

DESIGN AND ANALYSIS OF A METAMATERIAL-BASED FILTER FOR CO₂ SENSING

Nguyen Phon Hai^{1,4}, Do Khanh Tung², Bui Son Tung¹, Nguyen Thanh Tung², Bui Thi Hoa², Vu Thi Hong Hanh³, Do Thuy Chi³, Vu Dinh Lam¹, Ho Truong Giang², Pham Dinh Tuan⁵, Bui Xuan Khuyen^{1,2*}

¹Graduate University of Science and Technology – VAST, ²Institute of Materials Science – VAST

³TNU - University of Education, ⁴Air Defence-Air Force Academy, ⁵VNU University of Engineering and Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 08/7/2025	Infrared gas sensors are essential for environmental monitoring due to their ability to detect gases at very low concentrations with high accuracy. However, conventional nondispersive infrared systems typically rely on broadband thermal emitters combined with discrete optical filters, which result in high energy consumption, large system volume, and challenges in miniaturization and integration. This study addresses these limitations by proposing a metamaterial-based optical filter designed for selective transmission at the characteristic absorption wavelength of carbon dioxide, approximately 4.2 micrometers. The filter is theoretically designed to achieve high spectral selectivity, with simulated transmittance exceeding 90 percent and a full width at half maximum of about 180 nanometers. Theoretical analysis indicates a signal reduction ratio of approximately 3.8 percent at a source temperature of 573 K, demonstrating effective CO ₂ detection. These results confirm the potential of the proposed filter to significantly enhance infrared gas sensor performance. This approach offers a promising pathway toward compact, energy-efficient, and highly sensitive gas sensing systems for advanced environmental monitoring and portable detection applications.
Revised: 14/11/2025	
Published: 14/11/2025	
KEYWORDS	
Metamaterials	
Narrowband transmission	
IR gas sensor	
Spectral optical filter	
CO ₂ detection	

THIẾT KẾ VÀ PHÂN TÍCH BỘ LỌC DỰA TRÊN VẬT LIỆU BIẾN HÓA CHO CẢM BIẾN CO₂

Nguyễn Phồn Hai^{1,4}, Đỗ Khánh Tùng², Bùi Sơn Tùng¹, Nguyễn Thanh Tùng², Bùi Thị Hoa², Vũ Thị Hồng Hạnh³, Đỗ Thùy Chi³, Vũ Đình Lâm¹, Hồ Trường Giang², Phạm Đình Tuấn⁵, Bùi Xuân Khuyên^{1,2*}

¹Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

²Viện Khoa học Vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

³Trường Đại học Sư phạm - ĐH Thái Nguyên, ⁴Học viện Phòng không - Không quân

⁵Trường Đại học Công nghệ - ĐH Quốc gia Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 08/7/2025	Cảm biến khí hồng ngoại là công nghệ quan trọng trong giám sát môi trường nhờ khả năng phát hiện các loại khí ở nồng độ rất thấp với độ chính xác cao. Tuy nhiên, các hệ thống hồng ngoại không tán sắc truyền thống sử dụng nguồn phát phổ rộng và bộ lọc quang học riêng biệt, dẫn đến tiêu thụ năng lượng lớn và khó tích hợp. Nghiên cứu này đề xuất một bộ lọc quang học dựa trên vật liệu biến hóa, được thiết kế để truyền chọn lọc tại bước sóng hấp thụ đặc trưng của khí CO ₂ , khoảng 4,26 μm. Bộ lọc đạt độ truyền qua trên 90%, độ rộng phổ tại nửa cực đại khoảng 180 nm. Phân tích lý thuyết cho thấy tỷ lệ suy giảm tín hiệu đạt khoảng 3,8% tại nhiệt độ nguồn phát 573 K, cho thấy khả năng phát hiện khí CO ₂ hiệu quả. Kết quả cho thấy tiềm năng ứng dụng của bộ lọc trong các hệ thống cảm biến khí hồng ngoại nhỏ gọn, tiết kiệm năng lượng và độ nhạy cao cho các thiết bị giám sát môi trường hiện đại.
Ngày hoàn thiện: 14/11/2025	
Ngày đăng: 14/11/2025	
TỪ KHÓA	
Vật liệu biến hóa	
Truyền qua phổ hẹp	
Cảm biến khí hồng ngoại	
Bộ lọc quang học chọn lọc	
Phát hiện khí CO ₂	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13187>

* Corresponding author. Email: khuyenbx@ims.vast.ac.vn

1. Giới thiệu

Cảm biến khí đóng vai trò then chốt trong nhiều ứng dụng dân sự và quốc phòng, góp phần bảo vệ sức khỏe con người và môi trường thông qua việc giám sát chất lượng không khí theo thời gian thực và phát hiện sớm các khí độc hại. Trong số các công nghệ hiện nay, cảm biến quang học nhận được nhiều sự quan tâm nhờ khả năng thu nhỏ kích thước và tốc độ đáp ứng nhanh [1], [2]. Đặc biệt, cảm biến hồng ngoại (IR) cho phép phát hiện các khí ở nồng độ rất thấp, chỉ vài phần triệu (ppm) [3]. Tuy nhiên, các hệ thống truyền thống thường sử dụng nguồn phát nhiệt dải rộng kết hợp với bộ lọc phổ riêng biệt, dẫn đến tiêu thụ nhiều năng lượng và làm tăng độ phức tạp của thiết bị.

