

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

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

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Phạm Duy Tân

**NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VẬT LIỆU BIẾN HÓA
(METAMATERIALS) ỨNG DỤNG TRONG
CẢM BIẾN NDIR PHÁT HIỆN KHÍ CO₂**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Vật liệu điện tử

Mã số: 9 44 01 23

Hà Nội – 2026

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. Bùi Xuân Khuyến, Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam
2. Người hướng dẫn 2: TS. Hồ Trường Giang Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Phản biện 1: PGS.TS. Ngô Quang Minh, Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Phản biện 2: PGS.TS. Nguyễn Thị Hòa, Trường Đại học Giao thông vận tải, Bộ Giáo dục và Đào tạo

Phản biện 3: PGS.TS. Nguyễn Thị Hiền, Trường Đại học Khoa học, Đại học Thái Nguyên, Bộ Giáo dục và Đào tạo

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi 14 giờ 00, Thứ Sáu, ngày 30 tháng 01 năm 2026.

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

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu gia tăng, việc giám sát chất lượng không khí và khí thải nông nghiệp đóng vai trò then chốt đối với phát triển bền vững và bảo vệ sức khỏe cộng đồng. Tại các quốc gia đang phát triển như Việt Nam, hệ thống giám sát khí thải và vi khí hậu nông nghiệp còn hạn chế do chi phí cao và thiếu các thiết bị cảm biến chính xác, nhỏ gọn, đặc biệt cho khí CO₂.

Đối với khí CO₂, vai trò của nó trong nông nghiệp là rất đa dạng: CO₂ là nguyên liệu cho quang hợp, nồng độ tối ưu (800–1000 ppm) có thể làm tăng năng suất rau từ 20–40% [Wageningen]. CO₂ ảnh hưởng đến sinh trưởng của nấm và vi sinh vật đất, đồng thời là khí nhà kính chủ yếu (76% từ nông nghiệp theo FAO, 2021). Sự thoát CO₂ từ đất bị xói mòn làm giảm độ phì nhiêu và góp phần vào biến đổi khí hậu.

Thách thức của cảm biến khí hiện nay: các cảm biến khí hiện có thể chia thành hai nhóm:

- Cảm biến hóa học (điện hóa, MOS, PID): giá rẻ nhưng độ trôi cao, tuổi thọ ngắn, thiếu chọn lọc.
- Cảm biến vật lý (UV, NDIR): độ bền cao, chọn lọc tốt hơn, nhưng giá thành đắt và cồng kềnh.

Cảm biến NDIR (Non-Dispersive Infrared) dựa trên nguyên lý hấp thụ hồng ngoại đặc trưng của khí, cho độ chọn lọc và độ tin cậy cao. Tuy nhiên, NDIR truyền thống sử dụng nguồn phát băng rộng và bộ lọc quang học, dẫn đến lãng phí năng lượng và giới hạn độ nhạy ở nồng độ thấp. Việc tăng cường độ nguồn phát hoặc quang trình làm tăng kích thước và chi phí hệ thống.

Giải pháp từ MMs (Metamaterials - MMs):

MMs là vật liệu nhân tạo có cấu trúc tuần hoàn ở quy mô dưới bước sóng, cho phép điều khiển sóng điện từ theo cách chưa từng có trong tự nhiên. Trong cảm biến khí, MMs có thể được tích hợp để:

- Thay thế bộ lọc quang học truyền thống bằng cấu trúc siêu bề mặt (metasurface) có độ chọn lọc cao.
- Tạo nguồn phát vi nhiệt dải hẹp thông qua cơ chế hấp thụ hoàn toàn (MPA) và phát xạ nhiệt tại bước sóng mong muốn.
- Tăng hiệu suất quang học và thu nhỏ kích thước cảm biến, phù hợp cho ứng dụng IoT và nông nghiệp công nghệ cao.

Tại Việt Nam, tiên phong trong lĩnh vực này cần kể đến Nhóm nghiên cứu của GS.TS. Vũ Đình Lâm tại GUST, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (VAST). Nhóm đã có nhiều công bố quốc tế uy tín liên quan đến vật liệu MM, đóng vai trò nòng cốt trong phát triển hướng nghiên cứu này tại Việt Nam. Ngoài ra, các hướng nghiên cứu liên quan về vật liệu MM đang được mở rộng tại các đơn vị khác như: PGS.TS. Trần Mạnh Cường (Trường Đại học Sư phạm Hà Nội), PGS.TS. Vũ Văn Yên (ĐH Bách khoa Hà Nội), PGS.TS. Nguyễn Thị Hiền (ĐH Thái Nguyên), TS. Lê Văn Quỳnh (Đại học VinUni), và PGS.TS. Nguyễn Thị Quỳnh Hoa (ĐH Vinh). Các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào mô phỏng và thiết kế, trong khi ứng dụng thực tế trong cảm biến khí còn hạn chế.

2. Mục tiêu và đóng góp của luận án

Luận án hướng đến chế tạo thành công vật liệu MMs ứng dụng trong cảm biến khí CO₂ tiên tiến, với các mục tiêu cụ thể:

- Làm rõ cơ chế tương tác của vật liệu MMs với bức xạ điện từ vùng hồng ngoại;
- Mô phỏng tính toán để tìm ra cấu trúc vật liệu MMs lọc lựa hồng ngoại tại vùng bước sóng đặc trưng (4,26 μm) khí CO₂ hấp thụ;
- Thử nghiệm chế tạo được vật liệu MMs cho tích hợp vào cảm biến hấp thụ hồng ngoại cấu hình không tán sắc (NDIR) đo khí CO₂.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn:

- Mô phỏng thành công được một số cấu trúc của vật liệu MMs tương tác vùng hồng ngoại cho áp dụng vào trong cảm biến NDIR, ở đó

gồm tích hợp trực tiếp vào nguồn phát vi nhiệt và lớp phản xạ để tạo ra bức xạ hồng ngoại dải hẹp (vùng 4,26 μm) đặc trưng cho khí CO_2 .

- Chế tạo thử nghiệm lớp vật liệu MMs cho áp dụng vào cấu hình phản xạ trong cảm biến NDIR đo khí CO_2 .

3. Cấu trúc luận án

Ngoài phần Mở đầu, Kết luận và Tài liệu tham khảo, luận án gồm 4 chương:

Chương 1: Tổng quan về vật liệu biến hóa ứng dụng trong cảm biến khí

Chương 2: Phương pháp nghiên cứu vật liệu biến hóa và thiết kế cấu trúc cảm biến NDIR

Chương 3: Thiết kế và tối ưu cấu trúc vật liệu biến hóa vào trong nguồn vi nhiệt

Chương 4: Thiết kế vật liệu biến hóa cho điều khiển phát xạ hồng ngoại trong cảm biến NDIR

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU BIẾN HÓA ỨNG DỤNG TRONG CẢM BIẾN KHÍ

1.1. Tổng quan về cảm biến khí hấp thụ hồng ngoại

1.1.1. Nguyên lý hoạt động của cảm biến khí CO_2

Nguyên lý hấp thụ hồng ngoại (NDIR): Dựa trên định luật Lambert-Beer:

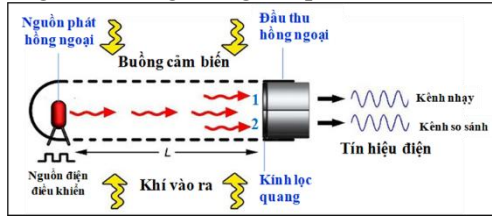
$$I = I_0 e^{-\alpha lc} \quad (1.1)$$

trong đó α là hệ số hấp thụ đặc trưng của CO_2 tại 4.26 μm . Đây là phương pháp tối ưu với độ chọn lọc cao, dải đo rộng (ppm đến %vol), thời gian đáp ứng nhanh (vài giây) và tuổi thọ cao.

