

Nghiên cứu chế tạo cảm biến phát hiện khí cháy nổ NO_2 trên cơ sở vật liệu Zn_2SnO_4 ứng dụng trong quân sự

Dương Ngọc Tùng*, Nguyễn Hồng Hanh

Phòng Kỹ thuật và Công nghệ Ảnh nhiệt, Viện Vật lý Kỹ thuật, Viện KH-CN quân sự.

*Email: tungdn0305@gmail.com.

Nhận bài ngày 13/9/2021; Hoàn thiện ngày 22/10/2021; Chấp nhận đăng ngày 12/12/2021.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.76.2021.120-126>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu chế tạo cảm biến khí phát hiện cháy nổ NO_2 nhằm ứng dụng trong lĩnh vực quân sự. Cảm biến khí được chế tạo dựa trên vật liệu ôxit kim loại bán dẫn Zn_2SnO_4 . Các kết quả phân tích vật liệu, chế tạo cảm biến và đo tính chất nhạy khí NO_2 đã được tiến hành. Thử nghiệm cho thấy cảm biến khí được chế tạo có khả năng phát hiện được chất nổ NO_2 với hàm lượng thấp phù hợp cho các ứng dụng trong quân sự như: kho đạn, kho thuốc súng, hầm lò,...

Từ khóa: Cảm biến khí; Khí cháy nổ; Chất nổ NO_2 .

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong khí thải công nghiệp cũng như trong các chất nổ trong lĩnh vực quân sự thì NO_2 là hỗn hợp gồm nhiều loại khí như NO , NO_2 , N_2O , N_2O_3 , N_2O_4 , và N_2O_5 . Tuy nhiên, trong đó NO và NO_2 chiếm thành phần chủ yếu. Đây là loại khí độc gây ảnh hưởng trực tiếp đến sức khỏe con người. Theo tổ chức OSHA (Mỹ), thì nồng độ khí NO và NO_2 cho phép trong môi trường làm việc bảo đảm sức khỏe chỉ ở mức lần lượt là 25 ppm và 5 ppm. Cho đến nay, nhiều loại vật liệu ôxit kim loại bán dẫn khác nhau đã được nghiên cứu để phát triển cảm biến khí NO_x [1, 2]. Ngay từ rất sớm (những năm 1990), Akiyama và cộng sự đã phát triển cảm biến khí NO_2 trên cơ sở vật liệu WO_3 . Cảm biến loại này nhạy khá tốt với thành phần khí NO và NO_2 ở nồng độ khí là 200 ppm và nhiệt độ làm việc từ 200÷300 °C [3]. Tuy nhiên, độ chọn lọc của cảm biến loại này kém, độ nhạy đối với khí NO_x giảm đáng kể khi đo trong môi trường có mặt các loại khí khác như CO và hydrocarbon. Tamaki và cộng sự đã nghiên cứu sự ảnh hưởng của kích thước hạt WO_3 đến tính chất nhạy khí NO_x của chúng và chỉ ra rằng, nếu giảm kích thước hạt WO_3 xuống khoảng 25 nm thì chúng sẽ có độ nhạy cao nhất với khí NO_x (NO & NO_2). Trong những năm gần đây, người ta đã phát hiện ra rằng các loại vật liệu dây nano và các cấu trúc đa nguyên của các oxit kim loại bán dẫn có khả năng nhạy rất tốt với khí NO_2 .

Gần đây nhất, Patil và cộng sự [4] đã báo cáo việc tổng hợp màng mỏng vật liệu đa nguyên Zn_2SnO_4 bằng phương pháp phun nhiệt phân, vật liệu được ứng dụng cho việc phát hiện khí NO_2 . Cảm biến cho độ đáp ứng khí tốt với khí NO_2 , cảm biến có độ đáp ứng tới 29,3 lần tại 200 °C với 40 ppm NO_2 . Đây là một trong những loại vật liệu tiềm năng để phát triển các loại cảm biến khí NO_2 phục vụ quan trắc môi trường khí trong tương lai và chất lượng khí trong môi trường. Oxit đa nguyên như Zn_2SnO_4 có nhiều ưu điểm hơn so với các ôxit nhị phân thông thường như: trơ về mặt hóa học, bền nhiệt, tính linh động điện tử cao, thân thiện với môi trường [5, 6]. Cảm biến khí sử dụng vật liệu Zn_2SnO_4 với các hình thái khác nhau như hạt nano [7], dây nano [8], quả cầu nano [9] và khối bát diện rỗng [6] đã được thử nghiệm trên nhiều loại khí khác nhau như: H_2S , etanol, axeton và HCHO [10]. Ví dụ, Ma và cộng sự đã chế tạo bát diện rỗng Zn_2SnO_4 ứng dụng cho cảm biến khí H_2S . Cảm biến cho độ đáp ứng tốt, với giá trị độ đáp ứng là 46 đối tại 50 ppm H_2S ở nhiệt độ làm việc là 260 °C [10]. Các cấu trúc nhiều mặt khác nhau đã được tổng hợp bằng cách thay đổi các tiền chất của stannic. Màng mỏng Zn_2SnO_4 đa tinh thể được tổng hợp bởi Young và các cộng sự [11] sử dụng phun xạ magnetron rf và các đặc tính cấu trúc của chúng đã được khảo sát. Nhiều cảm biến thanh nano Zn_2SnO_4 lõi/vỏ ZnO nổi mạng được tổng hợp bởi

