệ vật liệu tổ hợp điện môi/ferrite cũng thu được các kết quả khá khả quan [5], [6]. Các công bố này cho thấy các chất hấp thụ dựa trên vật liệu ferrite và sắt từ chiếm ưu thế với giá trị RL đạt rất thấp. Điều này chứng tỏ vai trò chủ đạo của tổn hao từ so với các loại tổn hao khác có thể xuất hiện trong cơ chế hấp thụ năng lượng sóng điện từ của các chất hấp thụ.

Vật liệu điện môi La_{1,5}Sr_{0,5}NiO₄ là một chất điện môi điển hình có hằng số điện môi rất lớn ($\epsilon_r > 10^7$) và thể hiện tính thuận từ ở nhiệt độ với độ từ thẩm gần như bằng 1 ($\mu_r \sim 1,006$) [7], [8]. Chính sự bất cân bằng rất lớn giữa các đại lượng đặc trưng ϵ_r và μ_r trong các chất điện môi dẫn đến khả năng hấp thụ sóng điện từ yếu do thành phần tổn hao từ là không đáng kể. Mặt khác, ferrite cobalt CoFe₂O₄ là vật liệu từ tính phổ biến với độ từ hóa khá lớn. Khả năng hấp thụ mạnh sóng điện từ của vật liệu này cũng đã được nghiên cứu và công bố với giá trị RL có thể đạt xuống đến dưới -40 dB tại đỉnh cộng hưởng 9,5 GHz [9]. Trong báo cáo của Yalcin và cộng sự, khi kết hợp với chất mang là epoxy, vật liệu nano ferrite spinel có thể cho hiệu suất hấp thụ tối ưu với độ tổn hao phản xạ đạt xuống đến gần -60 dB. Do đó, việc thêm dần dần các hạt nano từ tính CoFe₂O₄ vào hợp chất điện môi nền La_{1,5}Sr_{0,5}NiO₄ nhằm cải thiện thành phần tổn hao từ và cân bằng giá trị của ϵ_r và μ_r được xem là giải pháp hữu hiệu để tăng cường khả năng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu tổ hợp La_{1,5}Sr_{0,5}NiO₄/CoFe₂O₄. Trong nghiên cứu này, chúng tôi chỉ ra rằng việc pha CoFe₂O₄ thực sự cải thiện đáng kể khả năng hấp thụ sóng điện từ của vật liệu tổ hợp La_{1,5}Sr_{0,5}NiO₄/xCoFe₂O₄ (x là phần trăm thể tích của CoFe₂O₄). Giá trị của RL giảm xuống đến -31,5 dB tại 12,6 GHz cho mẫu $x = 10\%$ trong chế độ đo hở mạch và -26 dB tại 6,4 GHz cho mẫu $x = 15\%$ trong chế độ ngắn mạch bằng một tấm Al. Các nghiên cứu thực nghiệm của chúng tôi còn cho thấy hiệu ứng cộng hưởng một phần tư bước sóng chỉ quan sát thấy trong chế độ đo phản xạ sóng điện từ ở chế độ ngắn mạch sử dụng tấm kim loại Al.

2. Phương pháp nghiên cứu

Với mục đích chế tạo được số lượng lớn vật liệu dạng bột có chất lượng tốt, hợp chất La_{1,5}Sr_{0,5}NiO₄ và CoFe₂O₄ được chế tạo bằng phương pháp phản ứng pha rắn kết hợp nghiền bi năng lượng cao sử dụng máy nghiền bi MM 200 – Retsch (CHLB Đức). Cấu trúc, chất lượng pha tinh thể và kích thước hạt của vật liệu nano dạng bột được kiểm tra thông qua phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) và hiển vi điện tử quét (SEM). Tính chất từ của vật liệu được xác định từ phép đo từ kế mẫu rung (VSM). Tính chất hấp thụ sóng điện từ của vật liệu tổ hợp trong vùng tần số vi ba từ 4-18 GHz được xác định thông qua phép đo phản xạ và truyền qua sóng điện từ