Cảm biến NDIR thường dùng cấu hình hai kênh (Hình 1.3): một kênh đo tại 4.26 μm (nhạy với CO_2) và một kênh tham chiếu tại 3.9 μm (không bị hấp thụ). Nồng độ CO_2 được tính theo công thức:

$$c = -q \ln \left(\frac{U_1}{U_2} \right) \quad (1.5)$$

giúp loại bỏ ảnh hưởng của cường độ nguồn phát và nhiễu môi trường.



Hình 1.3: Cảm biến khí dựa trên nguyên lý hấp thụ hồng ngoại với cấu hình không tán sắc (NDIR) hai kênh thu.

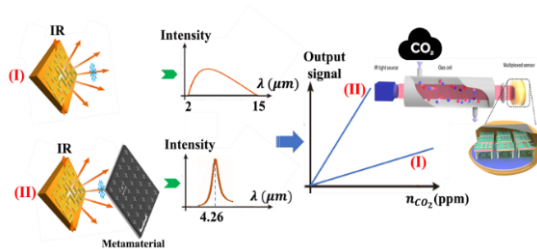
1.1.2. Các phương thức cải tiến cảm biến NDIR

Cảm biến NDIR truyền thống có hạn chế do sử dụng nguồn phát băng rộng và bộ lọc quang, dẫn đến lãng phí năng lượng. Các giải pháp cải tiến bao gồm:

Tăng cường độ nguồn phát → Giảm tuổi thọ.

Tăng chiều dài quang trình → Tăng kích thước hệ thống.

Dùng nguồn laser dải hẹp → Chi phí cao.



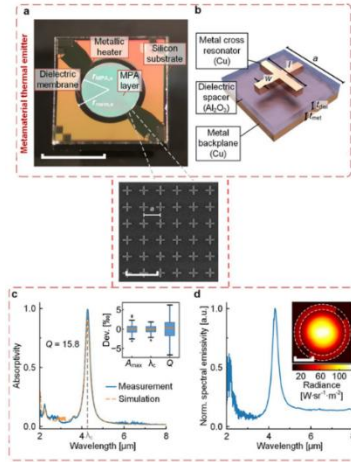
Hình 1.5: Minh họa tích hợp vật liệu metamaterials cho chế tạo cảm biến khí CO₂ tiên tiến dựa trên nguyên lý hấp thụ hồng ngoại

Tích hợp MMs (metamaterials - MMs): Chuyển đổi nguồn phát băng rộng thành dải hẹp tại bước sóng mục tiêu, giúp tăng hiệu suất, giảm kích thước và công suất tiêu thụ (Hình 1.5).

1.2. Một số mô hình áp dụng MMs cho cảm biến NDIR

1.2.1. Vật liệu MMs tích hợp trên bề mặt nguồn phát xạ hồng ngoại

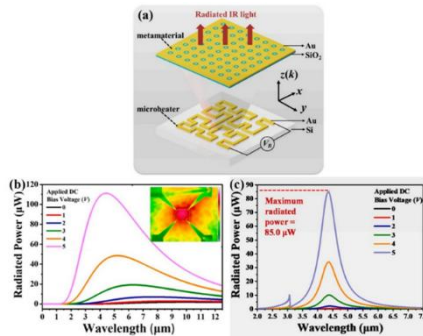
MMs hấp thụ hoàn toàn (Metamaterial Perfect Absorber - MPA) có cấu trúc ba lớp (kim loại-điện môi-kim loại) với lớp kim loại trên cùng là các cấu trúc cộng hưởng hình dấu cộng (Hình 1.6b). MPA đạt hệ số hấp thụ $\sim 100\%$ tại bước sóng thiết kế nhờ cơ chế cộng hưởng và phối hợp trở kháng. Khi tích hợp lên nguồn vi nhiệt, MPA biến đổi phổ phát xạ thành dải hẹp tại $4.26\text{ }\mu\text{m}$ (Hình 1.6d), giúp tăng cường độ nhạy và độ phân giải của cảm biến.



Hình 1.6. (a) Linh kiện phát hồng ngoại được tích hợp MMs , (b) cấu trúc ô cơ sở của MM, (c) phổ hấp thụ của MMs và (d) phổ phát xạ tương đối của linh kiện phát hồng ngoại được tích hợp MMs ; Hình đính kèm là ảnh bức xạ nhiệt tương ứng

1.2.2. Vật liệu biến hóa tích hợp gần nguồn phát xạ IR (truyền qua)

Một hướng nghiên cứu khác là sử dụng MMs theo dạng truyền qua nhằm thu hẹp dải phát xạ do Ruijia Xu và cộng sự đề xuất cũng thu được các kết quả khả quan [47]. Linh kiện này bao gồm một cấu trúc MMs truyền qua được tích hợp trên bộ vi nhiệt (Hình 1.7). Để thu hẹp độ bán rộng của phổ phát xạ hồng ngoại, cấu trúc MMs truyền qua được tích hợp lên bề mặt bộ vi nhiệt. Công suất bức xạ của bộ phát xạ IR được tích hợp MMs ở các giá trị điện áp phân cực DC khác nhau được thể hiện trong Hình 1.7(c).



Hình 1.7. (a) Bộ phát hồng ngoại dựa trên bộ vi nhiệt được tích hợp MMs truyền qua; (b) Công suất phát xạ của bộ vi nhiệt dưới các điện áp phân cực DC khác nhau. Hình đính kèm là ảnh bức xạ nhiệt được ghi nhận bởi máy đo bức xạ nhiệt và (c) Công suất phát xạ của bộ phát hồng ngoại được tích hợp MMs truyền qua dưới các nguồn điện khác nhau

1.3. Kết luận chương 1

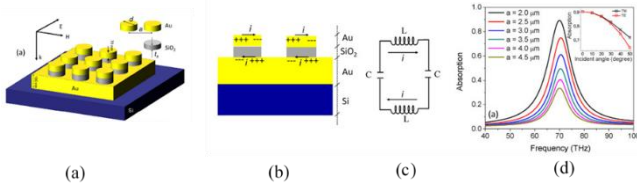
Như vậy, tích hợp MMs vào nguồn phát hồng ngoại dải rộng để tạo nguồn phát hồng ngoại dải hẹp là lĩnh vực nghiên cứu rất mới trên thế giới. Ưu điểm trong mô phỏng thiết kế cấu trúc MMs cho phép tạo bức xạ có vùng bước sóng hồng ngoại mong muốn, không chỉ mang lại các ứng dụng trong cảm biến NDIR đo khí CO₂ nguyên lý hấp thụ hồng ngoại mà còn có thể mở ra nhiều khả năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác. Lớp vật liệu MMs có thể được tích hợp trực tiếp trên bề mặt nguồn phát hoặc ở một khoảng cách nhất định. Khi đó, phổ hồng ngoại dải rộng từ nguồn phát khi đi qua lớp MMs tạo ra phổ hồng ngoại với các đỉnh phổ hẹp đặc trưng

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VẬT LIỆU BIẾN HÓA VÀ THIẾT KẾ CẤU TRÚC CẢM BIẾN NDIR

2.1. Phương pháp mô hình hóa sử dụng mạch LC tương đương

Cung cấp một công cụ đơn giản và trực quan để dự đoán nhanh tần số cộng hưởng của cấu trúc metamaterials (MMs) dựa trên các thông số hình

học và tính chất vật liệu. Trong mô hình này, các thành phần điện từ của MMs được mô phỏng bằng các cuộn cảm (L) và tụ điện (C).



