

Xây dựng đường chuẩn và khảo sát đặc tính nhạy khí H₂ của thiết bị cảm biến hoạt động ở công suất thấp

Calibration Curve Building and Sensing Characteristics of Low Power Consumption H₂ Gas Sensor

Nguyễn Văn Toán*, Nguyễn Xuân Thái, Nguyễn Văn Duy, Chử Mạnh Hưng

Viện Đào tạo Quốc tế về Khoa học Vật liệu, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

*Email: ntoan@itims.edu.vn; toan.nguyenvan2@hust.edu.vn

Tóm tắt

Phát hiện và báo động sự rò rỉ khí hydro (H₂) là vấn đề cực kỳ quan trọng trong quá trình sử dụng. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã xây dựng đường chuẩn nhiệt độ, công suất và khảo sát đặc tính nhạy khí H₂ cho thiết bị đo dựa trên cơ sở cảm biến sử dụng màng mỏng nano SnO₂ biến tính tinh thể đảo xúc tác Pd. Dựa trên điện áp đặt vào từ 0,5 đến 9 V, công suất tiêu thụ của lò vi nhiệt tăng 4 đến 665 mW sẽ tương ứng với nhiệt độ cấp cho cảm biến từ 70,8 °C đến 362,8 °C. Công suất làm việc tối ưu của thiết bị cảm biến được tìm thấy tại 180 mW, tại đây thiết bị cho độ nhạy 2,7 lần đối với 100 ppm H₂. Kết quả khảo sát cho thấy thiết bị đo khí này có thể đo được tới nồng độ 25 ppm H₂. Thiết bị cho độ chọn lọc khí H₂ cao hơn hẳn so với các khí khác như CO và C₂H₅OH

Từ khóa: Màng mỏng SnO₂/Pd, Cảm biến khí, Thiết bị đo khí H₂

Abstract

Detection and alarm of hydrogen (H₂) gas leakage is an extremely important issue. In this study, we have built temperature, power calibration curves of the H₂-sensitive instrumentation using the sensor based on the SnO₂ thin film decorated with catalytic Pd islands. Based on the applied voltage of 0.5 to 9 V, the power consumption of the micro-heater increased 4 to 665 mW, which corresponds to the temperature of the sensor ranging from 70.8 °C to 362.8 °C. The optimum working power of the sensor was found to be 180 mW, in which the instrumentation showed the highest response of 2.7 times to 100 ppm H₂. The findings show that this gas instrumentation can measure down to 25 ppm H₂. The instrumentation showed a highest selectivity to H₂ compared to other gases such as CO and C₂H₅OH.

Keywords: SnO₂/Pd thin film, gas sensors, H₂ detection instrument

1. Giới thiệu

Khí hydro (H₂) có tiềm năng rất lớn trở thành một nguồn năng lượng xanh, sạch và năng lượng tái tạo để ứng dụng làm pin nhiên liệu cho các phương tiện vận tải như ô tô, máy phát điện, v.v [1]. Khí H₂ là một chất khí nhẹ, không màu, không mùi, khó khấn trong việc lưu trữ và vận chuyển vì nó rất dễ cháy nổ và có thể rò rỉ dễ dàng từ các bình chứa nếu không được xử lý cẩn thận [2-4]. Vì vậy, việc phát hiện rò rỉ khí H₂ đã trở thành một vấn đề hết sức quan trọng bởi việc rò rỉ khí H₂ sẽ gây nên các tai nạn về cháy nổ, ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe của con người và tài sản. Do đó, đòi hỏi một lượng rất lớn cảm biến khí để phát hiện và báo động về sự rò rỉ của khí H₂ trong quá sản xuất, bảo quản, vận chuyển và sử dụng [5-7]. Có rất nhiều loại vật liệu ôxít kim loại bán dẫn như SnO₂, TiO₂, ZnO, WO₃,... dưới dạng dây nano, hạt nano, màng mỏng nano được sử dụng làm cảm biến đo khí, trong đó có khí hydro [8-10]. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng, vật liệu màng mỏng có cấu

trúc nano có rất nhiều tiềm năng để ứng dụng làm cảm biến khí.

Màng mỏng nano có nhiều ưu điểm như dễ dàng tích hợp với công nghệ vi điện tử về mặt công nghệ, đơn giản trong việc chế tạo. Điều này rất thích hợp cho việc sản xuất hàng loạt để thương mại hóa các sản phẩm. Tác giả Shahabuddin và cộng sự đã công bố về cảm biến đo khí H₂ dựa trên công nghệ chế tạo màng mỏng SnO₂ bằng phương pháp phún xạ, sau đó biến tính với các vật liệu kim loại khác nhau để đo khí H₂ [11]. Cũng dựa trên công nghệ in lưới tác giả Xie và cộng sự đã công bố chế tạo màng mỏng SiO₂ và vật liệu WO₃ biến tính với các kim loại như Pd, Pt theo các tỷ lệ nồng độ khác nhau để cảm biến lọc khí với khí khác nhau như CO, NO, NO₂ và H₂ [12]. Sự tăng độ đáp ứng của khí H₂ phụ thuộc vào các hoạt động xúc tác của các kim loại quý như Pd trên phân biên của H₂ và ôxy phân tử hình thành trên vùng nghèo làm thay đổi độ dẫn của vật liệu [13]. Tác giả German và cộng sự đã tính toán mô phỏng sự hấp phụ của khí H₂ trên bề mặt (110) của màng mỏng SnO₂ khi các nguyên tử Pd được thêm vào trên bề mặt làm chất xúc tác. Dựa trên kết quả nghiên cứu và tính toán, tác giả nhận thấy sự hấp phụ khí H₂ khi có và không có nguyên tử Pd và Pdn thì có nguyên tử Pd và