trong không gian tự do trên hệ đo phân tích mạng vector (Anritsu MS2028B VNA Master). Trước đó, chúng tôi tiến hành trải các lớp hấp thụ sử dụng chất mang là paraffin trên khuôn mica thiết kế sẵn diện tích bề mặt 100×100 mm và có độ dày d thay đổi. Cụ thể, vật liệu tổ hợp dạng bột $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4 / x\text{CoFe}_2\text{O}_4$, với $x = 0; 5; 10$ và 15% là phần trăm thể tích thay thế của CoFe_2O_4 cho hợp chất nền $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4$, được trộn đều với paraffin theo tỷ lệ thể tích tương ứng là 40/60 và ép thành các tấm phẳng có độ dày 3,5 mm. Trong chế độ đo đóng mạch, chúng tôi sử dụng một tấm kim loại Al phẳng làm mẫu chuẩn với 0% tín hiệu truyền qua và 100% tín hiệu phản xạ. Trở kháng nội Z và độ tổn hao phản xạ RL được tính toán dựa trên thuật toán NRW (Nicolson-Ross-Weir) và lý thuyết đường truyền:

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \tanh[j(2\pi f d/c) \sqrt{\mu_r/\epsilon_r}] \quad (1)$$

$$RL \text{ (dB)} = 20 \log |(Z_{in} - Z_0)/(Z_{in} + Z_0)| \quad (2)$$

Với: Z_{in} , Z_0 lần lượt là trở kháng nội của lớp vật liệu hấp thụ và không gian tự do; ϵ_r và μ_r là hằng số điện môi tương đối và độ từ thẩm tương đối; f là tần số sóng điện từ chiếu tới; d là độ dày lớp hấp thụ và c là vận tốc ánh sáng trong chân không.

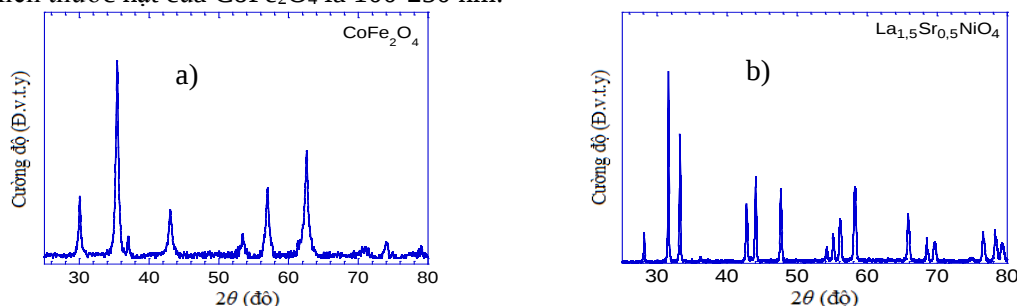
Trong trường hợp có đế kim loại phẳng gắn sau các mẫu hấp thụ, có thể được xác định trực tiếp RL và Z_{in} từ hệ số phản xạ phức, S_{11} theo công thức:

$$Z_{in} = Z_0(1 + S_{11})/(1 - S_{11}) \quad (3)$$

$$RL = 20 \log_{10} |S_{11}| \quad (4)$$

3. Kết quả và bàn luận

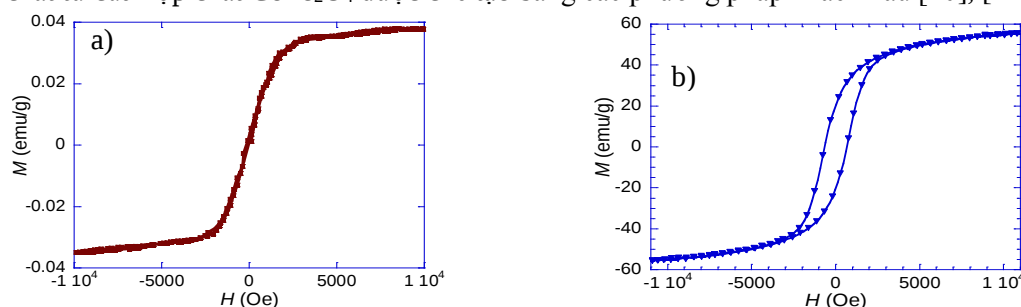
Bản chất tinh thể của mẫu vật liệu dạng bột $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4$ và CoFe_2O_4 đã chế tạo được phân tích bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD). Hình 1a,b biểu diễn giản đồ nhiễu xạ tia X của các mẫu đo tại nhiệt độ phòng. Kết quả cho thấy cả hai hợp chất chế tạo được đều đơn pha tinh thể, tất cả các đỉnh nhiễu xạ xuất hiện là phù hợp với cấu trúc tinh thể tứ giác kiểu perovskite đối với $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4$ (I4/mmm) và cấu trúc tinh thể lập phương kiểu spinel đảo đối với CoFe_2O_4 . Kích thước tinh thể trung bình được tính toán sử dụng phương trình Scherrer, $D = k\lambda/(\beta \cos\theta)$ (với D là kích thước tinh thể trung bình, k là thừa số hình dạng, thường được lấy giá trị 0,9 khi coi các hạt tinh thể có dạng gần giống hình cầu, λ là bước sóng của bức xạ tia X và β là độ rộng bán phổ tại đỉnh nhiễu xạ đặc trưng tại góc nhiễu xạ θ), và đạt giá trị khoảng 45 nm và 50 nm tương ứng cho CoFe_2O_4 và $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4$. Tuy nhiên, những giá trị này trên thực tế phản ánh kích thước của các đô-men tinh thể bên trong các hạt lớn chứ không phải là kích thước hạt thật. Ảnh chụp bề mặt hiển vi điện tử quét SEM (không được đưa ra ở đây) chỉ ra rằng hình thái hạt của vật liệu có dạng gần như hình cầu và kích thước hạt của $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4$ nằm trong khoảng 100-200 nm, trong khi kích thước hạt của CoFe_2O_4 là 100-250 nm.



Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu (a) CoFe_2O_4 và (b) $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4$ tại T_p

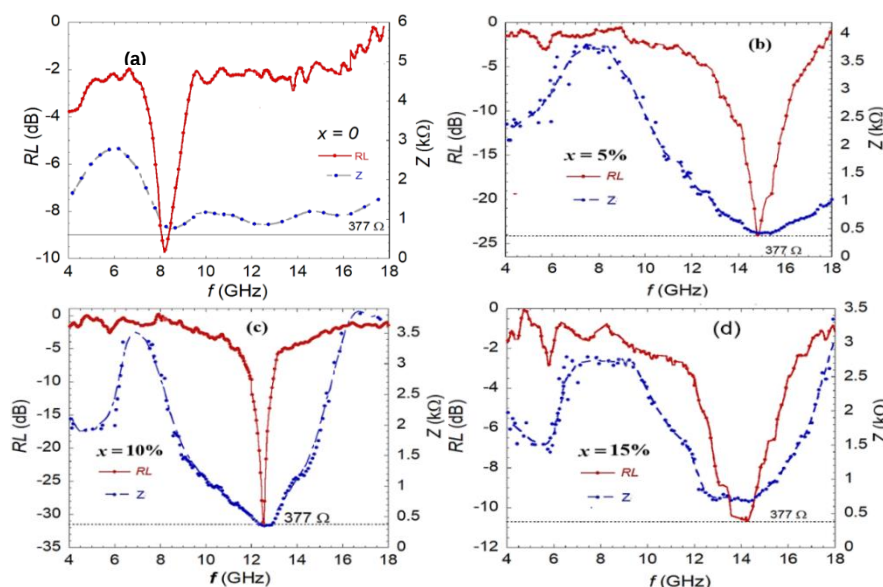
Đường cong từ hóa $M(H)$ của các mẫu bột được thể hiện trong Hình 2a,b. Quan sát trên Hình 2a ta thấy không có hiện tượng trễ từ nào đối với vật liệu $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4$. Trong khi đó, CoFe_2O_4 thể hiện đặc trưng từ trễ khá rõ rệt với giá trị lực kháng từ H_C đạt cỡ 733 Oe; độ từ dư M_r và độ từ hóa bão hòa được xác định lần lượt là 20,14 emu/g và 55,6 emu/g, chứng tỏ tính chất từ mạnh

của vật liệu chế tạo được. Kết quả này của chúng tôi là phù hợp với các công bố trước đây về tính chất từ của hợp chất CoFe_2O_4 được chế tạo bằng các phương pháp khác nhau [10], [11].