Trong những năm gần đây, vật liệu biến hoá (metamaterials – MMs) đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi nhằm khắc phục các hạn chế trên. Đây là các cấu trúc nhân tạo được thiết kế với hình học và vật liệu đặc biệt, cho phép kiểm soát tính chất điện từ ở cấp độ dưới bước sóng mà các vật liệu tự nhiên không thể đạt được [4] – [6]. Nhờ khả năng điều chỉnh phổ bức xạ và định hướng trường điện từ chính xác, vật liệu biến hoá đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như phát xạ nhiệt chọn lọc, bộ lọc quang phổ, thu hồi năng lượng, thiết bị y sinh và cảm biến có độ nhạy cao [7] – [12]. Một số nghiên cứu gần đây cho thấy việc tích hợp vật liệu biến hoá với các nguồn vi nhiệt có thể nâng cao hiệu suất phát xạ và giảm đáng kể mức tiêu thụ năng lượng so với các nguồn phát truyền thống dựa trên vật đen [13] – [15].

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất sử dụng bộ lọc quang học dựa trên vật liệu biến hoá – một cấu trúc có khả năng tạo ra phổ truyền chọn lọc thông qua cơ chế cộng hưởng plasmon hoặc cộng hưởng từ (magnetic polariton). Bộ lọc này cho phép truyền qua các bức xạ tại bước sóng hấp thụ đặc trưng của khí mục tiêu ($\sim 4,26 \mu\text{m}$ đối với khí CO_2), đồng thời phản xạ hoặc triệt tiêu các bước sóng không cần thiết, từ đó nâng cao tỷ số tín hiệu trên nhiễu và độ chính xác trong phát hiện.

Với cấu trúc ô cơ sở đề xuất mới (kiểu khe chữ thập đa lớp dành riêng cho phát hiện CO_2 tại bước sóng $4,26 \mu\text{m}$), hiệu suất tính toán cho cấu trúc cảm biến khí có thể được nâng cao do: độ truyền qua được đảm bảo trên 90%, băng thông hẹp (180 nm) và hoạt động không phụ thuộc phân cực. Đặc biệt, khác với các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào phát xạ hoặc hấp thụ nhiệt, công trình này khai thác vật liệu biến hoá như một bộ lọc quang học chọn lọc tích hợp trong hệ NDIR, hướng tới các hệ thống cảm biến nhỏ gọn, tiết kiệm năng lượng, đồng thời mở ra khả năng mở rộng nguyên lý này để phát hiện nhiều loại khí khác bằng cách điều chỉnh hình học cấu trúc.

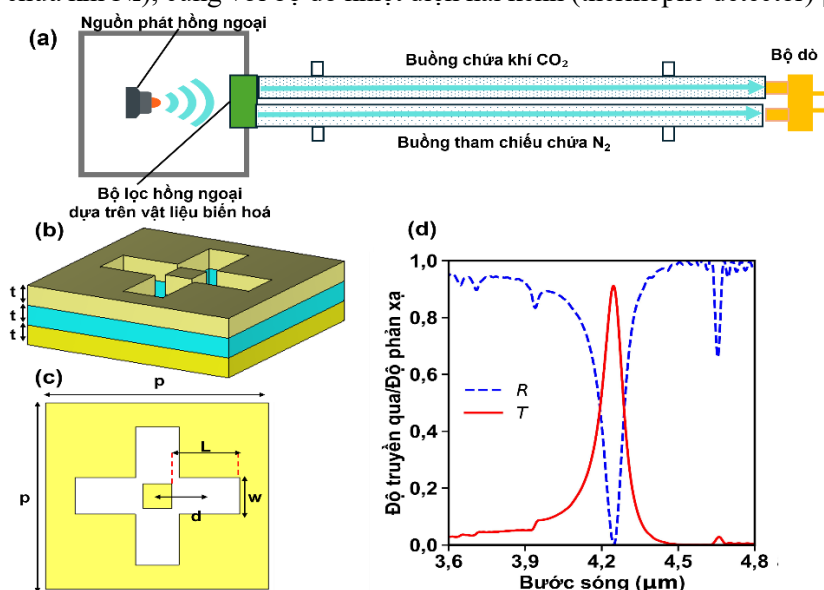
Một ưu điểm quan trọng của bộ lọc biến hoá là khả năng hoạt động ổn định ở nhiệt độ thấp hơn nhiều so với các bộ phát nhiệt, qua đó giảm yêu cầu về độ bền nhiệt và giúp kéo dài tuổi thọ, tăng độ tin cậy của hệ thống. Hơn nữa, bộ lọc có thể dễ dàng tích hợp với nhiều loại nguồn phát khác nhau, bao gồm cả nguồn phát dạng vật đen, mà không cần điều chỉnh vật liệu phát xạ, tạo điều kiện thuận lợi cho thiết kế hệ thống cảm biến linh hoạt và dễ triển khai. Với những ưu thế nêu trên, bộ lọc biến hoá là một lựa chọn đầy hứa hẹn cho các hệ thống cảm biến khí CO_2 tiên tiến, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu tiêu thụ năng lượng thấp, độ ổn định cao và khả năng tích hợp vi mô cho phép thu nhỏ quang trình, giảm kích cỡ cảm biến khí, đồng thời đảm bảo độ nhạy theo dõi trong thời gian thực trong hệ thống IoTs. Đặc biệt, kết quả từ bài báo này sẽ là nền tảng quan trọng cho việc phát triển hệ cảm biến khí CO_2 trong hệ thống giám sát môi trường trong nuôi trồng nấm ăn công nghệ cao.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Thiết kế cấu trúc bộ lọc dựa trên vật liệu biến hoá

