

Nghiên cứu tổng hợp, khảo sát tính chất nano graphene oxit (GO) ứng dụng làm lớp nhạy khí cho cảm biến QCM phát hiện khí NH₃

¹TS. Vũ Văn Cát*

¹Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Hải Dương

Email: catvvtims@gmail.com

⁴TS. Nguyễn Văn Vinh

Đại học Bách khoa Hà Nội

Ngày nhận bài: 29/10/2025

²ThS. Lê Thị Nụ

²Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Hải Dương

³TS. Nguyễn Văn Quy

Đại học Bách khoa Hà Nội

⁵ThS. Nguyễn Văn Hưng

Đại học Bách khoa Hà Nội

Ngày chấp nhận đăng: 22/12/2025

Tóm tắt - Bài báo trình bày quá trình tổng hợp và khảo sát các tính chất của bán dẫn graphene oxit (GO) với mục tiêu ứng dụng trong chế tạo cảm biến môi trường, đặc biệt là cảm biến khí NH₃ dựa trên vi cân tinh thể thạch anh (QCM). GO được biết đến là vật liệu nano 2 chiều có diện tích bề mặt lớn, nhiều nhóm chức chứa oxy (-OH, -COOH, -C=O, -O-), giúp tăng khả năng hấp phụ và biến tính bề mặt, từ đó hứa hẹn ứng dụng rộng rãi trong các cảm biến khí độc hại.

Trong nghiên cứu, nhóm tác giả đã tổng hợp thành công GO từ graphite bằng phương pháp cải tiến Hummers, xác nhận cấu trúc và thành phần hóa học bằng các kỹ thuật hiện đại như XRD, TEM, FTIR và Raman. Kết quả cho thấy các lớp graphite đã được bóc tách thành tấm mỏng, phân tán tốt trong nước, đồng thời có sự xuất hiện của các nhóm chức oxy đặc trưng, đảm bảo đặc tính nhạy khí. GO sau đó được phủ lên điện cực vàng của QCM bằng phương pháp phun phủ, tạo lớp nhạy khí để phát hiện NH₃. Thử nghiệm cho thấy cảm biến GO/QCM có khả năng phát hiện NH₃ ở dải nồng độ từ 125 - 750 ppm, với độ nhạy tuyến tính, thời gian đáp ứng khoảng 90 giây và thời gian hồi phục khoảng 100 giây ở nồng độ cao. Cảm biến thể hiện tính ổn định, lặp lại và tái sử dụng tốt ngay ở nhiệt độ phòng.

Nghiên cứu đã chứng minh tiềm năng của GO trong chế tạo cảm biến khí giá thành thấp, hiệu quả, mở ra hướng phát triển các hệ cảm biến môi trường nhạy, nhanh và bền vững.

Từ khóa - Graphene oxide (GO), Quartz Crystal Microbalance (QCM); Gas sensor; Ammonia (NH₃) detection, Environmental monitoring.

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, sự phát triển của khoa học bán dẫn nano đã mở ra nhiều hướng ứng dụng mới trong lĩnh vực môi trường, đặc biệt là chế tạo cảm biến khí. Trong số đó, graphene oxit (GO) thu hút sự quan tâm rộng rãi nhờ cấu trúc 2 chiều đặc biệt, diện tích bề mặt lớn, tính ái nước cao và sự hiện diện của nhiều nhóm chức chứa oxy như hydroxyl (-OH), carboxyl (-COOH), epoxy (-O-) và carbonyl (-C=O). Các đặc tính này giúp GO có khả năng hấp phụ mạnh, dễ biến tính bề mặt và tương thích

sinh học, trở thành vật liệu tiềm năng trong cảm biến môi trường.

Trong lĩnh vực phát hiện khí độc hại, vi cân tinh thể thạch anh (Quartz Crystal Microbalance - QCM) được đánh giá cao nhờ độ nhạy, tính chọn lọc và khả năng làm việc ở nhiệt độ phòng. Hiệu quả của QCM phụ thuộc đáng kể vào lớp nhạy khí phủ trên điện cực, trong đó vật liệu nano như GO được xem là lựa chọn triển vọng để nâng cao độ nhạy và tính ổn định.