Park và các cộng sự [12] và kết quả cho thấy độ đáp ứng tăng từ 173% đến 498% đối với nồng độ từ 1 đến 5 ppm NO_2 ở nhiệt độ 300 °C. Sự bay hơi nhiệt sau đó là lắng đọng lớp nguyên tử ở 1000 °C được sử dụng để tổng hợp cấu trúc thanh nano lõi Zn_2SnO_4 /vỏ ZnO. Ai và các cộng sự [13] đã sử dụng phương pháp thủy nhiệt để tổng hợp các vi ống Zn_2SnO_4 nhằm loại bỏ NO và HCHO khỏi không khí trong nhà để duy trì chất lượng không khí. Họ đã chỉ ra rằng không khí có nồng độ nhỏ hơn 400 ppb đối với NO và 2 ppm đối với HCHO có thể được duy trì bằng cách sử dụng các ống vi Zn_2SnO_4 . Các báo cáo đều cũng chỉ ra rằng độ nhạy khí của các vật liệu ôxít kim loại bán dẫn nói chung và của vật liệu đa nguyên Zn_2SnO_4 phụ thuộc nhiều vào hình thái, kích thước tinh thể, độ xốp, mức độ khuyết tật của chúng, v.v. [6, 10]. Do đó, các nghiên cứu sâu hơn đã chế tạo được cấu trúc nano Zn_2SnO_4 với các hình thái mới nhằm cải thiện hơn nữa về độ nhạy, tốc độ đáp ứng, độ chọn lọc và độ ổn định của cảm biến. So với cấu trúc hạt đặc, vật liệu cấu trúc xốp hoặc rỗng [14] Zn_2SnO_4 có thể tạo ra nhiều các tương tác trên bề mặt hơn, tỷ lệ bề mặt trên thể tích cao hơn và khuếch tán khí nhanh hơn, do đó nâng cao hiệu suất cảm biến [6].

Ngoài ra, hiện nay nhu cầu sử dụng cảm biến khí tại Việt Nam là khá lớn. bảo đảm hóa học cho tác chiến Binh chủng Hóa học là đơn vị bảo đảm các hợp chất hóa học phục vụ tác chiến, ứng dụng nhiều cụm đa cảm biến cho việc phát hiện nhiều loại khí cháy nổ. Nhà máy Z121 (Tổng Cục công nghiệp Quốc phòng) là đơn vị sản xuất pháo hoa, đã ứng dụng nhiều cảnh báo cháy nổ sản phẩm thương mại. Các đa cảm biến thường dùng hiện nay của hãng SIEMENS, hoặc nhập từ các nước G7. Cảnh sát PCCC&CNCH Công an sử dụng các đa cảm biến, cảnh báo cháy nổ, truyền thông tin về trung tâm xử lý. Việc sử dụng cảm biến phát hiện khí cháy nổ NO_2 có tính chuyên dụng cao, ứng dụng trong các kho đạn dược, kho thuốc súng hay hầm lò với việc các khí rò rỉ từ chất liệu làm đạn, thuốc, tích tụ tạo nên các không gian cục bộ tạo ra các vụ cháy nổ cục bộ và lan tỏa. Vì vậy, ngoài việc sử dụng cảm biến nhạy khí NO_2 thì rất cần tích hợp đa cảm biến, cùng với cảm biến báo khói, cảm biến nhiệt,...