Cấu hình cảm biến được minh họa trong Hình 1a tuân theo nguyên lý của hệ thống hồng ngoại không tán xạ (NDIR) – một cấu trúc phổ biến trong các ứng dụng phát hiện khí. Hệ thống bao gồm bốn thành phần chính: nguồn bức xạ hồng ngoại (IR) dạng vật đen tuyệt đối, bộ lọc quang học chọn

lọc bước sóng dựa trên vật liệu biến hoá, hai buồng khí (một buồng mẫu chứa CO_2 và một buồng tham chiếu chứa khí N_2), cùng với bộ dò nhiệt điện hai kênh (thermopile detector) [13], [15].



Hình 1. (a) Cấu hình cảm biến khí; (b) (c) Cấu trúc bộ lọc dựa trên vật liệu biến hoá (góc nhìn ba chiều và nhìn từ trên xuống); (d) Phổ truyền qua và phản xạ

Ánh sáng hồng ngoại phát ra từ nguồn IR trước tiên đi qua bộ lọc metamaterial, được thiết kế để truyền chọn lọc bức xạ tại bước sóng $4,26 \mu\text{m}$ – là bước sóng hấp thụ đặc trưng của khí CO_2 . Bức xạ sau đó đi qua cả hai buồng khí. Buồng tham chiếu chứa khí nitơ – vốn không hấp thụ trong vùng bước sóng quan tâm – cho phép gần như toàn bộ bức xạ đi tới kênh tham chiếu của bộ dò. Trong khi đó, nếu trong buồng mẫu có chứa CO_2 , phần bức xạ tại $4,26 \mu\text{m}$ sẽ bị hấp thụ, dẫn đến tín hiệu suy giảm tại kênh tương ứng của bộ dò.

Bộ dò hai kênh đo đồng thời cường độ bức xạ truyền qua từ cả hai buồng khí. Sự chênh lệch tín hiệu giữa hai kênh tỷ lệ thuận với nồng độ CO_2 trong buồng mẫu, tuân theo định luật Beer–Lambert.

Cấu trúc bộ lọc quang học dựa trên vật liệu biến hoá được thiết kế dưới dạng mảng lỗ chữ nhật bố trí theo hình chữ thập trong mặt phẳng xy, tạo nên một cấu trúc không phân cực với khả năng truyền phổ hẹp. Trong Hình 1(b)–(c), lớp kim loại trên cùng được chế tạo từ bạc (Ag), có vai trò định hình khe chữ thập (cross-shaped slot) và kích thích cộng hưởng plasmon bề mặt. Lớp điện môi ở giữa được làm bằng silicon (Si), giúp tăng cường cộng hưởng từ (magnetic polariton) và hỗ trợ truyền dẫn sóng dẫn điện từ. Lớp nền phía dưới cũng bằng bạc (Ag), đóng vai trò như một gương phản xạ toàn phần, giúp tăng mật độ điện từ nội tại và ngăn ánh sáng truyền qua. Hai loại vật liệu này được lựa chọn nhờ có đặc trưng quang học phù hợp trong vùng hồng ngoại trung; các hằng số điện môi, độ dẫn điện và tham số điện từ của Ag và Si được tham khảo từ các tài liệu [16], [17]. Cấu trúc ô đơn vị được xác định bởi các tham số hình học sau: chiều dài khe chữ thập $L = 1,4 \mu\text{m}$, chiều rộng $w = 0,9 \mu\text{m}$, khoảng cách từ tâm khe đến tâm ô $d = 1,0 \mu\text{m}$, và chu kỳ mạng $p = 4,6 \mu\text{m}$, đồng nhất theo cả hai phương x và y. Các lớp kim loại và điện môi được sắp xếp xen kẽ theo phương z, mỗi lớp có độ dày bằng nhau là $t = 0,2 \mu\text{m}$.