Hình 2. Đường cong từ trễ đo tại nhiệt độ phòng của (a) $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4$ và (b) CoFe_2O_4

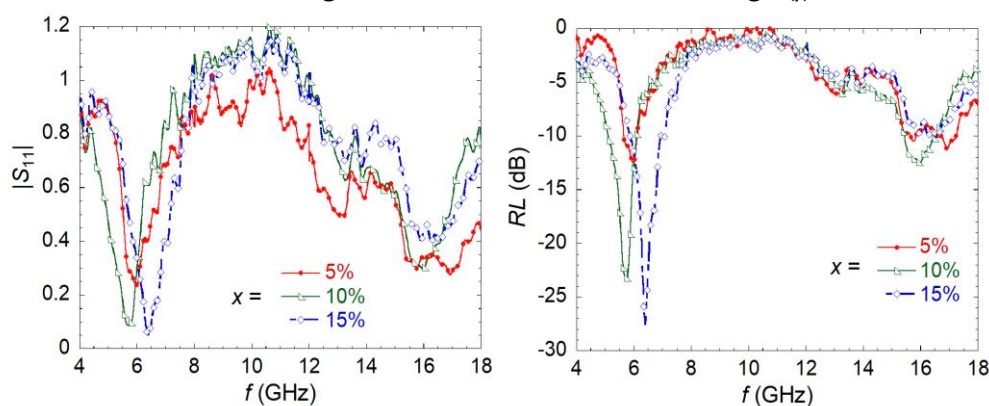
Tính chất hấp thụ sóng EM của các mẫu hấp thụ tổ hợp $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4/x\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ($x = 0; 5\%; 10\%$ và 15%) được xác định thông qua số liệu thực nghiệm của phép đo truyền qua và phản xạ sóng EM trong không gian tự do với dải tần số đo từ 4 GHz đến 18 GHz. Kết quả tính toán độ tổn hao phản xạ và trở kháng nội phụ thuộc tần số của tất cả các mẫu được biểu diễn trên Hình 3. Trên đường cong $RL(f)$ của tất cả các mẫu đều xuất hiện một đỉnh cực tiểu có cường độ khá mạnh trong vùng tần số cao và một đỉnh cực tiểu có cường độ rất yếu ($RL > -5$ dB) tại vùng tần số gần 5,6 GHz. Giá trị RL tương ứng cho các mẫu có nồng độ pha từ tính $x = 0; 5\%; 10\%$ và 15% lần lượt là -9,8 dB tại 8,3 GHz; -24 dB tại 14,7 GHz; -31,5 dB tại 12,6 GHz và -10,7 dB tại 14,2 GHz.



Hình 3. Sự phụ thuộc tần số của RL và Z của các mẫu hấp thụ tổ hợp $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4/x\text{CoFe}_2\text{O}_4$ với $d = 3,5$ mm.

Với mẫu điện môi thuần $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4$ (khi $x = 0$), chúng ta chỉ quan sát thấy đỉnh hấp thụ có cường độ khá yếu ($RL \sim -9,8$ dB) và không thỏa mãn điều kiện cộng hưởng phù hợp trở kháng $Z = Z_0$ tại đỉnh cực tiểu hấp thụ do toàn bộ các giá trị của trở kháng trong dải tần số đo đều lớn hơn 377 Ohm (Hình 3a). Khi thay thế một phần vật liệu điện môi bằng vật liệu từ tính CoFe_2O_4 với nồng độ tăng dần, chúng tôi nhận thấy một sự cải thiện rõ rệt tính chất hấp thụ sóng EM của vật liệu tổ hợp $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$. Tuy nhiên, giá trị cực tiểu của độ tổn hao phản xạ tại đỉnh hấp thụ của các mẫu biến thiên một cách không đơn điệu theo nồng độ pha từ tính x tăng. Hơn nữa, các giá trị tần số cộng hưởng ghi nhận tại các đỉnh cực tiểu này cũng biến đổi không theo bất