Tuy nhiên, chúng ta đang phải sử dụng các sản phẩm nhập khẩu. Nhưng các cảm biến nhập khẩu lại không phù hợp với điều kiện khí hậu của Việt Nam, nên rất hay hỏng hóc và khó thay thế. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày các kết quả chế tạo và phân tích vật liệu Zn_2SnO_4 cấu trúc lập phương rỗng, chế tạo cảm biến dùng để đo tính chất nhạy khí NO_2 ứng dụng trong quân sự như: kho đạn, kho thuốc súng, hầm lò,...

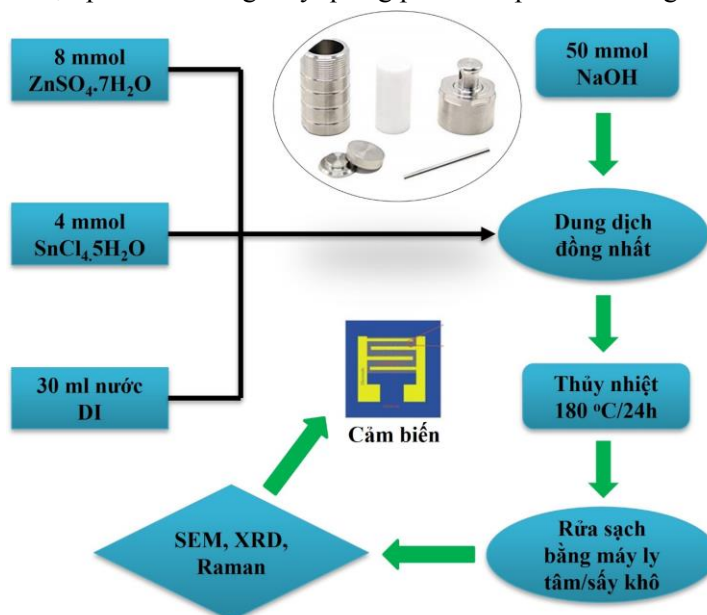
2. THỰC NGHIỆM

Chế tạo vật liệu Zn_2SnO_4 cấu trúc lập phương rỗng và cảm biến

Vật liệu được sử dụng trong nghiên cứu này được mua từ công ty Sigma-Aldrich và được sử dụng mà không cần tinh chế thêm. Vật liệu Zn_2SnO_4 lập phương rỗng được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt hóa học. Quá trình tổng hợp Zn_2SnO_4 được tóm tắt trong hình 1. Trong quy trình tổng hợp trên, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (99,5%) (8 mmol), Pluronic P-123 (99%) (0,5 g) và $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (99%) (4 mmol) được hòa tan trong cốc chứa 30 ml nước khử ion. Sau đó, dung dịch NaOH dần dần được thêm vào hỗn hợp và khuấy trong 15 phút để thu được dung dịch trắng đục có pH = 12. Dung dịch màu trắng sữa được cho vào bình Teflon 100 ml và được đặt trong nồi hấp bằng thép không gỉ để tiến hành thủy nhiệt ở 180 °C trong 24 giờ. Sau khi làm nguội tự nhiên đến nhiệt độ phòng, kết tủa được rửa trong nước khử ion nhiều lần và hai lần trong dung dịch etanol trước khi thu được bằng cách quay trên máy ly tâm ở 4000 vòng/phút trong 15 phút. Sản phẩm trắng (chuyển thành màu trắng) thu được sau đó được làm khô trong lò điện ở 60 °C trong 24 giờ và nung ở 550 °C trong 2 giờ ở môi trường không khí. Cảm biến khí được điều chế bằng phương pháp nhỏ phủ đã được báo cáo trong tài liệu [15].

Quá trình chế tạo cảm biến: Bước 1 làm mạch in 4 lớp, vật liệu FR-4 CEM-1, phíp gỗ, độ dày 0.5 mm; Bước 2 áp dụng phương pháp để tạo các lớp, các đường mạch dẫn điện trên nền cứng. Quá trình in phun tạo phun chất cách điện để ngăn cách các đường dẫn điện ở vị trí chúng vắt qua

nhau; Bước 3 chế tạo điện cực Pt; Bước 4 phân tán của các hạt nano và nhỏ phủ trên các điện cực Pt xen kẽ; Bước 5 cảm biến được nung ở 550 °C trong 2 giờ để ổn định điện trở và tăng khả năng tiếp xúc giữa điện cực Pt và vật liệu. Vật liệu Zn_2SnO_4 tổng hợp được đo đặc trưng nhiễu xạ tia X (XRD; Advance D8, Bruker), cấu trúc hình thái được đo trên kính hiển vi điện tử quét (SEM), thành phần vật liệu được phân tích bằng máy quang phổ tia X phân tán năng lượng (EDX).