2.2. Phương pháp mô phỏng

Nghiên cứu được thực hiện hoàn toàn bằng mô phỏng số, với mô hình bộ lọc dựa trên vật liệu biến hoá được xây dựng trong CST Studio Suite để phân tích đặc tính quang học. Các điều kiện biên tuần hoàn được áp dụng theo hai phương ngang (x, y), trong khi phương truyền sóng (z) được thiết lập dạng hở để mô phỏng bức xạ truyền qua và phản xạ. Sóng phẳng tới có phân cực

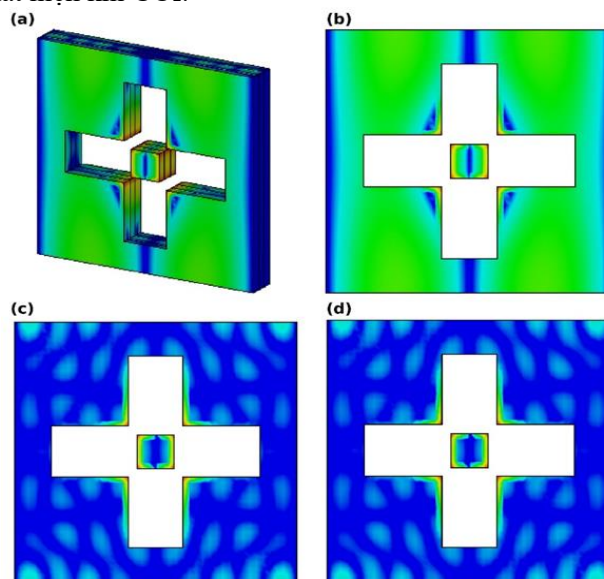
vuông góc với cấu trúc, quét trong vùng bước sóng từ 3,6 μm đến 4,8 μm , nhằm thu được phổ truyền qua và phổ phản xạ của bộ lọc.

Ngoài ra, để nghiên cứu cơ chế cộng hưởng điện từ trong cấu trúc, phân bố điện trường ba chiều tại các bước sóng cộng hưởng được tính toán bằng phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method – FEM) tích hợp trong CST. Kết quả này giúp quan sát sự tập trung điện trường tại các vị trí khe chữ thập, xác định vai trò của các hiệu ứng cộng hưởng plasmon bề mặt và magnetic polariton. Từ đó, các tham số hình học được tinh chỉnh trong quá trình tối ưu để đạt hiệu suất truyền cao nhất và phổ cộng hưởng hẹp.

3. Kết quả và bàn luận

Phổ truyền qua và phản xạ của cấu trúc được minh họa trong Hình 1(d). Trong dải bước sóng từ 3,6 μm đến 4,8 μm , cấu trúc cho thấy một đỉnh truyền chọn lọc rõ rệt tại khoảng 4,26 μm , với giá trị truyền qua đạt khoảng 90%, trong khi phản xạ đồng thời giảm xuống gần như bằng 0 ($R \approx 0$). Đây là đặc trưng của hiện tượng cộng hưởng điện từ mạnh, cho phép bức xạ tại bước sóng cộng hưởng truyền xuyên hiệu quả qua bộ lọc. Ngược lại, ngoài vùng cộng hưởng, đặc biệt trong các khoảng từ 3,6 đến 4,0 μm và từ 4,4 đến 4,8 μm , tín hiệu truyền qua suy giảm đáng kể trong khi phản xạ tăng gần đến 1. Điều này cho thấy cấu trúc hoạt động như một gương phản xạ phổ rộng, chỉ cho phép truyền chọn lọc tại một bước sóng duy nhất.

Độ rộng phổ tại nửa cực đại (FWHM) đạt khoảng 180 nm, phản ánh tính chọn lọc phổ cao của cấu trúc. Giá trị này đủ hẹp để phù hợp với dải hấp thụ đặc trưng của khí CO_2 tại 4,26 μm , đồng thời vẫn đảm bảo độ ổn định phổ khi có sai lệch nhỏ trong bước sóng nguồn phát. Cơ chế tạo nên đặc tính phổ chọn lọc này là sự kết hợp giữa cộng hưởng plasmon bề mặt, magnetic polariton và hiệu ứng giao thoa Fabry-Pérot trong cấu trúc nhiều lớp kim loại–điện môi [18]. Kết quả cho thấy bộ lọc đề xuất là ứng viên tiềm năng cho các cảm biến hồng ngoại đơn bước sóng có độ chính xác cao trong phát hiện khí CO_2 .