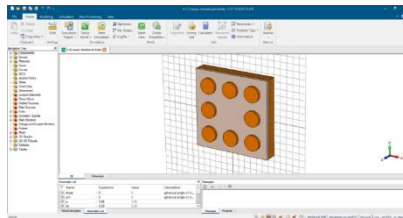
Hình 2.1. MMs cấu trúc disk-shape và mô hình mạch điện LC tương đương: (a) Cấu trúc MMs trong không gian ba chiều; (b) Cấu trúc các lớp vật liệu disk-shape; (c) Mô hình mạch điện LC tại tần số cộng hưởng từ và (d) Mô hình mạch điện LC tại tần số cộng hưởng điện

Nguyên lý cơ bản: Cấu trúc MMs (ví dụ: cặp đĩa kim loại) hoạt động như một mạch cộng hưởng RLC khi được kích thích bởi sóng điện từ. Tần số cộng hưởng từ (f_m) được xác định bằng công thức:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{2}{\pi^2 d \sqrt{\alpha \epsilon \mu}} \quad (2.2)$$

2.2. Phương pháp mô phỏng vật lý

Sử dụng phần mềm chuyên dụng như CST Microwave Studio và COMSOL Multiphysics dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để giải các phương trình Maxwell. Quy trình thiết kế: Xây dựng cấu trúc Unit Cell: Thiết kế một ô cơ sở của cấu trúc MMs (ví dụ: cấu trúc ba lớp kim loại-điện môi-kim loại với các pattern hình học phức tạp trên lớp trên cùng).

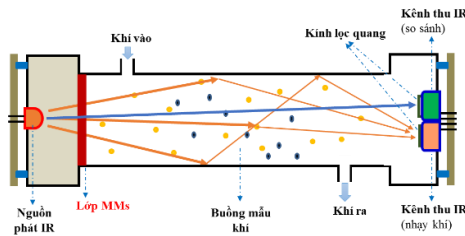


Hình 2.9. Cấu trúc MMs được dựng trong phần mềm CST.

Thiết lập điều kiện biên: Áp dụng điều kiện biên tuần hoàn (Periodic Boundary Conditions) để mô phỏng một mảng vô hạn các unit cell, mô phỏng chính xác mẫu vật liệu thực tế. Thiết lập nguồn kích thích và detector: Đặt sóng phẳng tới vuông góc và các đầu dò để thu thập các tham số tán xạ (S-parameters) như hệ số phản xạ (R), truyền qua (T) và từ đó tính toán hệ số hấp thụ ($A = 1 - R - T$).

2.3. Thiết kế cảm biến NDIR tích hợp MMs

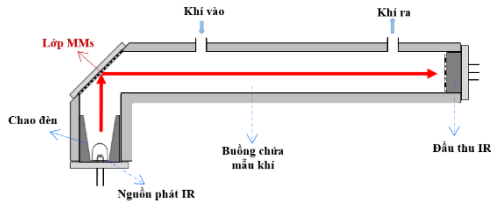
2.3.1. Cảm biến NDIR tích hợp MMs theo cấu hình truyền qua



Hình 2.13. Cấu hình cảm biến NDIR tích hợp MMs theo kiểu truyền qua.

Trong cấu trúc cảm biến này, lớp vật liệu MMs có thể được tích hợp ngay trên bề mặt của bộ phận phát IR (khi đó nguồn phát IR được sử dụng là dạng phẳng). Ưu điểm cách thức này năng lượng nhiệt và bức xạ hồng ngoại từ nguồn IR được lớp IR hấp thụ triệt để và phát ra các đỉnh hồng ngoại đặc trưng. Khi đó nguồn IR và lớp MMs có thể coi như một nguồn phát hồng ngoại thống nhất. Tuy vậy, kỹ thuật này có thể đòi hỏi việc chế tạo các lớp vật liệu khá phức tạp để tạo ra được nguồn phát hồng ngoại hoàn thiện. Một cách tiếp cận linh hoạt hơn, lớp vật liệu MMs để cách xa nguồn IR một khoảng cách nhất định. Khi đó lớp vật liệu MMs đóng vai trò hấp thụ và tương tác với bức xạ hồng ngoại để phát ra các bức xạ đặc trưng mong muốn. Cấu trúc cảm biến này có thể được sử dụng đa dạng cho các nguồn phát IR khác nhau. Trong luận án này, các nghiên cứu mới tập trung vào việc mô phỏng và thiết kế các trúc lớp vật liệu MMs để tìm ra được một số cấu trúc tối ưu để có thể áp dụng cho cấu hình cảm biến theo kiểu truyền qua này.

2.3.2. Cảm biến NDIR tích hợp MMs theo cấu hình phản xạ



Hình 2.14. Cấu hình cảm biến NDIR tích hợp MMs theo kiểu phản xạ.

Thiết kế này giới thiệu một phương pháp cải tiến thông qua việc tích hợp một lớp MMs, được thiết kế để chuyển đổi bức xạ hồng ngoại dải rộng thành bức xạ dải hẹp với chỉ một đỉnh mong muốn cho khí mục tiêu (với CO₂ là ở vùng 4,26 μm). Không giống như các bộ lọc quang học truyền thống, vốn chỉ cho phép khoảng 70–80% ánh sáng tại bước sóng mục tiêu đi qua, lớp MMs này hoạt động như một bộ chuyển đổi quang phổ. Cụ thể, lớp vật liệu MM hấp thụ bức xạ hồng ngoại dải rộng và tái phát xạ tập trung tại các bước sóng mong muốn. Đặc trưng này được cho là nhờ vào các hiệu ứng liên quan đến tương tác điện từ của các đơn vị cấu trúc trong MMs, và kết hợp với hấp thụ nhiệt từ bức xạ hồng ngoại. Phương pháp này có thể loại bỏ được nhu cầu sử dụng bộ lọc quang học truyền thống, từ đó đơn giản hóa cấu trúc hệ thống và giảm chi phí sản xuất.

2.4. Kết luận Chương 2

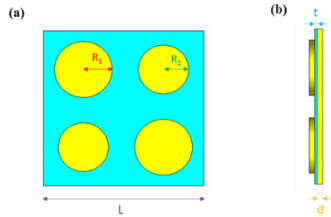
Cấu hình truyền qua và phản xạ của lớp vật liệu MMs vào cảm biến NDIR được tập trung nghiên cứu. Trong đó, cấu hình truyền qua tập trung vào việc thiết lập cấu hình tích hợp lớp vật liệu MMs để tạo ra một bộ phận như một nguồn phát hồng ngoại tiên tiến với các đỉnh đặc trưng cho phù hợp với khí CO₂. Trong khi đó, với cấu hình phản xạ, luận án này đi đến thiết kế để có thể chế tạo và áp dụng thử nghiệm vào cảm biến NDIR đo khí CO₂.

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ VÀ TỐI ƯU CẤU TRÚC VẬT LIỆU BIẾN HÓA VÀO TRONG NGUỒN VI NHIỆT

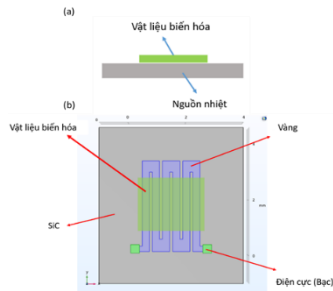
3.1. Nguồn vi nhiệt tạo đỉnh phát xạ đa cộng hưởng

3.1.1. Mô phỏng và thiết kế

Mục tiêu: Thiết kế một Metamaterial Perfect Absorber (MPA) có khả năng hấp thụ hoàn toàn và sau đó tái phát xạ thành bức xạ dải hẹp tại bước sóng mục tiêu $4.26\ \mu\text{m}$.



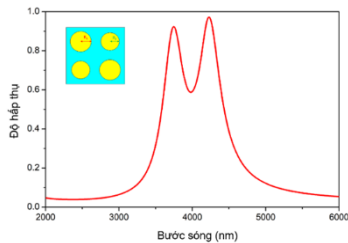
Hình 3.1. Cấu trúc ô cơ sở MMs (a) khi nhìn từ trên xuống, (b) nhìn từ mặt bên.



Hình 3.2. (a) Sơ đồ chung cấu trúc MM phát xạ nhiệt; (b) Sơ đồ cấu trúc MM phát xạ nhiệt nhìn từ trên xuống.