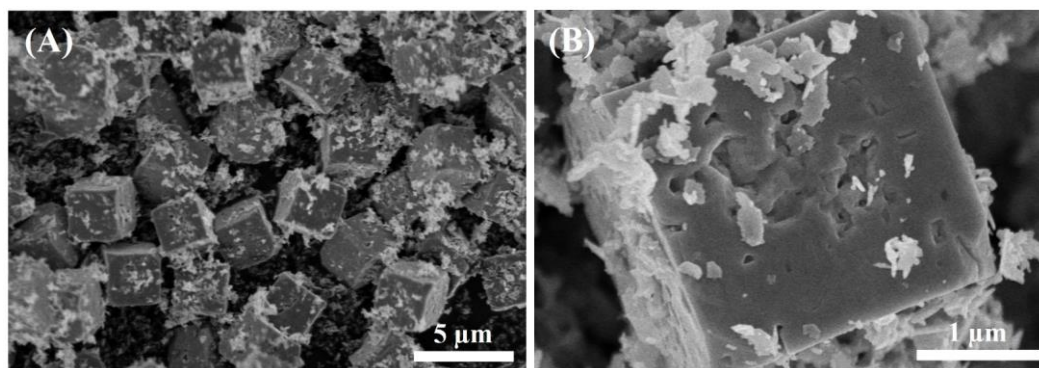


Hình 1. Sơ đồ quy trình chế tạo vật liệu Zn_2SnO_4 và cảm biến.

3. CÁC KẾT QUẢ ĐẠT ĐƯỢC

Đặc trưng của vật liệu Zn_2SnO_4

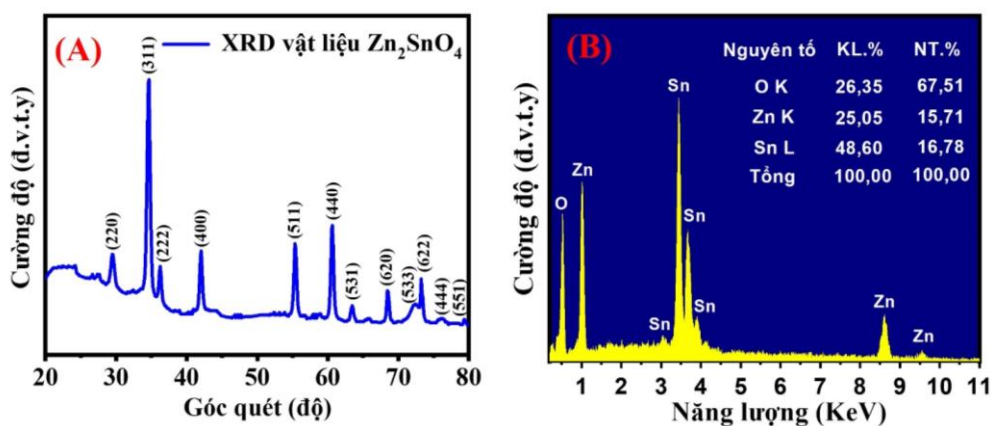
Hình ảnh SEM (trong hình 2) mô tả hình thái và vi cấu trúc của các khối lập phương rỗng Zn_2SnO_4 . Hình 2(A) với ảnh SEM có độ phóng đại thấp của Zn_2SnO_4 cho thấy mẫu chứa nhiều khối lập phương với kích thước từ 2 μm đến 3 μm . Ngoài ra, còn có rất nhiều các mảnh vỡ nhỏ bao phủ các khối lập phương, có lẽ là do các mảnh vỡ của mẫu. Ảnh SEM độ phóng đại cao (trong hình 2(B)) của cấu trúc lập phương Zn_2SnO_4 cho thấy có nhiều lỗ nhỏ, nhiều phoi nhỏ trên bề mặt của các khối lập phương Zn_2SnO_4 , góp phần tăng diện tích bề mặt, điều này chứng tỏ cấu trúc rỗng của các khối lập phương (kết luận này được minh chứng thêm bởi phép đo XRD và (B) EDX).



Hình 2. Hình ảnh SEM của khối lập phương rỗng Zn_2SnO_4 .