Hình 2. Phân bố cường độ điện trường tại bước sóng cộng hưởng ($\lambda \approx 4,26 \mu\text{m}$) trong cấu trúc bộ lọc metamaterial: (a) Phân bố điện trường ba chiều (3D view) của toàn bộ cấu trúc; (b) Phân bố điện trường tại lớp kim loại trên cùng; (c) Phân bố điện trường tại lớp điện môi giữa; (d) Phân bố điện trường tại lớp kim loại dưới cùng

Hình 2(a)–(d) biểu diễn phân bố cường độ điện trường tại bước sóng cộng hưởng trong cấu trúc bộ lọc metamaterial nhằm minh họa cơ chế truyền chọn lọc. Hình 2(a) là ảnh ba chiều cho thấy điện trường tập trung mạnh tại mép các khe chữ thập và khu vực trung tâm lớp giữa, phản

ánh sự kích hoạt plasmon bề mặt cục bộ (LSPR). Hình 2(b) thể hiện phân bố điện trường tại lớp kim loại trên cùng, nơi trường tập trung rõ rệt quanh rìa khe với đối xứng cao, cho thấy hiệu ứng plasmon hoạt động đồng đều theo cả hai phương x và y. Hình 2(c) mô tả trường tại lớp điện môi, nơi cường độ vẫn được duy trì và tăng cường tại vùng lõi khe, biểu hiện vai trò của cộng hưởng từ (magnetic polariton). Hình 2(d) trình bày phân bố tại lớp kim loại dưới cùng, với trường điện tập trung yếu hơn nhưng vẫn thể hiện sự hỗ trợ phản xạ và giữ cộng hưởng nội tại. Sự phân bố đồng đều và mạnh ở cả hai hướng phân cực xác nhận cấu trúc hoạt động không phụ thuộc phân cực, phù hợp với các ứng dụng cảm biến quang học hồng ngoại.

Phổ truyền qua của bộ lọc metamaterial chịu ảnh hưởng mạnh mẽ bởi các tham số hình học trong cấu trúc ô đơn vị, bao gồm chu kỳ mạng p , chiều rộng khe w , chiều dài nhánh chữ thập L , và độ dày lớp điện môi t . Cụ thể, khi chu kỳ mạng p tăng từ $4,4 \mu\text{m}$ lên $4,8 \mu\text{m}$ (Hình 3a), đỉnh cộng hưởng trong phổ truyền qua dịch chuyển từ khoảng $4,1 \mu\text{m}$ sang gần $4,4 \mu\text{m}$, thể hiện xu hướng dịch về vùng bước sóng dài hơn (redshift).

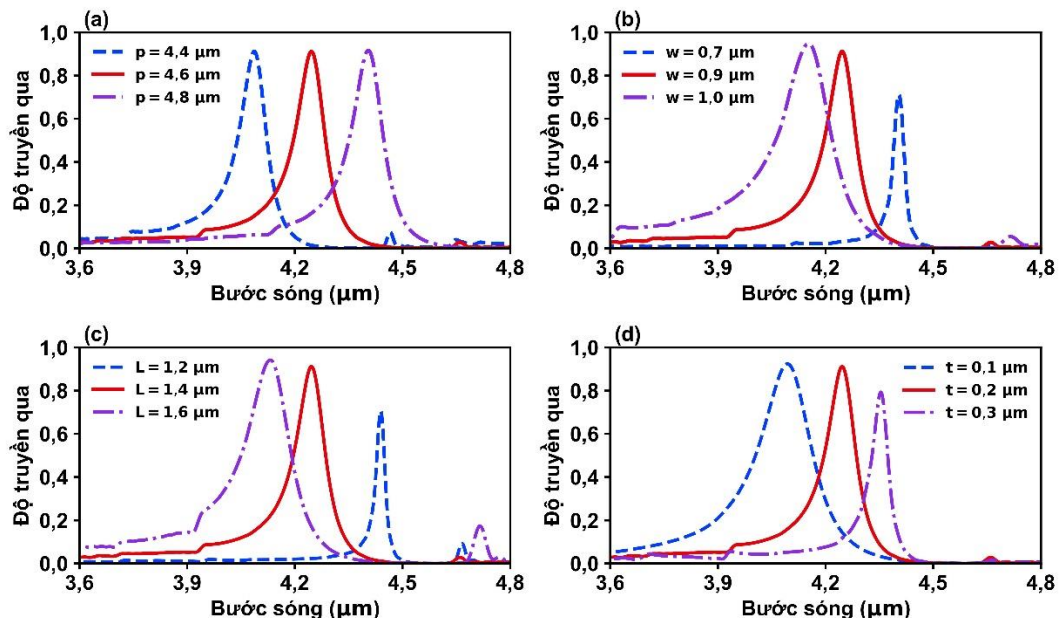
Sự dịch chuyển của bước sóng cộng hưởng trong phổ truyền qua có thể được lý giải dựa trên cơ chế plasmon bề mặt (surface plasmon wave – SPW). Khi ánh sáng chiếu tới bề mặt kim loại, các plasmon bề mặt được kích thích tại giao diện kim loại–điện môi và lan truyền với véc-tơ sóng được xác định bởi phương trình [18]:

$$k_{sp} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \quad (1)$$

trong đó k_0 là số sóng trong chân không, ϵ_1 và ϵ_2 lần lượt là hằng số điện môi của kim loại và lớp điện môi. Trong cấu trúc mạng lỗ tuần hoàn hai chiều, véc-tơ sóng SPW bị điều chỉnh bởi tán xạ Bragg bậc cao, thông qua các véc-tơ mạng nghịch đảo:

$$k_{spx} = k_x + i \frac{2\pi}{p_x} + j \frac{2\pi}{p_y} \quad (2)$$

trong đó i, j là số nguyên. Khi chu kỳ mạng tăng, kéo theo sự dịch chuyển của đỉnh cộng hưởng về phía bước sóng dài hơn phù hợp với kết quả mô phỏng thu được.