Khí amoniac (NH₃) là một trong những tác nhân gây ô nhiễm phổ biến, có mặt nhiều trong sản xuất phân bón, hóa chất, công nghiệp chế biến và xử lý môi trường. Với nồng độ cao, NH₃ gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe con người và môi trường sống. Do đó, việc nghiên cứu phát triển cảm biến NH₃ có độ nhạy cao, phản hồi nhanh và hoạt động ổn định ở điều kiện thường là vấn đề cấp thiết.

Xuất phát từ những lý do trên, nghiên cứu này tập trung vào việc tổng hợp vật liệu GO từ nguồn graphite trong nước và khảo sát khả năng ứng dụng của GO làm lớp nhạy khí trong cảm biến QCM phát hiện NH₃, hướng tới chế tạo cảm biến khí hiệu quả, chi phí thấp và bền vững cho giám sát môi trường.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Trong nghiên cứu này, các hóa chất chính được sử dụng bao gồm axit H₂SO₄ (95 - 98%), axit H₃PO₄, KMnO₄ và graphite tinh thể dạng lớp, được cung cấp bởi Công ty Hóa chất Đức Giang, Việt Nam. Ngoài ra, dung môi axeton (CH₃COCH₃, 99,9%) và etanol (C₂H₅OH, 99,9%) cũng được dùng trong quá trình xử lý và chuẩn bị mẫu. Các dụng cụ và thiết bị hỗ trợ bao gồm máy rung siêu âm, máy quay ly tâm, máy khuấy từ, pipet, cốc thủy tinh, điện cực QCM 5 MHz, cùng hệ đo QCM25 và QCM200 kết nối máy tính nhằm thu thập và xử lý dữ liệu.

Quá trình tổng hợp GO được thực hiện theo phương pháp Hummers cải tiến. Graphite được oxy hóa trong môi trường hỗn hợp axit mạnh và chất oxy hóa để tạo thành sản phẩm GO. Sau khi phản ứng kết thúc, vật liệu được

rửa sạch, lọc nhiều lần và phân tán trong nước cất với nồng độ 1 mg/ml. Quá trình phân tán được hỗ trợ bằng siêu âm trong 3 giờ, sau đó phần GO chưa phân tán hết được loại bỏ bằng ly tâm ở tốc độ 4000 vòng/phút trong 20 phút. Kết quả thu được là dung dịch GO đồng nhất, thích hợp cho quá trình chế tạo cảm biến.

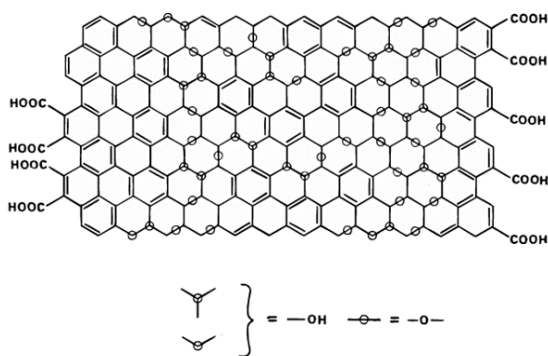
Để tạo cảm biến, GO tổng hợp được phủ lên điện cực vàng của QCM bằng phương pháp phun phủ. Đây là phương pháp đơn giản, dễ thực hiện và cho phép tạo màng nhạy khí mỏng, đồng đều. Sau khi phủ, các cảm biến được sấy khô và cố định trên hệ đo.

Các thí nghiệm khảo sát tính nhạy khí được tiến hành trong buồng đo chuyên dụng, với các khí thử gồm NH₃, CO, NO₂ và SO₂. Nồng độ khí được điều chỉnh bằng các bộ điều khiển dòng (MFC), trong đó NH₃ là khí chính được khảo sát ở dải nồng độ từ 125 - 750 ppm. Sự thay đổi tần số cộng hưởng của cảm biến QCM khi tiếp xúc với khí thử được ghi nhận bằng hệ QCM25 và QCM200, từ đó xác định các thông số đặc trưng như độ nhạy, độ tuyến tính, khả năng tái sử dụng, thời gian đáp ứng và hồi phục của cảm biến.

3. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

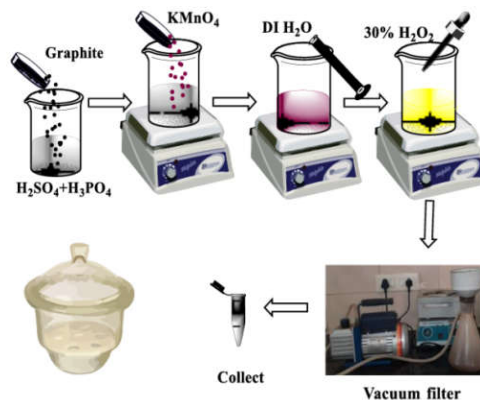
3.1. Tổng hợp và đặc trưng vật liệu GO

Graphene oxit (GO) từ lâu đã được biết đến như một vật liệu nano hai chiều có nhiều đặc tính nổi bật, chẳng hạn như diện tích bề mặt riêng lớn, khả năng phân tán tốt trong dung môi phân cực, tính ái nước cao và đặc biệt là sự hiện diện dày đặc của các nhóm chức oxy trên bề mặt (-OH, -COOH, -C=O, -O-) [1]. Những tính chất này giúp GO dễ dàng tương tác với các phân tử khác, đồng thời làm tăng khả năng hấp phụ khí, khiến nó trở thành vật liệu tiềm năng trong chế tạo cảm biến khí độc hại.



Hình 1. Cấu trúc của GO[1]

Trong nghiên cứu này, GO được tổng hợp từ graphit tự nhiên bằng phương pháp Hummers cải tiến - một quy trình oxy hóa sử dụng hỗn hợp axit mạnh và tác nhân oxy hóa nhằm tạo ra sự chèn nhóm chức vào giữa các lớp graphit. Sau khi phản ứng, sản phẩm được rửa nhiều lần để loại bỏ tạp chất và trung hòa pH, sau đó được phân tán trong nước nhờ rung siêu âm trong 3 giờ. Phần không phân tán được loại bỏ bằng ly tâm, thu được dung dịch GO đồng nhất.



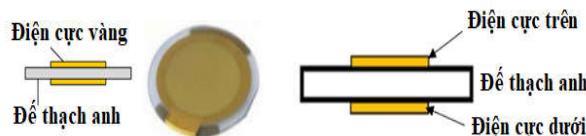
Hình 2. Phương pháp Hummers cải tiến [2]

Đặc trưng cấu trúc và hình thái của GO được xác định thông qua nhiều kỹ thuật phân tích hiện đại. Phổ nhiễu xạ tia X (XRD) cho thấy sự xuất hiện của một đỉnh tại 2θ ≈ 10,9°, tương ứng với mặt (002), chứng tỏ các lớp graphit đã được bóc tách thành dạng lớp mỏng hơn [15]. Ảnh hiển vi điện tử truyền qua (TEM) xác nhận các tấm GO có kích thước nano, mỏng và phân tán tốt trong dung dịch. Kết quả phổ hồng ngoại (FTIR) chỉ ra sự hiện diện rõ ràng của các nhóm chức oxy: -OH, -COOH, -C=O và -O-. Phổ Raman cho thấy hai dải đặc trưng D (1362 cm⁻¹) và G (1598 cm⁻¹), minh chứng cho sự tồn tại đồng thời của các liên kết sp³ (tạo khuyết tật) và sp² (cấu trúc vòng thơm) [16].

Những phân tích này cho phép khẳng định GO đã được tổng hợp thành công, với cấu trúc và đặc tính phù hợp để trở thành lớp nhạy khí trong cảm biến. Đồng thời, việc tổng hợp GO từ nguồn graphit trong nước giúp chủ động nguyên liệu, giảm chi phí nghiên cứu so với phụ thuộc vào nguồn thương mại nhập khẩu.

3.2. Khảo sát tính nhạy khí NH₃ của cảm biến QCM phủ GO

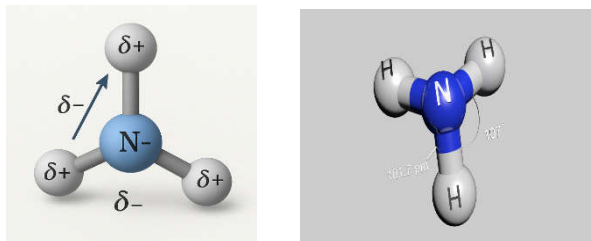
Trong lĩnh vực cảm biến khí, vi cân tinh thể thạch anh (Quartz Crystal Microbalance - QCM) được đánh giá cao nhờ khả năng phát hiện khối lượng cực nhỏ hấp phụ trên bề mặt điện cực thông qua sự thay đổi tần số cộng hưởng [4]. Hiệu quả của QCM phụ thuộc đáng kể vào lớp vật liệu nhạy phủ trên bề mặt điện cực, do đó việc lựa chọn GO làm lớp nhạy khí là hướng đi đầy tiềm năng.