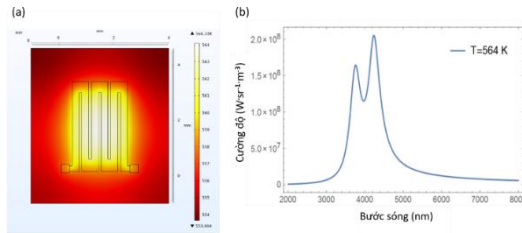
3.1.2. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Độ hấp thụ của lớp MMs (Hình 3.1) như thể hiện phụ thuộc vào bước sóng trong Hình 3.4. Độ hấp thụ của lớp MMs đạt 92% và 97% lần lượt tại các bước sóng $3,75\ \mu\text{m}$ và $4,2\ \mu\text{m}$.



Hình 3.4. Phổ hấp thụ của MMs có cấu trúc đĩa tròn kết hợp

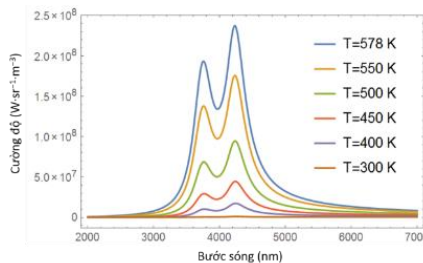
Kết quả này phù hợp cho phát triển áp dụng trong cảm biến NDIR khi có các đỉnh đặc trưng phù hợp cho tương tác khí CO_2 .



Hình 3.9. (a) Sự phân bố nhiệt độ trên bề mặt nguồn nhiệt với điện áp $U = 1,5 \text{ V}$; (b) Cường độ phát xạ của tấm MMs ở $T = 564 \text{ K}$.

Kết quả chỉ ra rằng khi đặt điện áp 1,5 V vào nguồn phát nhiệt có cấu trúc zigzag, nhiệt độ trên bề mặt của nó là 564K. Từ đây, chúng tôi tính toán được phổ phát xạ tương ứng của cấu trúc MMs như thể hiện trong Hình 3.9(b). Hai đỉnh phát xạ của tấm MM xuất hiện tại hai bước sóng 3700 nm và 4200 nm với cường độ lần lượt là $1,6 \times 10^8$ và $2 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ khi đặt điện áp đầu vào là 1,5 V.

Cấu trúc thể hiện tính khả thi để đưa vào ứng dụng nhờ tính chất độc lập với phân cực của sóng điện từ. Bên cạnh đó, độ hấp thụ vẫn được duy trì



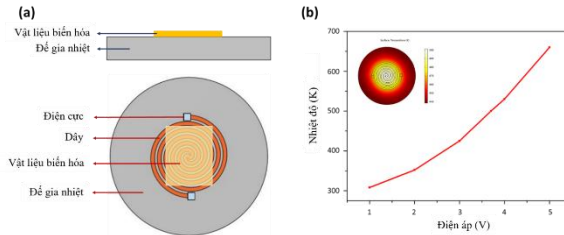
gần 70% khi góc tới lên đến 60° cũng cho thấy tính ổn định của cấu trúc.

Hình 3.10. Cường độ phát xạ của tấm MMs tại các thang nhiệt độ khác nhau.

3.2. Nguồn vi nhiệt với cấu trúc hốc cộng hưởng

3.2.1. Thiết kế và mô phỏng cấu trúc với vi nhiệt dạng xoắn

Cấu trúc cảm biến CO_2 IR điển hình dựa trên công nghệ NDIR bao gồm bốn thành phần chính: nguồn phát hồng ngoại dải rộng (1–15 μm), nguồn thu, bộ lọc quang chỉ cho phép bước sóng hấp thụ đặc trưng của CO_2 và bước sóng tham chiếu đi qua, và một buồng mẫu. Trong thiết kế của chúng tôi, microheater đóng vai trò như một nguồn hồng ngoại được tích hợp với MMs và sơ đồ mạch của nó được trình bày trong hình 3.11.(a). Thiết kế này bao gồm một đế silica với độ dày và bán kính lần lượt là 0,2 và 3 mm. Một dây vàng được sắp xếp theo mô hình xoắn ốc với một điện cực bạc ở mỗi đầu có độ dày 50 nm và bán kính ngoài 1,5 mm được đặt trên đế silica, tám MM được đặt trên cùng.

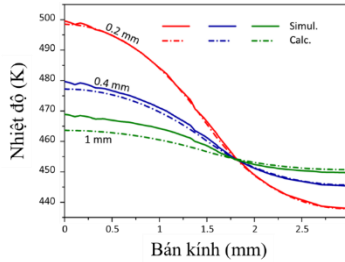


Hình 3.11. (a) Cấu trúc của vi nhiệt tích hợp lớp MMs ; (b) Mối quan hệ giữa nhiệt độ cao nhất trên bề mặt vi nhiệt và điện áp đặt vào; (Hình nhỏ: phân bố nhiệt mô phỏng trên bề mặt vi nhiệt tại điện áp 3.7 V)

Về mặt lý thuyết, ở trạng thái cân bằng nhiệt, cường độ bức xạ của vật liệu có thể được định lượng bởi định luật Stefan-Boltzmann cho bức xạ vật đen, đó là dạng đơn giản hóa của định luật Planck liên quan đến bộ phát xạ lý tưởng:

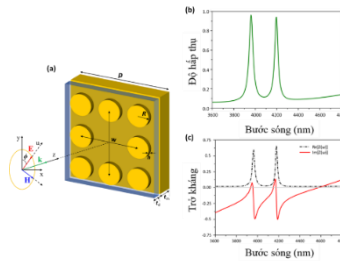
$$I_0(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right)} - 1} \quad (3.2)$$

Ở đây, $I_0(\lambda, T)$ là cường độ bức xạ của vật liệu, h là hằng số Planck, c là tốc độ ánh sáng trong chân không, λ là bước sóng bức xạ, k_B là hằng số Boltzmann và T là nhiệt độ tính theo Kelvin.



Hình 3.12. Nhiệt độ bề mặt dọc theo khoảng cách xuyên tâm ở các độ dày khác nhau của đế.

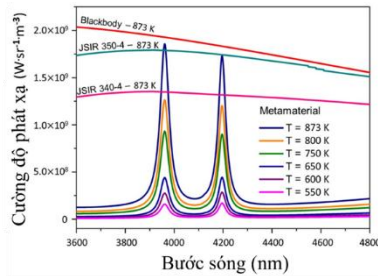
3.2.2. Kết quả và thảo luận



Hình 3.13. (a) Cấu trúc của MMs với tám đĩa tròn bao quanh một hốc; (b) Phổ hấp thụ và (c) trở kháng của cấu trúc.

Cấu trúc này bao gồm ba lớp; hai lớp vàng được ngăn cách bởi một vật liệu điện môi polyimide với độ dày $t_d = 0,29 \mu\text{m}$. Các mô phỏng được thực hiện bằng cách sử dụng hằng số điện môi polyimide là 3,5 và tổn hao điện môi là 0,0027. Lớp dưới cùng là một tấm vàng liên tục với độ dày $t_m = 0,75 \mu\text{m}$ và lớp trên có cấu trúc 8 đĩa tròn. Khoảng cách trung tâm được tối ưu hóa là $w = 3,68 \mu\text{m}$. Độ dày của đĩa là $h = 0,19 \mu\text{m}$, với bán kính $R = 0,63 \mu\text{m}$ và kích thước ô cơ sở là $p = 5,96 \mu\text{m}$. Hình 3.13b trình bày phổ hấp thụ của cấu trúc MMs này cho thấy hai đỉnh hấp thụ ở 3960 nm và 4197 nm với độ hấp thụ lần lượt là 96,3% và 94,1%.