kỳ một quy luật nào và được giải thích là do sự bất đồng đều về độ dày, tính đồng nhất của mẫu và do thăng giáng ngẫu nhiên trong phép đo truyền qua và phản xạ sóng điện từ. Đối với hai mẫu có nồng độ CoFe_2O_4 là 5% và 10%, tần số cộng hưởng được xác định tại đỉnh hấp thụ f_R có giá trị rất gần với giá trị của tần số cộng hưởng phù hợp trở kháng f_Z tại điểm thỏa mãn $Z = Z_0$ (Hình 3b-c). Điều này chứng tỏ sự xuất hiện của các đỉnh này là do hiệu ứng hấp thụ cộng hưởng theo cơ chế phù hợp trở kháng gây ra. Khi nồng độ từ tính tiếp tục tăng lên đến 15% (Hình 3d), hiệu suất hấp thụ sóng EM của vật liệu tổ hợp giảm mạnh. Trên đường cong biểu diễn sự phụ thuộc tần số của RL vẫn xuất hiện một đỉnh cực tiểu hấp thụ với giá trị độ tổn hao phản xạ ghi nhận được là -10,7 dB tại 14,2 GHz, nhưng khi so sánh tương quan trên cùng một đồ thị với đường cong $Z(f)$, điều kiện $Z=Z_0$ là không thỏa mãn. Vì vậy, chưa thể đưa ra cơ chế hấp thụ cộng hưởng nào đóng vai trò quyết định sự xuất hiện của đỉnh cực tiểu này. Tuy nhiên, nguyên nhân của sự xuất hiện đỉnh hấp thụ cực tiểu tại tần số 14,2 GHz cho mẫu tổ hợp $x = 15\%$ có thể được bắt nguồn từ việc xuất hiện của đỉnh cực tiểu tại vùng tần số lân cận 14,2 GHz trên đường $Z(f)$.



Hình 4. Đường cong $|S_{11}|$ và RL phụ thuộc tần số của mẫu hấp thụ tổ hợp $\text{La}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{NiO}_4/x\text{CoFe}_2\text{O}_4$ với $d = 3,5 \text{ mm}$

Trên thực tế, vật liệu hấp thụ sóng điện từ thường được sử dụng để sơn phủ lên một bề mặt vật thể kim loại có tính chất gần như phản xạ hoàn toàn bức xạ EM chiếu đến. Trong trường hợp này, độ tương thích của vật liệu được xác định thông qua việc lựa chọn các chất hấp thụ có giá trị trở kháng nội tại bề mặt ranh giới với môi trường truyền sóng tới và có thể được thực hiện dựa trên các phép phân tích quan điểm trường xa và trường gần của lý thuyết đường truyền. Mục tiêu quan trọng nhất trong tìm kiếm và phát triển các vật liệu hấp thụ sóng EM là chế tạo được những vật liệu cho hệ số phản xạ nhỏ nhất có thể, hiệu suất hấp thụ tối ưu nhất, trên một băng thông rộng. Nghĩa là, ngoài việc tìm kiếm những vật liệu tổ hợp có khả năng làm suy hao cả hai thành phần năng lượng trường điện và trường từ của sóng EM theo nhiều cơ chế khác nhau, hệ số phản xạ có thể được điều chỉnh bằng mối tương quan về cường độ hiệu dụng và pha dao động của hai sóng phản xạ từ hai bề mặt của mẫu vật liệu hấp thụ khi có một đế kim loại phẳng gắn phía sau mẫu [12]. Với nhận định về sự xuất hiện của đỉnh cực tiểu có cường độ rất yếu trên đường cong $RL(f)$ tại lân cận 5,6 GHz của các mẫu có $x = 5\%$; 10% và 15% có thể là do hiệu ứng hấp thụ cộng hưởng theo cơ chế một phần tư bước sóng (cộng hưởng phù hợp pha). Chúng tôi tiến hành phép đo phản xạ sóng điện từ trong toàn bộ dải tần số máy đo từ 4-18 GHz cho các mẫu trong chế độ đóng mạch bằng một tấm kim loại Al gắn chặt phía sau. Kết quả được trình bày trên Hình 4. Cần lưu ý rằng, khi các mẫu được đo trong chế độ không có đế kim loại (chế độ mở mạch), hiệu ứng cộng hưởng một phần tư bước sóng có thể xảy ra nhưng do cường độ của thành phần phản xạ thứ cấp quá nhỏ so với thành phần phản xạ sơ cấp tại mặt tiếp xúc của mẫu hấp thụ với không gian truyền sóng tới, sự triệt tiêu của hai sóng phản xạ là không hoàn toàn. Tuy nhiên, khi có đế Al, thành phần sóng phản xạ thứ cấp được tăng cường rất mạnh do tính chất phản xạ gần