Hình 3. Sơ đồ cấu tạo của cảm biến QCM

Trong nghiên cứu này, GO được phủ lên điện cực vàng của cảm biến QCM bằng phương pháp phun phủ. Đây là phương pháp đơn giản, không yêu cầu công nghệ cao nhưng vẫn đảm bảo tạo được màng nhạy khí mỏng, đồng đều và bám dính tốt. Các cảm biến QCM/GO sau khi chế tạo được lắp đặt vào hệ đo chuyên dụng và thử nghiệm với các loại khí: NH₃, CO, SO₂ và NO₂, trong đó NH₃ được chọn làm khí mục tiêu chính.

NH₃ là một loại khí phổ biến trong công nghiệp hóa chất, phân bón, xử lý nước và làm lạnh, nhưng cũng gây độc hại cho sức khỏe con người. Tổ chức OSHA (Mỹ) quy định giới hạn tiếp xúc cho phép là 50 ppm trong 8 giờ làm việc và 35 ppm trong ngắn hạn [13]. Việc phát hiện NH₃ nhanh, chính xác ở nồng độ thấp và nhiệt độ phòng là yêu cầu thiết yếu đối với các hệ cảm biến môi trường.



Hình 4. Cấu trúc của khí NH₃

Kết quả thực nghiệm cho thấy cảm biến QCM/GO phản hồi rõ rệt khi tiếp xúc với NH₃ trong dải nồng độ từ 125 - 750 ppm. Độ dịch tần số cộng hưởng tăng tuyến tính theo nồng độ khí, chứng minh tính tuyến tính cao và khả năng định lượng tốt [18]. Các phép đo lặp lại nhiều chu kỳ cho thấy độ ổn định và khả năng tái sử dụng tốt của cảm biến. Đặc biệt, thời gian đáp ứng trung bình đạt khoảng 110 giây và hồi phục 150 giây, ngắn hơn so với các cảm biến trên cơ sở oxit kim loại như SnO₂, vốn có thời gian đáp ứng khoảng 144 giây và hồi phục 210 giây [16].

Cơ chế nhạy khí của cảm biến QCM/GO được lý giải bởi sự tương tác giữa các phân tử NH₃ và các nhóm chức oxy trên bề mặt GO. NH₃ có tính phân cực cao, dễ dàng hình thành liên kết hydro với -OH hoặc liên kết cộng hóa trị yếu với -C=O, dẫn đến sự thay đổi khối lượng hấp phụ và làm lệch tần số cộng hưởng của QCM [17]. Điều này giải thích vì sao GO có độ nhạy cao với NH₃, đồng thời vẫn duy trì độ ổn định và khả năng tái sử dụng sau nhiều chu kỳ đo.

Những kết quả trên khẳng định rằng GO là vật liệu đầy hứa hẹn cho chế tạo cảm biến QCM phát hiện NH₃. Không chỉ đáp ứng yêu cầu về độ nhạy và tốc độ phản hồi, cảm biến QCM/GO còn có ưu điểm hoạt động ở điều kiện thường, chi phí thấp và tiềm năng ứng dụng trong giám sát môi trường lâu dài. Đây là cơ sở khoa học quan trọng cho hướng nghiên cứu và phát triển các hệ cảm biến môi trường hiện đại dựa trên vật liệu nano.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

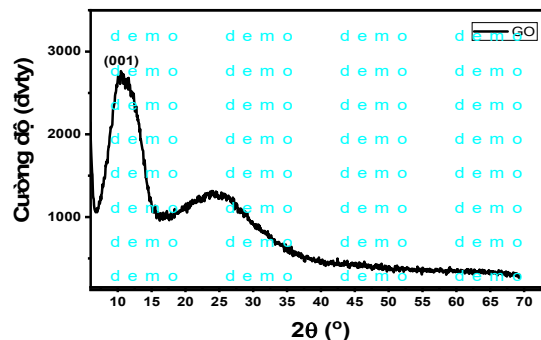
4.1. Kết quả tổng hợp GO

Vật liệu GO được tổng hợp từ graphit và so sánh với mẫu GO thương mại cho thấy sự tương đồng về hình thái, cả hai đều có màu nâu đất hơi vàng khi phân tán trong nước.