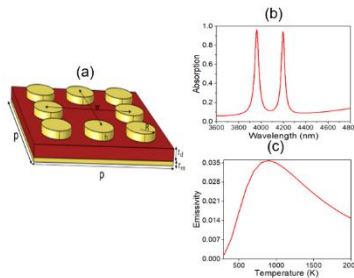
Hình 3.18 trình bày phổ phát xạ thu được từ microheater MMs tích hợp ở các nhiệt độ khác nhau với $\theta = 0$. Kết quả cho thấy sự giảm đáng kể phát xạ không cần thiết, đồng thời duy trì cường độ ở các bước sóng mục tiêu.. Kết quả cho thấy bộ phát xạ hồng ngoại tích hợp MMs trong nghiên cứu của luận án với phổ phát xạ hẹp có thể tiêu thụ công suất thấp, điều này hữu ích cho phát triển nguồn phát xạ IR điều biến phổ phát xạ tiềm năng trong tương lai.



Hình 3.18. Phổ phát xạ của lớp MM tích hợp nguồn vi nhiệt, so với các nguồn IR thương mại, ở các nhiệt độ khác nhau với $\theta = 0$.

3.3. Tối ưu nguồn phát IR với vật liệu biến hóa MMs

3.3.1. Thiết kế và mô phỏng

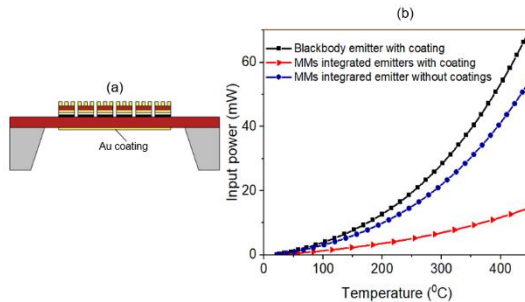


Hình 3.20. (a) Sơ đồ cấu trúc vật liệu biến hóa đề xuất; (b) Phổ hấp thụ; (c) Sự phụ thuộc của độ phát xạ chuẩn hóa vào nhiệt độ.

Tối ưu hóa cấu trúc MPA không chỉ cho hiệu suất hấp thụ cao mà còn cho khả năng tương thích và hiệu quả nhiệt khi tích hợp với vi nhiệt (microheater). Hình 3.20 (c) minh họa sự phụ thuộc của độ phát xạ chuẩn hóa theo nhiệt độ. Các MMs thể hiện các đặc tính triển vọng cho các ứng dụng đòi hỏi khả năng phát xạ chọn lọc các bước sóng hồng ngoại (IR) trong

khi giảm thiểu tiêu thụ năng lượng. Với các giá trị độ phát xạ chuẩn hóa ϵ dao động từ 0,14% đến 0,35% ở các nhiệt độ khác nhau, các vật liệu này được thiết kế để phát xạ bức xạ cụ thể trong vùng IR mong muốn, điều này rất quan trọng cho các ứng dụng phát hiện IR chính xác. Việc phát xạ tập trung này làm giảm lãng phí năng lượng liên quan đến việc phát ra các bước sóng không cần thiết, dẫn đến hiệu quả năng lượng cao hơn so với các bộ phát nhiệt truyền thống dựa trên vật đen tuyệt đối. Ngoài ra, việc phát xạ tập trung còn góp phần kéo dài tuổi thọ hoạt động của các hệ thống phát hiện IR tích hợp công nghệ MM của chúng tôi.

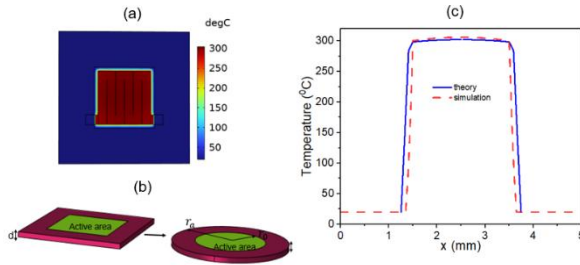
3.3.2. Thiết kế nguồn vi nhiệt tích hợp vật liệu biến hóa



Hình 3.24. (a) Mặt cắt ngang của nguồn phát với lớp phủ vàng (Au); (b) Công suất đầu vào so với nhiệt độ trung bình của các loại nguồn phát khác nhau.

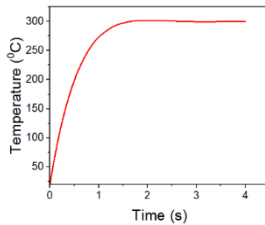
Để giảm thiểu tổn thất bức xạ, một lớp vàng dày 50 nm được áp dụng ở mặt sau của đế polyimide trong khu vực được đốt nóng (Hình 3.24a). Vàng, với khả năng phản xạ cao, hiệu quả trong việc giảm tổn thất bức xạ bằng cách phản xạ lại bức xạ nhiệt vào hệ thống, từ đó giảm tiêu thụ điện năng tổng thể. Ngoài ra, MMs được thiết kế để phát xạ hiệu quả, giảm tiêu thụ năng lượng so với nguồn phát nhiệt dựa trên vật đen tuyệt đối. Hình 3.25a minh họa phân bố nhiệt độ bề mặt của nguồn phát tích hợp MMs có lớp phủ khi nhiệt độ trung bình trong khu vực hoạt động là 300°C. Nhiệt độ được quan sát thấy phân bố đều trong khu vực hoạt động, giảm nhanh xuống nhiệt độ môi trường ở rìa của màng. Một mô hình đơn giản hóa đã được phát triển bằng cách xấp xỉ màng vuông bằng một màng tròn (Hình 3.25b). Bán kính của hình tròn được chọn để giảm thiểu các khu vực không trùng lặp giữa

hình vuông và hình tròn, như được mô tả trong. Cụ thể, bán kính là $0.5412a$, trong đó a là chiều dài cạnh của hình vuông.



Hình 3.25. (a) Phân bố nhiệt độ bề mặt của các nguồn phát có lớp phủ (b) Đơn giản hóa sang truyền nhiệt một chiều. (c) Phân bố nhiệt độ dọc theo trục x .

Hơn nữa, chúng tôi thực hiện phân tích nhiệt độ thay đổi theo thời gian để hiểu thời gian đáp ứng của các nguồn phát hồng ngoại (IR), cung cấp cái nhìn sâu sắc về tốc độ mà nguồn phát đạt được nhiệt độ trạng thái ổn định sau khi thay đổi công suất đầu vào. Như được minh họa trong Hình 3.26, một nguồn phát có lớp phủ chịu công suất đầu vào 6.8 mW mất 1.65 giây để đạt được nhiệt độ trạng thái ổn định là 300°C.



Hình 3.26. Sự thay đổi nhiệt độ theo thời gian.

3.4. Kết luận Chương 3:

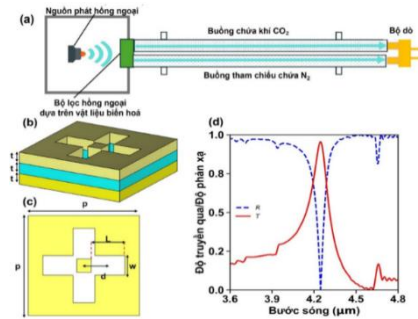
Chương này tập trung vào thiết kế chi tiết và tối ưu hóa cấu trúc MPA để biến nó thành một nguồn phát vi nhiệt dải hẹp hiệu suất cao. Kết quả mô phỏng khẳng định tính khả thi của việc tạo ra bức xạ gần như đơn sắc tại $4.26 \mu\text{m}$. Việc lựa chọn giữa các kiểu cấu trúc (đa cộng hưởng vs. hốc cộng hưởng) và tối ưu hóa về mặt nhiệt là bước quan trọng để chuyển từ mô phỏng sang chế tạo thực tế một nguồn phát tích hợp MMs, hứa hẹn mang lại hiệu suất vượt trội so với nguồn phát băng rộng truyền thống.