Hình 3(A) cho thấy đặc trưng XRD của các khối lập phương rỗng Zn_2SnO_4 , trong đó các đỉnh

nhiều xạ điển hình ở 2θ của $29,316^\circ$; $34,522^\circ$; $36,109^\circ$; $41,938^\circ$; $55,404^\circ$; $60,808^\circ$; $63,914^\circ$; $68,92^\circ$; $71,842^\circ$; $72,804^\circ$; $76,608^\circ$ và $79,422^\circ$ tương ứng với các đỉnh (220); (311); (222); (400); (511); (440); (531); (620); (533); (622); (444) và (551). Rõ ràng là tất cả các đỉnh nhiễu xạ đều phù hợp với cấu hình của pha spinel nghịch đảo của cấu trúc Zn_2SnO_4 lập phương (phù hợp với thẻ JCPDS: 24-1470). Đồng thời không phát hiện thấy đỉnh tạp chất nào, chứng tỏ rằng vật liệu Zn_2SnO_4 sau khi được chế tạo có độ tinh khiết cao [16]. Tất cả các đỉnh đều cho thấy hướng tăng trưởng được ưu tiên là (311) vì cường độ của đỉnh này là cao nhất. Kích thước tinh thể trung bình của vật liệu tổng hợp được tính toán thông qua phương trình Scherrer sử dụng tất cả các đỉnh [7, 17]. Kết quả tính toán thu được kích thước tinh thể trung bình của các khối lập phương Zn_2SnO_4 khoảng 24,16 nm.



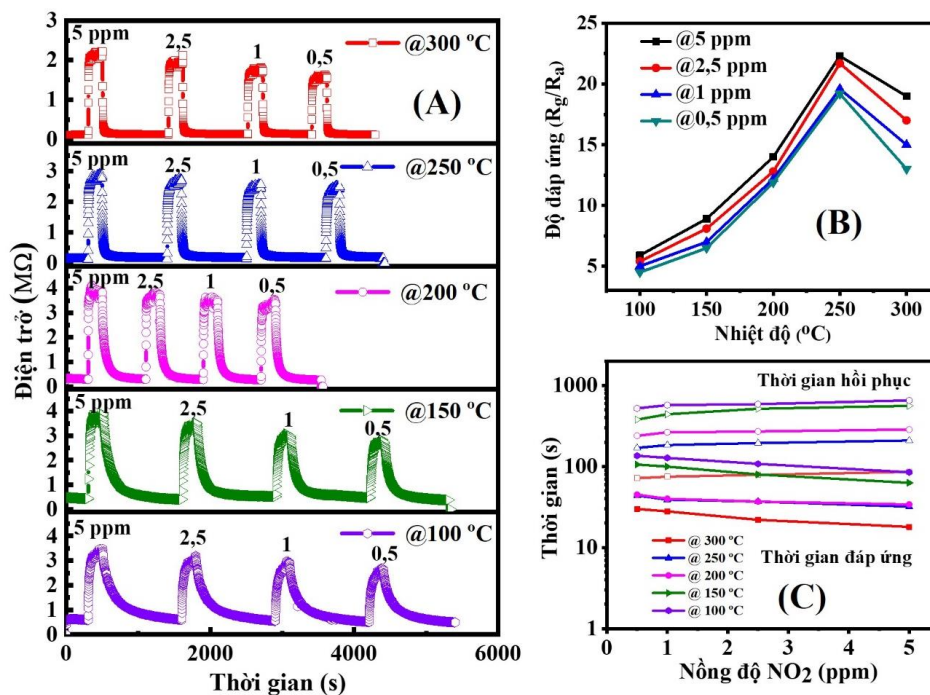
Hình 3. (A) XRD và (B) EDX của khối lập phương Zn_2SnO_4 .

Phân tích EDX vật liệu Zn_2SnO_4 sau chế tạo (trong hình 3(B)) đã chỉ ra rằng sản phẩm Zn_2SnO_4 được tổng hợp chỉ bao gồm Zn, Sn và O. Kết quả này càng khẳng định thêm độ tinh khiết cao của vật liệu Zn_2SnO_4 thu được. Tỷ lệ nguyên tử trung bình của Sn : Zn : O là 16,78 : 15,71 : 67,51, tương ứng với tỷ lệ cân bằng của Zn_2SnO_4 tiêu chuẩn.