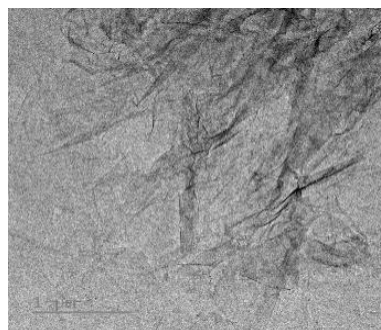
Hình 5. Vật liệu thu được phân tán và GO thương mại phân tán trong nước

Phổ nhiễu xạ tia X của mẫu tổng hợp xuất hiện đỉnh rộng tại $2\theta \approx 10,9^\circ$, tương ứng với mặt (002), chứng tỏ các lớp graphit đã được bóc tách và chèn thêm nhóm chức oxy.



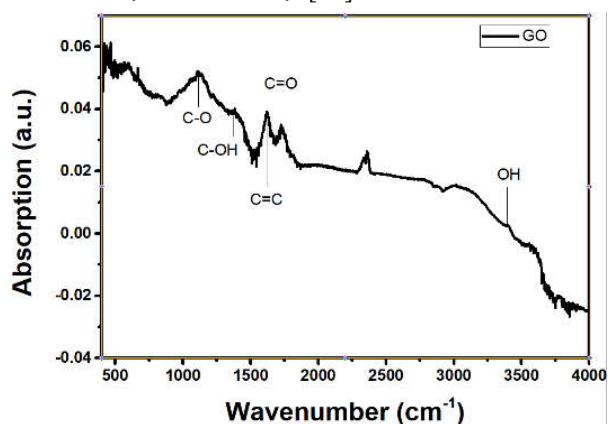
Hình 6. Phổ nhiễu xạ tia X của GO

Ảnh TEM xác nhận cấu trúc lớp mỏng, phân tán tốt trong dung dịch.



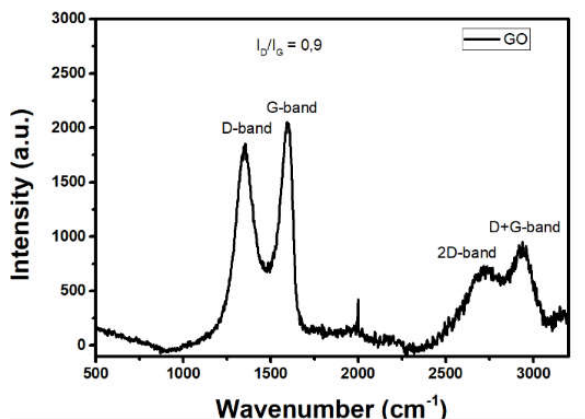
Hình 7. Ảnh TEM của GO

Kết quả phân tích phổ hồng ngoại (FTIR) cho thấy sự hiện diện của các nhóm chức hydroxyl (-OH), carboxyl (-COOH), carbonyl (-C=O) và epoxy (-O-). Các nhóm chức này làm tăng khoảng cách giữa các lớp mạng, giúp GO tan dễ dàng trong nước và tạo điều kiện thuận lợi cho việc gắn kết với các hạt nano kim loại [15].



Hình 8. Phổ FTIR của GO

Phổ Raman của mẫu tổng hợp xuất hiện các dải đặc trưng tại 1362 cm⁻¹ (D) và 1598 cm⁻¹ (G). Vùng D phản ánh các khuyết tật cấu trúc do liên kết sp³, trong khi vùng G liên quan đến dao động sp² của nguyên tử carbon [16].