CHƯƠNG 4. THIẾT KẾ VẬT LIỆU BIẾN HÓA CHO ĐIỀU KHIỂN PHÁT XẠ HỒNG NGOẠI TRONG CẢM BIẾN NDIR

4.1. Thiết kế cảm biến NDIR tích hợp MMs theo kiểu truyền qua

4.1.1. Thiết kế cấu trúc cảm biến

Mục tiêu: Phát triển một bộ lọc quang học dựa trên metamaterial (MM) có khả năng truyền qua chọn lọc tại bước sóng hấp thụ đặc trưng của CO_2 ($4.26 \mu\text{m}$) và phản xạ ở các bước sóng khác, nhằm thay thế bộ lọc quang học truyền thống.



Hình 4.1. (a) Cấu hình cảm biến khí. (b) (c) Cấu trúc bộ lọc dựa trên vật liệu biến hóa (góc nhìn ba chiều và nhìn từ trên xuống). (d) Phổ truyền qua và phản xạ.

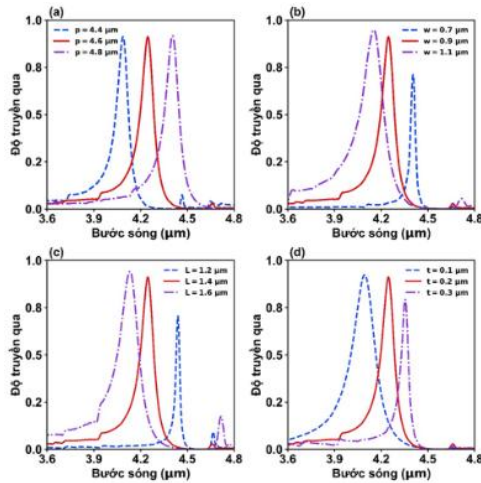
Cấu hình cảm biến: Hệ thống NDIR hai kênh tiêu chuẩn, bao gồm: nguồn phát IR $\rightarrow$ Bộ lọc MM $\rightarrow$ Buồng đo chứa mẫu khí $\rightarrow$ Detector nhiệt điện (thermopile).

Thiết kế cấu trúc MM: Bộ lọc MM có cấu trúc ba lớp Ag-Si-Ag với lớp trên cùng là mảng tuần hoàn các khe chữ thập (cross-shaped slots). Các thông số tối ưu: Chu kỳ mảng $p = 4.6 \mu\text{m}$, chiều dài khe $L = 1.4 \mu\text{m}$, chiều rộng khe $w = 0.9 \mu\text{m}$, độ dày các lớp $t = 0.2 \mu\text{m}$.

4.1.2. Kết quả cho cảm biến NDIR-MMs theo kiểu truyền qua

Phổ truyền qua và phản xạ của cấu trúc vật liệu MMs đề xuất được minh họa trong Hình 4.2. Trong dải bước sóng từ $3,6 \mu\text{m}$ đến $4,8 \mu\text{m}$, cấu trúc cho thấy một đỉnh truyền chọn lọc rõ rệt tại khoảng $4,26 \mu\text{m}$, với giá trị truyền qua đạt khoảng 90%, trong khi phản xạ đồng thời giảm xuống gần như bằng 0 ($R \approx 0$). Hình 4.4d cho thấy mối quan hệ giữa nhiệt độ của nguồn

phát IR 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%.

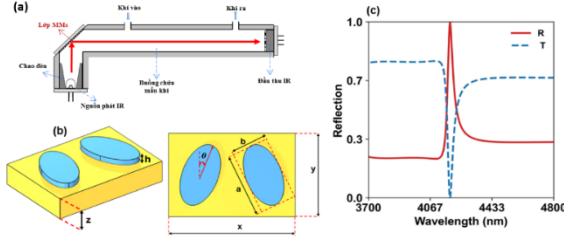


Hình 4.2. Phổ truyền qua của cấu trúc bộ lọc MMs khi thay đổi các thông số hình học: (a) Ảnh hưởng của chu kỳ mạng p ; (b) Ảnh hưởng của chiều rộng khe w ; (c) Ảnh hưởng của chiều dài nhánh chữ thập L ; (d) Ảnh hưởng của độ dày các lớp điện môi và kim loại t .

4.2. Cảm biến NDIR-MMs theo cấu hình phản xạ

4.2.1. Thiết kế cảm biến NDIR-MMs theo cấu hình phản xạ

Cấu hình cảm biến NDIR tích hợp MMs theo cấu hình phản xạ được minh họa trong Hình 4.5a. Trong thiết kế này, nguồn hồng ngoại IR dải rộng sẽ đi đến gương phản xạ MM, và được phản xạ chọn lọc các vùng phổ đặc trưng, các bức xạ này đi qua buồng chứa mẫu khí để đến đầu thu hồng ngoại. Gương phản xạ MMs đề xuất bao gồm một cấu trúc hai lớp, được thể hiện trong Hình 4.5b. Lớp dưới cùng là một đế CaF_2 với độ dày $z = 0,8$ mm. Lớp trên có một cấu trúc giống hình elip được làm bằng Si, cũng có độ dày $h = 0,2$ μm . Cấu trúc elip được đặc trưng bởi bán trục lớn $a = 2,2$ μm và bán trục nhỏ $b = 1,2$ μm . Ngoài ra, trục lớn được định hướng với một góc $\theta = 20^\circ$ so với trục y . Cấu trúc được sắp xếp theo chu kỳ với chiều dài $x = 4,2$ μm và chiều rộng $y = 2,9$ μm .



Hình 4.5. (a) Cấu hình cảm biến khí; (b) Cấu trúc vật liệu MMs ; và (c) Phổ phản xạ tương ứng.

4.2.2. Hoạt động của NDIR-MMs theo cấu hình phản xạ

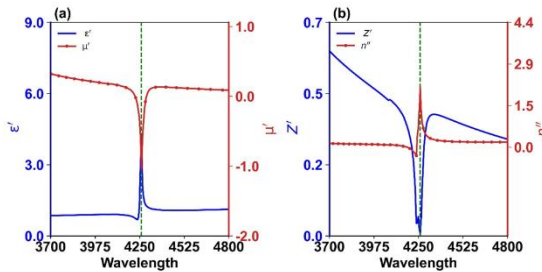
Hình 4.5c minh họa phổ phản xạ của gương phản xạ MMs cho thấy một đỉnh phản xạ rõ rệt tại 4260 nm với độ phản xạ đạt 99,8%. Độ phản xạ gần như tuyệt đối tại bước sóng gần dải hấp thụ đặc trưng của CO_2 (~4200 nm) làm nổi bật tiềm năng của MMs trong các ứng dụng cảm biến khí CO_2 có độ nhạy cao. Hiện tượng phản xạ gần như hoàn hảo quan sát được tại 4260 nm có thể được giải thích dựa trên các điều kiện cần thiết để đạt được phản xạ toàn phần [135,136]. Phản xạ hoàn hảo xảy ra khi phần thực của trở kháng phức bằng không, điều này yêu cầu điều kiện $\epsilon'/\mu' < 0$. Trong các vật liệu điện môi, độ điện thẩm được tạo ra gần cộng hưởng điện, trong khi độ từ thẩm đạt được gần cộng hưởng từ [137]. Ngoài ra, một thành phần ảo lớn của chiết suất n'' là cần thiết để triệt tiêu sự truyền qua dạng suy biến và ngăn ánh sáng truyền qua lớp mỏng. Để xác minh xem các điều kiện này có được đáp ứng trong cấu trúc của hay không, các giá trị trở kháng Z , độ điện thẩm ϵ , độ từ thẩm μ , và chiết suất được trích xuất. Các đại lượng phụ thuộc theo tần số này có thể được tính toán từ các tham số tán xạ (S-parameters) [136-139]. Trở kháng, chiết suất, độ từ thẩm và độ điện thẩm thu được:

$$\begin{aligned}
 Z(\omega) &= \sqrt{\frac{(1 + S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)}{(1 - S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)}} \\
 n(\omega) &= \frac{1}{kL} \arccos\left(\frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}}\right) \\
 \mu(\omega) &= n(\omega)Z(\omega); \quad \epsilon(\omega) = \frac{n(\omega)}{Z(\omega)}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

trong đó, k và L lần lượt biểu thị bước sóng và kích thước của ô cơ sở.