Ở các nhiệt độ hoạt động và nồng độ NO_2 khác nhau, các đặc tính nhạy khí NO_2 của cảm biến Zn_2SnO_4 khối lập phương rỗng đã được khảo sát. Hình 4(A) cho thấy sự phụ thuộc của điện trở của cảm biến theo thời gian khi tiếp xúc với các nồng độ NO_2 khác nhau ở nhiệt độ từ 100°C đến 300°C . Điện trở của cảm biến giảm khi nhiệt độ tăng cho thấy hệ số nhiệt độ âm của điện trở cảm biến. Bởi vì năng lượng nhiệt đã kích thích các electron nhảy từ vùng hóa trị sang vùng dẫn khi nhiệt độ làm việc tăng lên, điều này làm giảm điện trở nền của cảm biến. Điện trở nền của cảm biến trong không khí lần lượt là 640 k Ω , 512 k Ω , 365 k Ω , 188 k Ω và 142 k Ω ở 100°C , 150°C , 200°C , 250°C và 300°C . Điện trở của cảm biến tăng lên đáng kể khi tiếp xúc với khí NO_2 thể hiện đặc tính phản ứng nhanh của cảm biến. Điện trở của cảm biến giảm về giá trị ban đầu khi dòng khí phân tích bị dừng lại, cho biết toàn bộ quá trình phản ứng của cảm biến đã phục hồi. Những đặc điểm này chỉ ra một phản ứng thuận nghịch NO_2 trên bề mặt vật liệu nhạy khí Zn_2SnO_4 . Sự hấp phụ thuận nghịch của các phân tử khí trên bề mặt cảm biến của vật liệu nhạy khí Zn_2SnO_4 là rất quan trọng đối với khả năng ứng dụng thực tế và khả năng tái sử dụng của cảm biến khí.

Hình 4(B) cho thấy phản ứng của cảm biến đối với các nồng độ NO_2 khác nhau như là một hàm của nhiệt độ hoạt động. Phản ứng của cảm biến tăng lên rõ rệt khi nồng độ NO_2 tăng từ 0,5 ppm lên 5 ppm. Độ đáp ứng của cảm biến với nồng độ NO_2 tăng lên khi nhiệt độ làm việc tăng từ 100°C lên đến 250°C . Tuy nhiên, khi tăng nhiệt độ làm việc của cảm biến từ 250°C lên 300°C thì độ đáp ứng của nồng độ NO_2 bị giảm. Điều này cho thấy ở mỗi nồng độ NO_2 , độ đáp ứng của cảm biến đối với NO_2 ở 250°C là cao nhất so với các nhiệt độ hoạt động còn lại ở 100°C , 150°C , 200°C và 300°C . Điều này có thể là do sự xung đột giữa quá trình hấp phụ và giải hấp phân

từ khí trên bề mặt của vật liệu cảm biến. Do sự gia tăng của các loại oxy hấp phụ ở nhiệt độ dưới 250 °C, sự hấp phụ của NO₂ trên bề mặt của vật liệu nhạy khí Zn₂SnO₄ tăng lên khi tăng cường quá trình ủ nhiệt. Tuy nhiên, ở nhiệt độ cao hơn 250 °C, quá trình giải hấp được tăng tốc bởi nhiệt độ nhiệt nên làm giảm độ đáp ứng của cảm biến. Do đó, cảm biến đã chứng minh giá trị phản hồi tối đa ở nhiệt độ làm việc là 250 °C.



Hình 4. Các đặc tính nhạy NO₂ của cảm biến Zn₂SnO₄ lập phương rỗng: (A) Đặc trưng điện trở phụ thuộc vào thời gian khi tiếp xúc với các nồng độ NO₂ khác nhau được đo ở các nhiệt độ khác nhau; (B) Độ đáp ứng của cảm biến như một hàm của nồng độ NO₂ theo các nhiệt độ; (C) Thời gian đáp ứng và phục hồi của cảm biến của lập phương rỗng Zn₂SnO₄.

Ngoài giá trị đáp ứng, thời gian đáp ứng và phục hồi của cảm biến cũng rất quan trọng trong các ứng dụng thực tế. Hình 4(C) mô tả thời gian đáp ứng và phục hồi của cảm biến khi đo ở các nồng độ NO₂ khác nhau ở nhiệt độ từ 100 °C đến 300 °C. Thời gian đáp ứng giảm do thời gian hấp phụ NO₂ trên các vị trí hoạt động của khối lập phương rỗng Zn₂SnO₄ giảm khi nồng độ NO₂ tăng từ 0,5 ppm đến 5 ppm. Tuy nhiên, thời gian hồi phục đã tăng lên vì thời gian cần thiết để giải hấp NO₂ lâu hơn. Ở nhiệt độ làm việc 250 °C, thời gian đáp ứng khoảng 44 s ở 0,5 ppm của NO₂ giảm xuống còn khoảng 32 s khi tăng nồng độ lên 5 ppm. Ngược lại, thời gian hồi phục khoảng 170 s ở 0,5 ppm của NO₂ tăng lên khoảng 210 s khi tăng nồng độ lên 5 ppm.