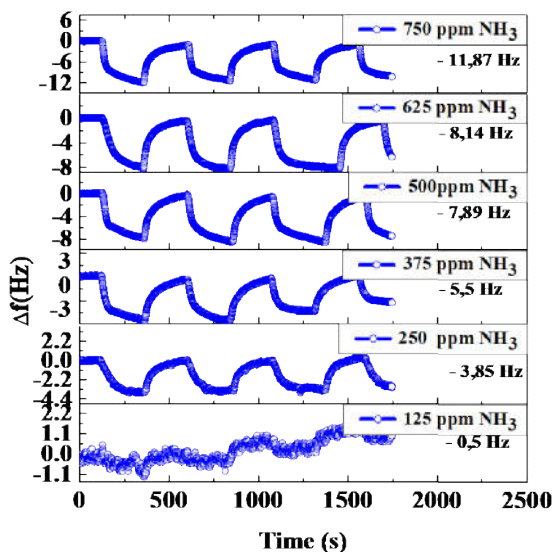


Hình 9. Phổ Raman của vật liệu tổng hợp

Kết hợp các kết quả XRD, TEM, FTIR và Raman, có thể khẳng định nhóm nghiên cứu đã tổng hợp thành công GO với đặc trưng cấu trúc và tính chất phù hợp để ứng dụng trong chế tạo cảm biến.

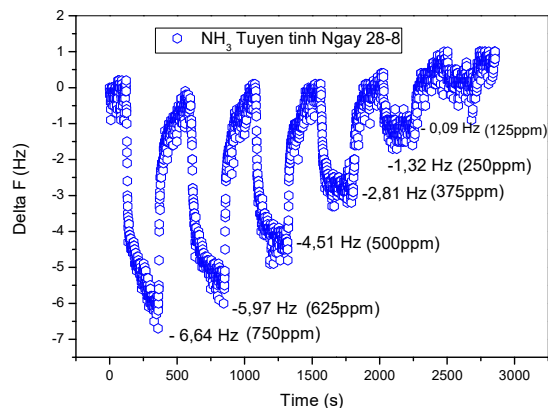
4.2. Kết quả nhạy khí NH₃

Khả năng nhạy khí của cảm biến QCM phủ GO với NH₃ được thể hiện ở Hình 10. Kết quả cho thấy khi nồng độ NH₃ tăng, độ dịch tần số cộng hưởng cũng tăng theo. Với mỗi nồng độ khảo sát (125 - 750 ppm), quá trình đo được lặp lại ba chu kỳ và đều cho tín hiệu ổn định, chứng minh tính lặp lại, khả năng tái sử dụng và độ ổn định của cảm biến.

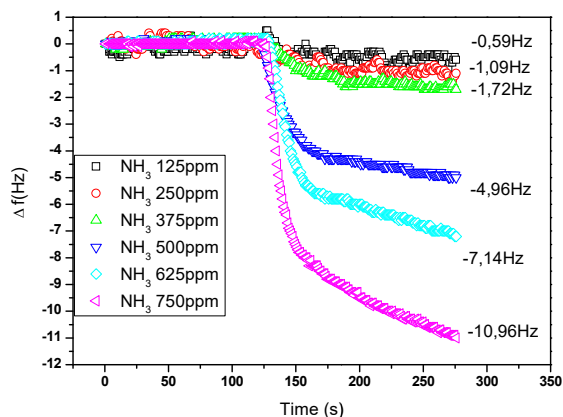


Hình 10. Kết quả nhạy khí NH₃ của GO đo xung theo chu kỳ của các nồng độ khác nhau ở nhiệt độ phòng

Trong thí nghiệm, tần số cơ bản được thiết lập bằng cách thổi không khí khô qua điện cực phủ GO. Khi đưa khí NH₃ vào, tần số cộng hưởng giảm và đạt trạng thái ổn định khi bề mặt cảm biến đã bão hòa hấp phụ. Sau đó, khi thay thế bằng không khí khô, tần số trở lại gần giá trị ban đầu. Kết quả độ dịch tần ở các nồng độ khác nhau (Hình 11, Hình 12) cho thấy xu hướng tuyến tính, mặc dù giá trị tuyệt đối có dao động do yếu tố môi trường (nhiệt độ, độ ẩm).