4.2.3. Cơ chế hoạt động của tấm MMs

Hình 4.6a thể hiện phần thực của độ điện thẩm hiệu dụng ϵ' và độ từ thẩm hiệu dụng μ' , trong khi Hình 4.6b hiển thị phần thực của trở kháng hiệu dụng Z' và phần ảo của chiết suất hiệu dụng n'' . Tại bước sóng 4260 nm, phần thực của trở kháng hiệu dụng Z' xấp xỉ bằng không, phần thực của độ điện thẩm hiệu dụng ϵ' là dương, và phần thực của độ từ thẩm hiệu dụng μ' là âm, trong khi phần ảo của chiết suất hiệu dụng n'' đạt giá trị cực đại. Các điều kiện cần thiết cho phản xạ hoàn hảo được thoả mãn, đồng nghĩa với việc có thể đạt được phản xạ toàn phần của sóng tới.

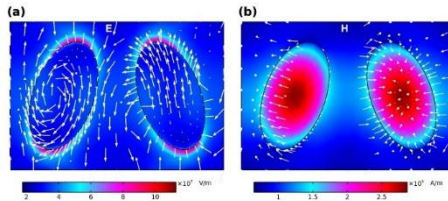


Hình 4.6. (a) Sự phụ thuộc của phần thực của độ điện thẩm hiệu dụng và độ từ thẩm hiệu dụng theo bước sóng; (b) Sự biến thiên của phần thực của trở kháng hiệu dụng và phần ảo của chiết suất hiệu dụng theo bước sóng.

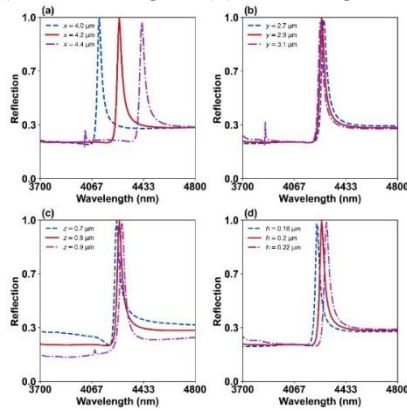
Hình 4.7a minh họa phân bố biên độ điện trường và đường sức điện tại $\lambda = 4260$ nm cho một hệ gồm hai cấu trúc elip. Trường điện cho thấy sự tập trung mạnh tại các biên của elip, cực đại đạt khoảng $9,2 \times 10^7$ V/m. Hình 4.7b thể hiện biên độ phân bố từ trường và đường sức từ tại cùng bước sóng. Từ trường tập trung cục bộ tại vùng trung tâm của các cấu trúc elip, với cường độ cực đại đạt khoảng $3,0 \times 10^5$ A/m. Các đường sức điện thể hiện dạng xoáy, trong khi phân bố từ trường có dạng tuyến tính hơn và bị giới hạn không gian — những đặc điểm đặc trưng của cộng hưởng lưỡng cực từ.

Hình 4.8 minh họa ảnh hưởng của các tham số hình học khác nhau đến phổ phản xạ. Việc tăng chiều cao của các cộng hưởng từ elip h gây ra một sự dịch đỏ có thể đo được của đỉnh cộng hưởng, xác nhận rằng cộng

hướng quang học nhảy với kích thước theo phương thẳng đứng của cấu trúc, mặc dù hiệu ứng này kém rõ rệt hơn so với khi thay đổi thông số x .

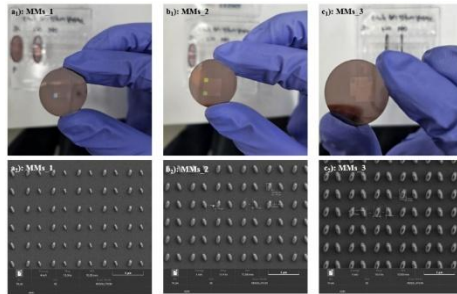


Hình 4.7. Phân bố (a) điện trường và (b) từ trường tại bước sóng 4260 nm.



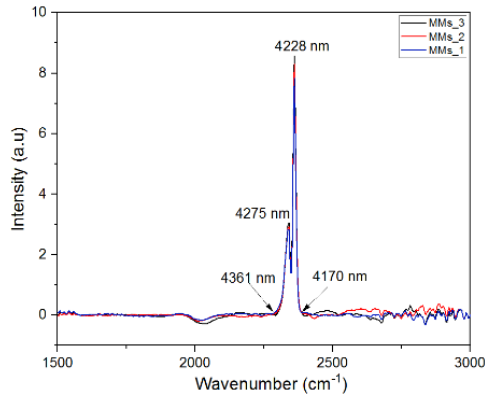
Hình 4.8. Sự phụ thuộc của phổ phản xạ vào các tham số cấu trúc: (a) chiều dài đế, (b) chiều rộng đế, (c) độ dày đế, và (d) chiều cao của các cột hình dạng elip.

4.2.4. Chế tạo gương phản xạ MM's điều khiển phổ hồng ngoại



Hình 4.10. (a₁, b₁, c₁) ảnh chụp các tấm MM's đã chế tạo ở ba điều kiện khác nhau; (a₂, b₂, c₂) ảnh SEM các mẫu MM's tương ứng.

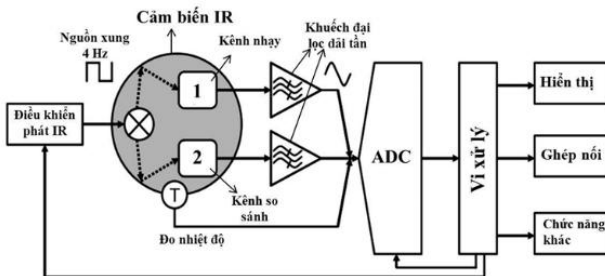
Hình 4.10 là ảnh chụp quang học và ảnh hiển vi điện tử quét SEM của các mẫu MMs đã chế tạo theo ba điều kiện khác nhau (tương ứng các mẫu ký hiệu là MMs_1, MMs_2 và MMs_3).



Hình 4.11. Phổ FTIR cho ba mẫu vật liệu MMs chế tạo.

Hình 4.11 là phổ hấp thụ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) sau khi đã trừ nền cho ba mẫu vật liệu biến hóa chế tạo MMs_1, MMs_2 và MMs_3. Kết quả này cho thấy ba mẫu vật liệu MMs có đỉnh tương đồng nhau đỉnh thứ nhất tại 4228 nm và đỉnh thứ hai tại 4275 nm. Mặc dù, cấu trúc của các đảo elip trên đế CaF_2 được chế tạo có sự khác biệt nhưng đặc trưng của phổ FTIR là khá tương đồng. Từ số liệu này, đỉnh chính của phổ FTIR được tính cho các mẫu vật liệu là 4265 ± 95 nm.

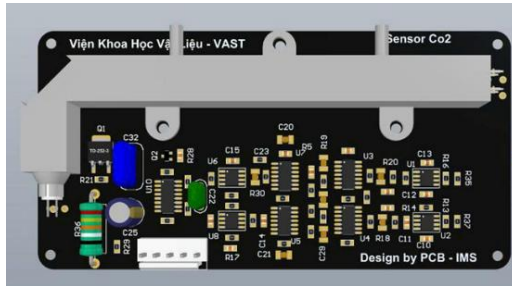
4.2.5. Chế tạo cảm biến khí NDIR-MMs theo cấu hình phản xạ



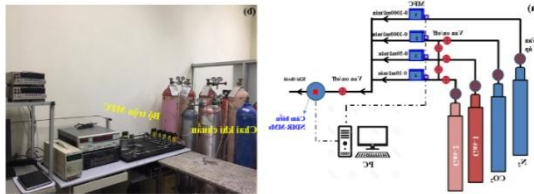
Hình 4.12. Mạch nguyên lý của cảm biến khí NDIR.