Bảng 1. So sánh khả năng nhạy khí NO₂ của các cảm biến oxit kim loại.

Cảm biến oxit kim loại	Nhiệt độ (°C)	Nồng độ khí (ppm)	Độ đáp ứng (R _a /R _g)	Tài liệu tham khảo
Màng mỏng Zn ₂ SnO ₄	200	200	2,66	[18]
Màng mỏng Zn ₂ SnO ₄	200	40	29,3	[4]
Dây nano Zn ₂ SnO ₄	200	1	7,7	[19]
Dây nano lõi-vỏ ZnO-SnO ₂	300	10	12,3	[20]
Màng mỏng Mo-SnO ₂	270	10	20	[21]

Khối lập phương rỗng Zn₂SnO₄	250	0,5	19,2	Trong bài báo
---	-----	-----	------	----------------------

Bảng 1 so sánh kết quả nhạy khí NO₂ bằng cách sử dụng các vật liệu và hình thái oxit kim loại khác nhau trong các nghiên cứu gần đây. Trong số các kết quả so sánh trong bảng 1, khối lập phương rỗng Zn₂SnO₄ mà chúng tôi chế tạo có độ đáp ứng với khí NO₂ là lớn nhất. Bởi vì các hình thái khác nhau có các diện tích bề mặt riêng khác nhau và các vị trí hấp phụ đối với các phân tử khí bị hấp thụ cũng thay đổi theo. Rõ ràng là vật liệu và hình thái có tác động đáng kể đến độ nhạy của cảm biến. Ở đây, hiệu suất tuyệt vời của cấu trúc lập phương rỗng Zn₂SnO₄ của cảm biến khí trên có thể là do diện tích bề mặt riêng tương đối cao của nó giúp cải thiện các vị trí hiệu quả của quá trình hấp phụ cũng như sự khuếch tán khí trong vật liệu cảm biến khí, dẫn đến làm tăng độ nhạy của cảm biến [4, 18-21].

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này chúng tôi đã chế tạo thành công cảm biến phát hiện khí cháy nổ NO₂ nhằm ứng dụng trong các kho tàng quân sự. Cảm biến trên cho độ đáp ứng là 19,2 tại 0,5 ppm NO₂ ở 250 °C. Sự khác biệt so với công trình trước đây, chúng tôi chế tạo cảm biến phát hiện khí NO₂ đo ở nhiệt độ thấp. Cảm biến được chế tạo dựa trên vật liệu nhạy khí Zn₂SnO₄. Vật liệu Zn₂SnO₄ được chế tạo bằng phương pháp thủy nhiệt có dạng khối lập phương rỗng với độ tinh khiết và kết tinh cao. Các kết quả trên cho thấy cảm biến khí được chế tạo có khả năng phát hiện được chất nổ NO₂ với hàm lượng thấp phù hợp cho các ứng dụng trong quân sự như: kho đạn, kho thuốc súng, hầm lò,...

Giải thích về từ cảm biến theo ý cá nhân của tác giả: Được thay cho từ sensor, đa cảm biến, cho cả cụm sensor,...