như toàn phần của bề mặt kim loại, dẫn đến hiệu ứng cộng hưởng phù hợp pha cũng sẽ được tăng cường. Quan sát trên Hình 4, đỉnh cực tiểu hấp thụ tại vùng tần số lân cận 5,6 GHz xuất hiện rất sắc nét với cường độ giảm mạnh xuống đến ~ -26 dB cho mẫu $x = 15\%$, tương ứng với sự giảm mạnh về giá trị không của hệ số phản xạ S_{11} . Điều này đưa ra bằng chứng tỏ rằng cơ chế cộng hưởng một phần tư bước sóng đóng vai trò chính trong việc xuất hiện đỉnh cực tiểu hấp thụ tại vùng tần số thấp xung quanh giá trị tần số này. Mặt khác, kết quả này của chúng tôi là phù hợp với công bố trong nghiên cứu của Wang và cộng sự trên các đơn lớp vật liệu tổ hợp hấp thụ sóng EM [13]. Ngoài ra, các đỉnh cộng hưởng trong vùng tần số cao do cơ chế cộng hưởng phù hợp trở kháng bị dịch chuyển mạnh về phía tần số cao hơn (~ 16 GHz) trên các đường $RL(f)$ của các mẫu khi có đế Al. Quan sát này được chúng tôi giải thích là do sự tiếp xúc giữa bề mặt thứ hai của mẫu hấp thụ với bề mặt đế Al là không thực sự lý tưởng. Hơn nữa, trong chế độ đo các mẫu không có đế Al, cả hai thành phần sóng truyền qua và sóng phản xạ đều có đóng góp vào trở kháng nội của môi trường vật liệu. Khi có đế Al phản xạ toàn phần sóng chiếu tới, thành phần sóng truyền qua mẫu hấp thụ coi như không đáng kể và do đó không có đóng góp gì vào trở kháng nội của mẫu. Sự thay đổi của trở kháng nội toàn phần này được coi là một trong các nguyên nhân chính gây ra sự dịch chuyển của đỉnh cộng hưởng $Z = Z_0$ sang vùng tần số cao và ảnh hưởng trực tiếp làm giảm mạnh cường độ đỉnh hấp thụ này.

4. Kết luận

Vật liệu tổ hợp $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ được tạo ra bằng cách thay thế một phần hợp chất điện môi nền $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4$ bằng hợp chất ferrite CoFe_2O_4 có từ tính khá mạnh. Kết quả cho thấy, khi sự cân bằng của hai thành phần điện môi và từ tính được thiết lập, tính chất hấp thụ sóng điện từ của vật liệu tổ hợp được tăng cường đáng kể. Giá trị RL giảm xuống đến $\sim -31,5$ dB tại đỉnh cộng hưởng 12,6 GHz cho mẫu $x = 10\%$ trong chế độ đo không có đế Al và ~ -26 dB tại 6,4 GHz cho mẫu $x = 15\%$ trong chế độ đo có đế Al. Mặt khác, các đỉnh cộng hưởng trong vùng tần số từ 12-16 GHz là phù hợp tốt hơn với cơ chế phù hợp trở kháng. Với kết quả này, chúng tôi hy vọng rằng việc thay thế các thành phần vật liệu từ tính theo một nồng độ thích hợp cho vật liệu điện môi $\text{La}_{1,5}\text{Sr}_{0,5}\text{NiO}_4$ sẽ có thể thu được các vật liệu tổ hợp điện môi/sắt từ, ferrite không chỉ có khả năng hấp thụ sóng điện từ hiệu suất cao mà còn mở rộng được vùng tần số hấp thụ.