Hình 4.12 là sơ đồ mạch điện nguyên lý cho cảm biến NDIR. Ở đó, nguồn phát hồng ngoại IR được cấp bởi điện áp dạng xung vuông 4 Hz (tần

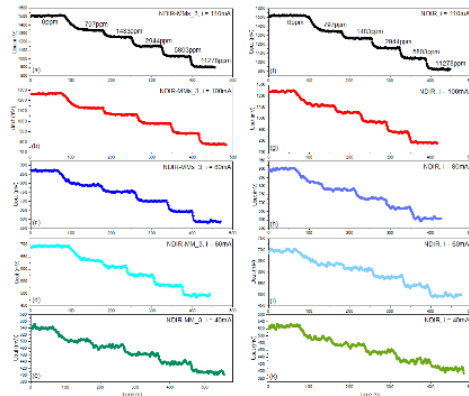
số được điều khiển bằng dao động của linh kiện thạch anh). Tín hiệu điện lối ra trên đầu thu hồngngoại hai kênh (một kênh so sánh và một kênh đóng vai trò nhạy khí), thường được thu nhận qua linh kiện MOSFET.



Hình 4.15. Thiết kế bo mạch cho cảm biến NDIR tích hợp MMs



Hình 4.17. Sơ đồ nguyên lý hệ pha trộn khí (a) và ảnh chụp tương ứng (b).



Hình 4.20. Đặc trưng điện áp lối ra kênh nhạy của cảm biến NDIR và NDIR-MMs_3 khi thay đổi nguồn dòng từ 40-110 mA cấp cho đèn phát hồng ngoại IR.

4.3. Kết luận Chương 4

Việc sử dụng bộ điều biến hồng ngoại dựa trên MMs có thể 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 vào cảm biến NDIR. Theo cấu hình phản xạ, lớp vật liệu đã được chế tạo và áp dụng thử nghiệm vào trong cảm biến NDIR cho kết quả khả quan. 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.

KẾT LUẬN CHUNG

Luận án đã nghiên cứu và đạt được những kết quả quan trọng về vật liệu biến hóa (MMs) ứng dụng trong cảm biến hồng ngoại không tán sắc (NDIR), cụ thể:

(I) Cấu hình truyền qua:

MMs được ghép trên bề mặt nguồn vi nhiệt để tạo nguồn phát hồng ngoại dải hẹp, đặc trưng cho tương tác với khí CO₂. Cấu trúc đĩa cộng hưởng tròn – hốc cộng hưởng tạo hai đỉnh hấp thụ mạnh tại 3960 nm và 4197 nm với độ hấp thụ lần lượt 96,3% và 94,1%. Khi tích hợp lên nguồn vi nhiệt zig-zag, cấu trúc giúp giảm ~35% năng lượng tiêu thụ so với nguồn phát xạ vật đen, với cường độ phát xạ đạt $1,75 \times 10^9$ và $1,8 \times 10^9 \text{ W.sr}^{-1}.\text{m}^{-3}$, cho thấy khả năng phát xạ chọn lọc và tuổi thọ cao.

Ngoài ra, vật liệu MMs khe chữ thập được mô phỏng làm bộ lọc quang dải hẹp tại bước sóng hấp thụ CO₂ (4,26 μm), đạt độ truyền qua >90% và độ rộng phổ 180 nm. Tỷ lệ suy giảm tín hiệu chỉ 3,8% ở 573 K, chứng minh khả năng phát hiện chọn lọc CO₂ hiệu quả và tiềm năng tiết kiệm năng lượng.

(II) Cấu hình phản xạ:

Cảm biến NDIR tích hợp MMs dạng elip Si trên đế CaF₂ ($z = 0,8 \text{ mm}$, $x = 4,2 \text{ }\mu\text{m}$, $y = 2,9 \text{ }\mu\text{m}$, góc nghiêng 20°) được chế tạo và thử nghiệm. Kết quả cho thấy độ hấp thụ và độ nhạy của cảm biến được cải thiện rõ rệt: độ nhạy tăng từ 0,20134 lên 0,20991 / 1 ppm, giới hạn phát hiện (LoD) giảm từ 0,1569 ppm xuống 0,126 ppm, và độ lệch chuẩn (SD) giảm từ 19,87 ppm xuống 15,65 ppm trong dải nồng độ 0–10.000 ppm.

Tổng kết, luận án đã chứng minh vai trò của vật liệu biến hóa trong việc nâng cao hiệu suất, độ chọn lọc và độ nhạy của cảm biến NDIR, mở ra hướng phát triển mới cho các thiết bị phát hiện khí CO₂ có khả năng tiết kiệm năng lượng và tích hợp cao.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Trịnh Mỹ Anh, Đặng Lê Gia Hân, Mai Ngọc Linh, **Phạm Duy Tân**, Bùi Xuân Khuyển, Hồ Trường Giang, “*Nghiên cứu chế tạo cảm biến NDIR đo khí CO₂ dài nồng độ thấp để áp dụng cho điều hòa không khí trong nhà giảm tác động xấu đến sức khỏe con người*”, Tạp chí Nghiên cứu KH&CN Quân sự **77**, 120-127 (2022).
2. **Phạm Duy Tân**, Đinh Ngọc Dũng, Nguyễn Văn Ngọc, Vũ Thị Hồng Hạnh, Soulima Khamsadeth, Bùi Sơn Tùng, Bùi Xuân Khuyển, Hồ Trường Giang, Vũ Đình Lãm, “*Nghiên cứu mô phỏng vật liệu biến hóa phát xạ hồng ngoại ứng dụng cho cảm biến khí CO₂*”, Hội nghị Vật lý Chất rắn và Khoa học Vật liệu Toàn quốc lần thứ 12 (SPMS 2021), 13-15/8, Thành phố Cần Thơ, Việt Nam, Quyển 2, 640-644 (2022), ISBN: 978-604-316-838-9.
3. **Phạm Duy Tân**, Duong Thi Ha, Bui Son Tung, Bui Xuan Khuyen, Do Thuy Chi, Vu Dinh Lam, Liangyao Chen, Haiyu Zheng and Youngpak Lee, “*Recoverable Broadband Absorption Based on Ultra-Flexible Meta-Surfaces*”, Crystals **12**, 1817 (2022).
4. **Phạm Duy Tân**, Đặng Tuấn Đạt, Phạm Quang Ngân, Phạm Đình Tuấn, Nguyễn Ngọc Khải, Bùi Xuân Khuyển, Hồ Trường Giang, Vũ Đình Lãm, “*Tích hợp ESP32 vào bo mạch cho cảm biến NDIR đo khí CO₂ để ứng dụng nền tảng IoT trong nuôi trồng nấm ăn*”, 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, 315-319 (2023), ISBN: 978-604-471-702-9.
5. Bui Xuan Khuyen, Nguyen Van Ngoc, Dinh Ngoc Dung, Nguyen Phon Hai, Nguyen Thanh Tung, Bui Son Tung, Vu Dinh Lam, Ho Truong Giang, **Phạm Duy Tân**, Liangyao Chen, Haiyu Zheng, and YoungPak Lee, “*Dual-band infrared metamaterial perfect absorber for narrow-band thermal emitters*”, Journal of Physics D: Applied Physics **57** (28), 285501 (2024).
6. Bui Xuan Khuyen, **Phạm Duy Tân**, Bui Son Tung, Nguyen Phon Hai, Phạm Đình Tuấn, Do Xuân Phong, Do Khanh Tung, Nguyen Hai Anh, Ho Truong Giang, Nguyen Phuc Vinh, Nguyen Thanh Tung, Vu Dinh Lam, Liangyao Chen, YoungPak Lee, “*Numerical Optimization of Metamaterial-Enhanced Infrared Emitters for Ultra-Low Power Consumption*”, Photonics **12** (6), 583 (2025).