Hình 3. Phổ truyền qua của cấu trúc bộ lọc metamaterial khi thay đổi các thông số hình học:

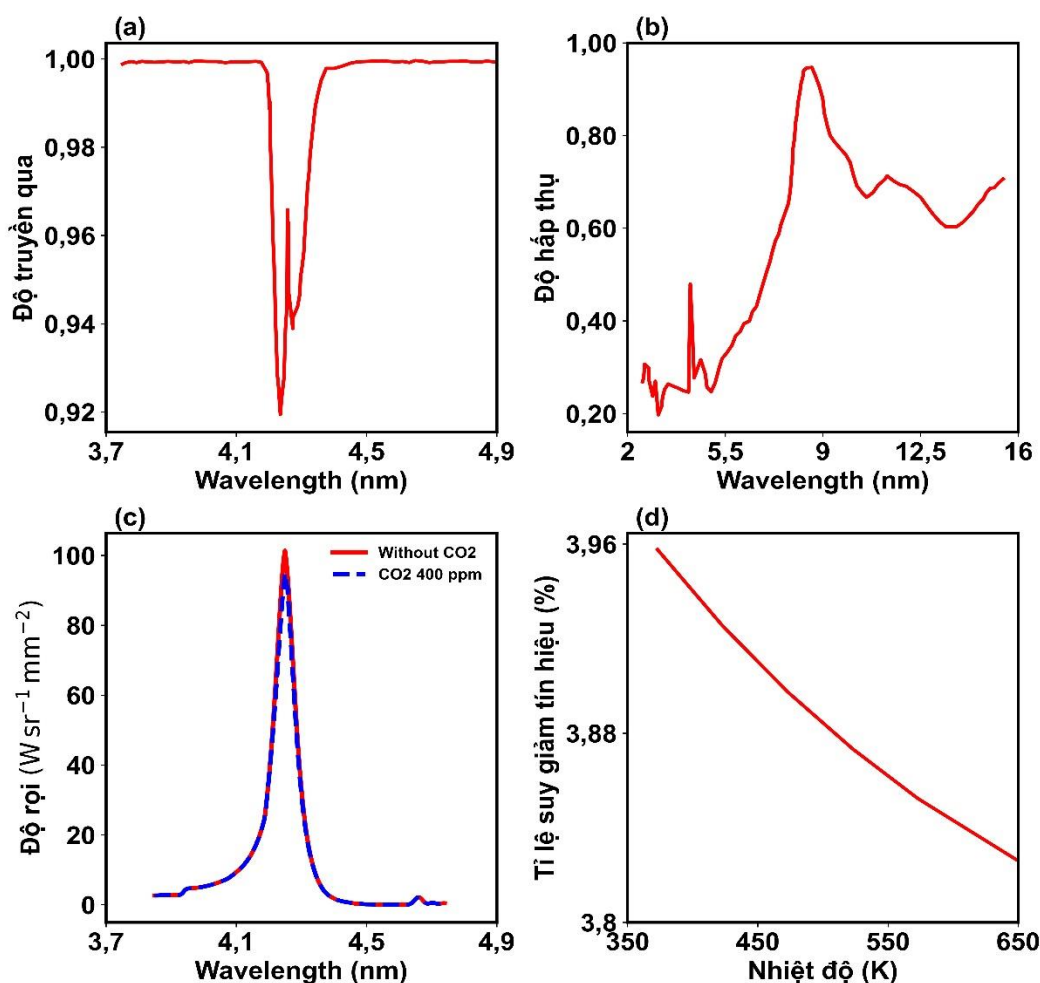
(a) Ảnh hưởng của chu kỳ mạng p ; (b) Ảnh hưởng của chiều rộng khe w ; (c) Ảnh hưởng của chiều dài nhánh chữ thập L ; (d) Ảnh hưởng của độ dày các lớp điện môi và kim loại t

Ngược lại, đối với các tham số hình học bên trong ô đơn vị như chiều rộng khe w (Hình 3b) và chiều dài nhánh chữ thập L (Hình 3c), khi các giá trị này tăng, đỉnh truyền qua trong phổ có xu hướng dịch về phía bước sóng ngắn hơn (blueshift). Cuối cùng, khi độ dày lớp điện môi t tăng từ $0,1\text{ }\mu\text{m}$ lên $0,3\text{ }\mu\text{m}$ (Hình 3d), đỉnh cộng hưởng lại dịch về phía bước sóng dài hơn, cho thấy sự điều chỉnh phổ rõ rệt theo chiều dày lớp dẫn sóng theo phương thẳng đứng.