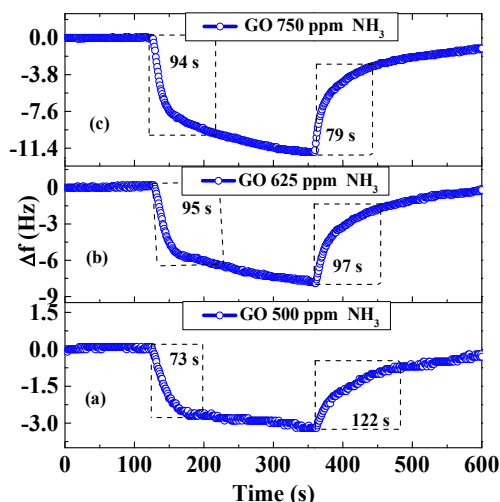


Hình 11. Kết quả nhạy khí NH₃ của GO đo xung theo các nồng độ



Hình 12. Độ lệch tần ứng với nồng độ khí NH₃ khác nhau

Từ phép đo động học (Hình 13), thời gian đáp ứng của cảm biến được xác định khoảng 90 giây và thời gian hồi phục khoảng 100 giây tại các nồng độ 500 - 750 ppm. Độ nhạy trung bình đạt khoảng 0,7 Hz/ppm. So sánh với cảm biến NH₃ dựa trên SnO₂ (thời gian đáp ứng 144s, hồi phục 210 s) [16], kết quả cho thấy QCM/GO có tốc độ phản hồi nhanh hơn.



Hình 13. Thời gian đáp ứng và thời gian hồi phục của cảm biến QCM điện cực phủ GO

Cơ chế nhạy khí được lý giải bởi sự hấp phụ hóa học giữa NH₃ và các nhóm chức oxy (-OH, -COOH, -C=O) trên GO. Các nhóm chức này đóng vai trò như các vị trí hoạt động, tạo liên kết hydro và liên kết cộng hóa trị yếu, đồng thời thúc đẩy quá trình chuyển điện tích từ NH₃ sang GO [17]. So sánh với nghiên cứu sử dụng GO thương mại từ Đại học Chungnam (Hàn Quốc) [18], kết quả của chúng tôi cho thấy cảm biến có thể phát hiện NH₃ ở nồng độ thấp hơn (375 ppm so với 500 ppm), chứng minh ưu thế của phương pháp tổng hợp và chế tạo lớp nhạy trong nghiên cứu này [19].

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, vật liệu graphene oxit (GO) đã được tổng hợp thành công từ graphite bằng phương pháp Hummers cải tiến. Kết quả phân tích XRD, TEM, FTIR và Raman cho thấy GO thu được có cấu trúc lớp mỏng, phân tán tốt trong nước và chứa nhiều nhóm chức oxy (-OH, -COOH, -C=O, -O-). Những đặc tính này giúp tăng khả năng hấp phụ và tạo điều kiện cho việc ứng dụng trong chế tạo cảm biến khí.

Cảm biến QCM phủ GO cho thấy khả năng phát hiện khí NH₃ trong dải nồng độ 125 - 750 ppm ở nhiệt độ phòng. Độ dịch tần số cộng hưởng tăng tuyến tính theo nồng độ khí thử, chứng minh độ nhạy cao và tính ổn định tốt. Thời gian đáp ứng và hồi phục lần lượt khoảng 90 s và 100 s, nhanh hơn so với một số cảm biến dựa trên oxit kim loại. Cơ chế nhạy khí được cho là bắt nguồn từ sự tương tác mạnh giữa các nhóm chức oxy trên bề mặt GO với phân tử NH₃.

Kết quả này khẳng định tiềm năng của GO trong phát triển cảm biến khí NH₃ hoạt động ở điều kiện thường, có chi phí thấp, độ nhạy và tính ổn định cao. Trong tương lai, hướng nghiên cứu có thể mở rộng sang khảo sát độ nhạy đối với các khí độc hại khác, đồng thời tối ưu hóa cấu trúc lớp phủ GO để nâng cao hiệu năng và độ chọn lọc của cảm biến.

MỤC LỤC

[1] A. Lerf, H. He, M. Forster, and J. Klinowski, "Structure of Graphite Oxide Revisited |," vol. 5647, no. 97, pp. 4477-4482, 1998.

[2] S. Tamang, S. Rai, R. Bhujel, N. K. Bhattacharyya, B. P. Swain, and J. Biswas, "A concise review on GO, rGO and metal oxide/rGO composites: Fabrication and their supercapacitor and catalytic applications," *J. Alloys Compd.*, vol. 947, p. 169588, 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.169588.