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin cảm ơn sự hỗ trợ và hợp tác của Viện ITIMS – Trường Đại học Bách khoa Hà Nội để hoàn thành các kết quả trong bài báo trên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. K. M. S. et al., "Sputter deposited p-NiO/n-SnO₂ porous thin film heterojunction based NO₂ sensor with high selectivity and fast response," *Sensors Actuators B Chem.*, **Vol. 310** (2020), p. 127830.
- [2]. H. S. Jeong et al., "Low temperature NO₂ sensing properties of RF-sputtered SnO-SnO₂ heterojunction thin-film with p-type semiconducting behavior," *Ceram. Int.*, **Vol. 44** (2018), pp. 17283–17289.
- [3]. M. Akiyama et al., "Tungsten Oxide-Based Semiconductor Sensor Highly Sensitive to NO and NO₂," *Chem. Lett.*, **Vol. 20** (1991), pp. 1611–1614.
- [4]. M. A. Patil et al., "Fast response and highly selective nitrogen dioxide gas sensor based on Zinc Stannate thin films," *Mater. Sci. Energy Technol.*, **Vol. 3** (2020), pp. 36–42.
- [5]. H. X. Thanh et al., "On-chip growth of single phase Zn₂SnO₄ nanowires by thermal evaporation method for gas sensor application," *J. Alloys Compd.*, **Vol. 708** (2017), pp. 470–475.
- [6]. N. H. Hanh et al., "A comparative study on the VOCs gas sensing properties of Zn₂SnO₄ nanoparticles, hollow cubes, and hollow octahedra towards exhaled breath analysis," *Sensors Actuators B Chem.*, **Vol. 343** (2021), p. 130147.
- [7]. D. An et al., "Synthesis of Zn₂SnO₄ via a co-precipitation method and its gas-sensing property toward ethanol," *Sensors Actuators B Chem.*, **Vol. 213** (2015), pp. 155–163.
- [8]. T. Tharsika et al., "Gas sensing properties of zinc stannate (Zn₂SnO₄) nanowires prepared by carbon assisted thermal evaporation process," *J. Alloys Compd.*, **Vol. 618** (2015), pp. 455–462, Jan. 2015.
- [9]. D. An et al., "Ethanol gas-sensing characteristic of the Zn₂SnO₄ nanospheres," *Ceram. Int.*, **Vol. 42** (2016), pp. 3535–3541.
- [10]. G. Ma et al., "Phase-controlled synthesis and gas-sensing properties of zinc stannate (ZnSnO₃ and Zn₂SnO₄) faceted solid and hollow microcrystals," *CrystEngComm*, **Vol. 14** (2012), p. 2172.
- [11]. D. L. Young et al., "Structural characterization of zinc stannate thin films," *J. Appl. Phys.*, **Vol. 91**

- (2002), pp. 1464–1471.
- [12].S. Park et al., “Synthesis of Nanograined ZnO Nanowires and Their Enhanced Gas Sensing Properties,” ACS Appl. Mater. Interfaces, **Vol. 4** (2012), pp. 3650–3656.
- [13].Z. Ai et al., “Photocatalytic removal of NO and HCHO over nanocrystalline Zn₂SnO₄ microcubes for indoor air purification,” J. Hazard. Mater., **Vol. 179** (2010), pp. 141–150.
- [14].Y. F. Sun et al., “Metal Oxide Nanostructures and Their Gas Sensing Properties: A Review,” Sensors, **Vol. 12** (2012), no. 3, pp. 2610–2631.
- [15].N. H. Hanh et al., “VOC gas sensor based on hollow cubic assembled nanocrystal Zn₂SnO₄ for breath analysis,” Sensors Actuators A Phys., **Vol. 302** (2020), p. 111834.
- [16].M. Miyauchi et al., “Single crystalline zinc stannate nanoparticles for efficient photo-electrochemical devices,” Chem. Commun., **Vol. 46** (2010), p. 1529.
- [17].H. M. Yang et al., “Synthesis of Zn₂SnO₄ hollow spheres by a template route for high-performance acetone gas sensor,” Sensors Actuators B Chem., **Vol. 245** (2017), pp. 493–506.
- [18].V. V. Ganbavle et al., “Development of Zn₂SnO₄ thin films deposited by spray pyrolysis method and their utility for NO₂ gas sensors at moderate operating temperature,” J. Anal. Appl. Pyrolysis, **Vol. 107** (2014), pp. 233–241.
- [19].C. M. Hung et al., “Comparative effects of synthesis parameters on the NO₂ gas-sensing performance of on-chip grown ZnO and Zn₂SnO₄ nanowire sensors,” J. Alloys Compd., **Vol. 765** (2018), pp. 1237–1242.
- [20].I. S. Hwang et al., “Synthesis and gas sensing characteristics of highly crystalline ZnO–SnO₂ core–shell nanowires,” Sensors Actuators B Chem., **Vol. 148** (2010), pp. 595–600.
- [21].E. Zampiceni et al., “Mo influence on SnO₂ thin films properties,” Thin Solid Films, **Vol. 418** (2002), pp. 16–20.

ABSTRACT

FABRICATION OF SELECTIVE NITROGEN-DIOXIDE GAS SENSOR IN MILITARY APPLICATIONS

In this work, we presented the results of research and manufacture of NO₂ explosion detection gas sensors for military application. The gas sensor was fabricated based on Zn₂SnO₄ semiconductor metal oxide material. The results of material analysis, sensor fabrication, and measurement of NO₂ sensitivity have been carried out. The results showed that the manufactured gas sensor was capable of detecting NO₂ explosives with low concentration, suitable for military applications such as ammunition depots, gunpowder depots, mines.

Keywords: Gas sensor; Explosive gas; NO₂.