Để đánh giá hiệu suất của hệ thống, năng lượng bức xạ được bộ dò hấp thụ có thể được tính toán bằng cách tích phân phổ bức xạ theo công thức sau [19], [20]:

$$I = \int I_{\lambda} = \int B_T(\lambda, T) \cdot R(\lambda) \cdot T_C(\lambda) \cdot \alpha(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

trong đó $B_{\lambda T}$ là bức xạ phổ của một vật đen lý tưởng tại nhiệt độ T , được xác định theo định luật Planck [20]. T_C biểu thị phổ truyền qua của CO_2 trong buồng khí và phụ thuộc vào nồng độ CO_2 [21] và thể hiện trong Hình 4(a). R là phổ phản xạ của gương phản xạ metamaterial và $\alpha(\lambda)$ là phổ hấp thụ của bộ dò. Bộ dò được sử dụng trong phân tích này là thermopile, với đặc tính hấp thụ được lấy từ tài liệu tham khảo [22] và minh họa trong Hình 4(b).



Hình 4. (a) Phổ truyền qua của CO_2 tại nồng độ 400 ppm trong một buồng khí dài 15 cm [17]; (b) Phổ hấp thụ của bộ dò nhiệt điện (thermopile) [20]; (c) Bức xạ phổ được hấp thụ bởi thermopile tại nhiệt độ nguồn hồng ngoại 573 K; (d) Sự phụ thuộc của độ suy giảm tín hiệu vào nhiệt độ của nguồn hồng ngoại

Hình 4(c) minh họa bức xạ phổ được hấp thụ bởi bộ dò nhiệt điện. Như quan sát được, bức xạ phổ giảm xung quanh bước sóng hấp thụ đặc trưng của CO_2 khi có mặt CO_2 trong buồng khí. Sự suy giảm này xảy ra do một phần bức xạ hồng ngoại phát ra từ nguồn IR bị các phân tử CO_2 hấp

thụ trước khi đến được bộ dò. Để định lượng hiệu ứng này, chúng tôi định nghĩa tỷ lệ suy giảm tín hiệu như sau:

$$S = \frac{I_0 - I_{gas}}{I_0} \quad (4)$$

trong đó, I_0 là bức xạ được hấp thụ bởi bộ dò thermopile khi không có CO₂, và I_{gas} là bức xạ được hấp thụ khi có CO₂ hiện diện. Tỷ lệ này cung cấp một thước đo chuẩn hóa về mức suy giảm tín hiệu tại bộ dò do sự hấp thụ khí, và được sử dụng để đánh giá độ nhạy của hệ thống phát hiện. Hình 4(d) cho thấy mối quan hệ giữa nhiệt độ của nguồn hồng ngoại và tỷ lệ suy giảm tín hiệu. Khi nhiệt độ của nguồn hồng ngoại tăng, tỷ lệ suy giảm tín hiệu giảm. Tại nhiệt độ nguồn IR là 573 K, tỷ lệ suy giảm tín hiệu đạt khoảng 3,8%.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã phát triển và phân tích một cấu trúc bộ lọc quang học sử dụng vật liệu biến hoá (metamaterial) hoạt động trong vùng trung hồng ngoại, với khả năng truyền chọn lọc tại bước sóng cộng hưởng đặc trưng của CO₂. Kết quả mô phỏng cho thấy cấu trúc không chỉ đạt hiệu suất truyền cao và phổ cộng hưởng hẹp, mà còn duy trì tính ổn định nhờ không phải chịu nhiệt độ cao như các cấu trúc phát xạ, qua đó thể hiện tiềm năng ứng dụng thực tiễn trong các hệ thống cảm biến khí cho theo dõi tham số môi trường theo thời gian thực, phục vụ cho sản xuất nông nghiệp công nghệ cao, đặc biệt phù hợp cho nuôi trồng nấm ăn.

Việc sử dụng metamaterial thay thế cho các bộ lọc quang học truyền thống góp phần đơn giản hóa thiết kế, giảm tiêu thụ năng lượng và mở ra hướng tích hợp cảm biến ở quy mô vi mô. Ngoài phát hiện CO₂, nguyên lý thiết kế có thể được mở rộng để phát hiện các khí hấp thụ ở các bước sóng khác nhau, thông qua điều chỉnh hình học cấu trúc.