[3] J. Curie and P. Curie, "Développement par compression de l' électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées," vol. 3, pp. 90-93, 2019.

[4] G. Sauerbrey, "Verwendung von Schwingquarzen zur W ~ igung diinner Schichten und zur Mikrow ~ igung *," vol. 222, 1959.

[5] W. H. King, "Piezoelectric Sorption Detector," *Anal. Chem.*, vol. 36, no. 9, pp. 1735-1739, 1964, doi: 10.1021/ac60215a012.

[6] N. T. Vinh, L. A. Tuan, L. K. Vinh, and N. Van Quy, "Synthesis, characterization, and gas sensing properties of Fe₃O₄/FeOOH

nanocomposites for a mass-type gas sensor," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 118, no. April, p. 105211, 2020, doi: 10.1016/j.mssp.2020.105211.

[7] N. T. Vinh *et al.*, "Dual-functional sensing properties of ZnFe₂O₄ nanoparticles for detection of the chloramphenicol antibiotic and sulphur dioxide gas," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 332, p. 113093, 2021, doi: 10.1016/j.sna.2021.113093.

[8] N. Van Quy, V. A. Minh, N. Van Luan, V. N. Hung, and N. Van Hieu, "Gas sensing properties at room temperature of a quartz crystal microbalance coated with ZnO nanorods," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 153, no. 1, pp. 188-193, 2011, doi: 10.1016/j.snb.2010.10.030.

[9] X. F. Ma, G. Z. Xie, Y. J. Su, H. F. Du, T. Xie, and Y. D. Jiang, "Polyvinylpyrrolidone/graphene oxide thin films coated on quartz crystal microbalance electrode for NH₃ detection at room temperature," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 59, no. 9, pp. 1377-1382, 2016, doi: 10.1007/s11431-016-0281-7.

[10] X. Li, X. Chen, Y. Yao, N. Li, and X. Chen, "High-stability quartz crystal microbalance ammonia sensor utilizing graphene oxide isolation layer," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 196, pp. 183-188, 2014, doi: 10.1016/j.snb.2014.01.088.

[11] L. Kumar and A. K. Sleiti, "Systematic review on ammonia as a sustainable fuel for combustion," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 202, no. March, p. 114699, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114699.

[12] A. Wang, X. Zhang, H. Wang, and H. Xing, "Recent evidence for toxic effects of NH₃ exposure on lung injury: Protective effects of L-selenomethionine," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 242, no. July, p. 113937, 2022, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113937.

[13] R. G. Adler, "Ammonia in Workplace Atmospheres," 2002.

[14] S. W. Chook *et al.*, "Antibacterial performance of Ag nanoparticles and AgGO nanocomposites prepared via rapid microwave-assisted synthesis method," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 7, no. 1, p. 541, 2012, doi: 10.1186/1556-276X-7-541.

[15] R. K. Upadhyay, N. Soin, and S. S. Roy, "Role of graphene/metal oxide composites as photocatalysts, adsorbents and disinfectants in water treatment: A review," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 8, pp. 3823-3851, 2014, doi: 10.1039/c3ra45013a.

[16] M. A. Pimenta, G. Dresselhaus, M. S. Dresselhaus, L. G. Cançado, A. Jorio, and R. Saito, "Studying disorder in graphite-based systems by Raman spectroscopy," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 9, no. 11, pp. 1276-1291, 2007, doi: 10.1039/b613962k.

[17] M. Donarelli *et al.*, "Graphene oxide for gas detection under standard humidity conditions," *2D Mater.*, vol. 2, no. 3, p. 35018, 2015, doi: 10.1088/2053-1583/2/3/035018.

[18] V. Van Cat *et al.*, "Realization of graphene oxide nanosheets as a potential mass-type gas sensor for detecting NO₂, SO₂, CO, and NH₃," *Mater. Today Commun.*, vol. 25, no. May, p. 101682, 2020, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101682.

[19] A. P. Taylor and L. F. Velázquez-García, "Electrospray-printed nanostructured graphene oxide gas sensors," *Nanotechnology*, vol. 26, no. 50, p. 505301, 2015, doi: 10.1088/0957-4484/26/50/505301.