Lời cảm ơn

Công trình này được thực hiện với sự hỗ trợ về tài chính của đề tài Khoa học và Công nghệ cấp Bộ Giáo dục và Đào tạo với mã số đề tài B2020-TNA-17 (Quyết định số: 103/QĐ-BGDĐT, ngày 13/01/2020).

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] Q. Yuchang, Z. Wancheng, L. Fa, and Z. Dongmei, "Optimization of electromagnetic matching of carbonyl iron/BaTiO₃ composites for microwave absorption," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 323, no. 5, pp. 600-606, 2011.
- [2] O. Yalçın, H. Bayrakdar, and S. Özüm, "Spin-flop transition, magnetic and microwave absorption properties of α -Fe₂O₄ spinel type ferrite nanoparticles," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 343, pp. 157-162, 2013.
- [3] Z. J. Guan, J. T. Jiang, N. Chen, Y. X. Gong, and L. Zhen, "Carbon-coated CoFe-CoFe₂O₄ composite particles with high and dual-band electromagnetic wave absorbing properties," *Nanotechnology*, vol. 29, p. 305604 (10pp), 2018.
- [4] K. Wang, Y. Chen, R. Tian, H. Li, Y. Zhou, H. Duan, and H. Liu, "Porous Co-C core-shell nanocomposites derived from Co-MOF-74 with enhanced electromagnetic wave absorption performance," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 10, no. 13, pp. 11333-11342, 2018.
- [5] Q. H. Do, Q. D. Tran, V. T. Nguyen, V. T. Pham, and T. H. Pham, "Synthesis of reduced graphene oxide - CoFe₂O₄ ferrite nanocomposites for efficient adsorption of uranium from aqueous solution,"

- Proceedings of International Workshop on Advanced Materials Science and Nanotechnology VIII*, 2016, pp. 126-132.
- [6] V. T. Pham, Q. D. Tran, T. H. Nguyen, and V. T. Nguyen, "Synthesis of reduced graphene oxide - $\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ - prussian blue nanocomposite materials for cesium adsorption from aqueous solution," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 203, pp. 5-13, 2019.
- [7] P. Lunkenheimer, S. Krohns, S. Riegg, S. G. Ebbinghaus, A. Reller, and A. Loidl, "Colossal dielectric constants in transition-metal oxides," *Eur. Phys. J. Special Topics*, vol. 180, no. 1, pp. 61-89, 2010.
- [8] D. T. Tran, D. L. Vu, V. H. Le, T. L. Phan, and S. C. Yu, "Spin reorientation and giant dielectric response in multiferroic $\text{La}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{NiO}_{4+\delta}$," *Adv. Natural Sci., Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 4, p. 025010(1-4), 2013.
- [9] H. Bayrakdar, "Complex permittivity, complex permeability and microwave absorption properties of ferrite-paraffin polymer composites," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 323, pp. 1882-1885, 2011.
- [10] J. Bi, C. Lin, D. Lu, A. Chen, and X. Meng, "Exchange coupled $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$ composites for enhanced microwave absorption properties by in-situ hydrothermal reduction," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 164, p. 110624(1-7), 2022.
- [11] Y. Cao, N. Farouk, N. Mortezaei, A. V. Yumashev, M. N. Akhtar, and A. Arabmarkadeh, "Investigation on microwave absorption characteristics of ternary MWCNTs/ CoFe_2O_4 / FeCo nanocomposite coated with conductive PEDOT-Polyaniline Co-polymers," *Ceramics International*, vol. 47, no. 9, pp. 12244-12251, 2021.
- [12] F. Ye, L. Zhang, X. Yin *et al.*, "Dielectric and EMW absorbing properties of PDCs-SiBCN annealed at different temperatures," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 33, no. 8, pp. 1469-1477, 2013.
- [13] T. Wang, R. Han, G. Tan, J. Wei, L. Qiao, and F. Li, "Reflection loss mechanism of single layer absorber for flake-shaped carbonyl-iron particle composite," *J. Appl. Phys.*, vol. 112, no. 10, p. 104903 (1-6), 2012.