Lời cảm ơn

Công trình nghiên cứu này được tài trợ bởi Chương trình phát triển vật lý giai đoạn 2021-2025, Đề tài mã số ĐTĐLCN.18/23.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] R. Stanley, "Plasmonics in the mid-infrared," *Nat. Photonics*, vol. 6, pp. 409–411, 2012.
- [2] P. Kumar, L. Morawska, C. Martani, G. Biskos, M. Neophytou, S. Di Sabatino, M. Bell, L. Norford, and R. Britter, "The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities," *Environ. Int.*, vol. 75, pp. 199–205, 2015.
- [3] J. Hodgkinson and R. P. Tatam, "Optical gas sensing: a review," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24, 2013, Art. no. 012004.
- [4] H. A. Nguyen, T. S. Pham, B. S. Tung, B. X. Khuyen, D. T. Le, H. Y. Vu, D. L. Vu, and N. T. Hien, "Metamaterials based on hyperbolic-graphene composite: A pathway from positive to negative refractive index at terahertz," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 248, 2025, Art. no. 113574.
- [5] K. Fan, R. D. Averitt, and W. J. Padilla, "Active and tunable nanophotonic metamaterials," *Nanophotonics*, vol. 11, pp. 3769–3803, 2022.
- [6] M. Li, H. Xu, X. Yang, H. Xu, P. Liu, L. He, G. Nie, Y. Dong, and Z. Chen, "Tunable plasma-induced transparency of a novel graphene-based metamaterial," *Results Phys.*, vol. 52, 2023, Art. no. 106798.
- [7] H. Ou, F. Lu, Z. Xu, and Y.-S. Lin, "Terahertz metamaterial with multiple resonances for biosensing application," *Nanomaterials*, vol. 10, 2020, Art. no. 1038.
- [8] T. C. Do, B. X. Khuyen, B. S. Tung, N. N. Viet, D. T. Ha, V. T. H. Hanh, X. P. Do, D. K. Tung, H. A. Nguyen, and V. D. Lam, "Wide-angle electromagnetic wave absorption via multilayer metamaterial structures," *Phys. Scr.*, vol. 100, 2025, Art. no. 025538.
- [9] Y. Qu, Y. Chen, S. Chen, Q. Wu, J. Liu, Z. Yi, and L. Fu, "Research on multi-resonance mechanism to achieve ultra-wideband high absorption of a metamaterial absorber in the UV to MIR range," *Chin. J. Phys.*, vol. 91, pp. 632–643, 2024.

-
- [10] Y. Chen, J. Liang, S. Chen, Z. Yi, L. Fu, and W. Yang, "Bi-directional high-performance metamaterial perfect absorber for solar harvesting and refractive index sensing," *Mater. Today Nano*, vol. 26, 2024, Art. no. 100487.
- [11] R. Bhati and A. K. Malik, "Multiband terahertz metamaterial perfect absorber for microorganisms detection," *Sci. Rep.*, vol. 13, 2023, Art. no. 19685.
- [12] W. Gao, F. Chen, and W. Yang, "Temperature and refractive index sensor based on perfect absorber in InSb double rectangular ring resonator metamaterials," *Mater. Today Commun.*, vol. 40, 2024, Art. no. 109461.
- [13] H. T. Miyazaki, T. Kasaya, M. Iwanaga, B. Choi, Y. Sugimoto, and K. Sakoda, "Dual-band infrared metasurface thermal emitter for CO₂ sensing," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, 2014, Art. no. 121107.
- [14] B. X. Khuyen, N. V. Ngoc, D. N. Dung, N. P. Hai, N. T. Tung, B. S. Tung, V. D. Lam, H. T. Giang, P. D. Tan, L. Chen, H. Zheng, and Y. P. Lee, "Dual-band infrared metamaterial perfect absorber for narrow-band thermal emitters," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 57, 2024, Art. no. 285501.
- [15] B. X. Khuyen, P. D. Tan, B. S. Tung, N. P. Hai, P. D. Tuan, D. X. Phong, D. K. Tung, N. H. Anh, H. T. Giang, N. P. Vinh, N. T. Tung, V. D. Lam, L. Chen, and Y. P. Lee, "Numerical optimization of metamaterial-enhanced infrared emitters for ultra-low power consumption," *Photonics*, vol. 12, no. 6, 2025, Art. no. 583.
- [16] S. Babar and J. H. Weaver, "Optical constants of Cu, Ag, and Au revisited," *Appl. Opt.*, vol. 54, pp. 477–481, 2015.
- [17] H. H. Li, "Refractive index of silicon and germanium and its wavelength and temperature derivatives," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 9, pp. 561–658, 1980.
- [18] X. C. Wu, X. Xu, C. Cai, H. Wu, and G. Bi, "Non-polarized and ultra-narrow band filter in MIR based on multilayer metasurface," *Heliyon*, vol. 9, no. 11, 2023, Art. no. e21303.
- [19] H. Tan, J. J. Cadusch, J. Meng, and K. B. Crozier, "Genetic optimization of mid-infrared filters for a machine learning chemical classifier," *Opt. Express*, vol. 30, no. 11, pp. 18330–18344, 2022.
- [20] D. Pitts and L. E. Sissom, *Schaum's Outline of Heat Transfer*, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 2011.
- [21] A. Livingood, J. R. Nolen, T. G. Folland, L. Potechin, G. Lu, S. Criswell, J.-P. Maria, C. T. Shelton, E. Sachet, and J. D. Caldwell, "Filterless nondispersive infrared sensing using narrowband infrared emitting metamaterials," *ACS Photonics*, vol. 8, pp. 1477–1486, 2021.
- [22] D. Popa, S. Z. Ali, R. Hopper, Y. Dai, and F. Udrea, "Smart CMOS mid-infrared sensor array," *Opt. Lett.*, vol. 44, no. 17, pp. 4111–4114, 2019.