Pdn là tốt hơn cả [14]. Phương pháp thông thường nhất để biến tính các vật liệu kim loại vào bán dẫn oxit kim loại thuần làm xúc tác như pha tạp, biến tính và chức năng hóa bề mặt. Các phương pháp này được đề xuất tiên hành đó là bằng phương pháp hóa học do các ion kim loại dễ dàng xảy ra trong phản ứng. Việc pha tạp mẫu khối hoặc trên bề mặt của kim loại chủ yếu sử dụng phương pháp oxy hóa ướt. Ưu điểm của phương pháp này là đơn giản, giá thành rẻ. Tuy nhiên phương pháp này lại có nhược điểm là không kiểm soát được chiều dày màng và mật độ xúc tác của vật liệu pha tạp [5]. Gần đây, các phương pháp vật lý đã được sử dụng để pha tạp hay biến tính trên bề mặt của oxit kim loại. Khi pha tạp thêm kim loại quý, các hạt nano kim loại quý sẽ làm tăng quá trình hấp thụ của các gốc oxy (O^{\cdot} , O^{2-} , $O_2^{\cdot-}$) trên bề mặt của vật liệu do hiệu ứng *Spillover*, dẫn tới sẽ làm tăng tính nhạy khí của vật liệu. Trong hiệu ứng *spillover* thì các kim loại quý đóng vai trò như các “cổng dẫn” “điểm tích cực” cho các gốc oxy đi qua hấp thụ vào vật liệu [4,13]. Bên cạnh đó, những kim loại xúc tác sẽ thay đổi trạng thái điện tử dẫn tới thay đổi chiều cao thế bề mặt, từ đó làm thay đổi điện tử dẫn trong vật liệu bán dẫn oxit. Với kích thước cỡ micro-mét của đảo xúc tác đã làm tăng cường độ đáp ứng của cảm biến khí trên cơ sở màng mỏng SnO_2 [11,13]. Đây là tiền đề rất quan trọng để có thể đưa cảm biến đo khí H_2 trên cơ sở màng mỏng SnO_2/Pd vào ứng dụng trong cuộc sống thực tiễn. Tuy nhiên, hướng tới ứng dụng thực tế trong giám sát ô nhiễm không khí, sự rò rỉ, cháy nổ của khí H_2 chip cảm biến nên được tích hợp vào hệ thống đo cầm tay. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung vào việc xây dựng đường chuẩn công suất, nhiệt độ làm việc của cảm biến và khảo sát khả năng làm việc của thiết bị cảm biến với khí H_2 tại công suất thấp dựa trên cơ sở màng mỏng Pd/SnO_2 chế tạo bằng phương pháp phun xạ kết hợp với công nghệ vi điện tử.

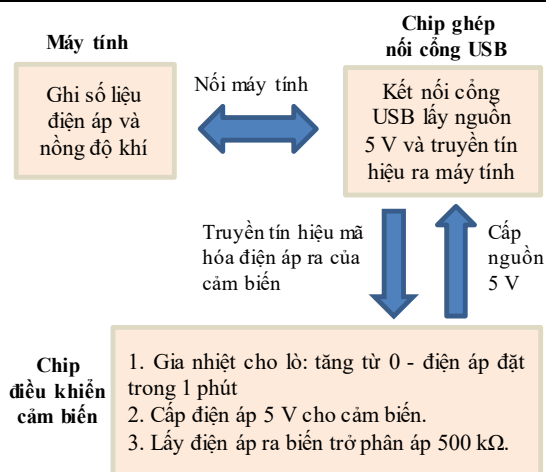
2. Thử nghiệm

Trên cơ sở kết quả đo khảo sát đặc trưng nhạy khí H_2 của màng mỏng SnO_2/Pd (dày 10 nm) [13], chúng tôi đã thiết kế và chế tạo thiết bị đo khí H_2 dựa trên nguyên lý đo sự thay đổi điện áp trên biến trở mắc nối tiếp với cảm biến: khi có sự thay đổi nồng độ khí thổi vào/ra thì điện trở của cảm biến sẽ thay đổi, từ đó điện áp rơi trên biến trở cũng thay đổi tương ứng. Sơ đồ nguyên lý của thiết bị đo khí H_2 được thể hiện trên Hình 1. Chip cảm biến được kết nối với máy tính thông qua cổng kết nối USB để cấp nguồn 5V để cấp điện áp để gia nhiệt cho lò vi nhiệt cũng như điện áp của màng nhạy cảm biến hoạt động. Cũng thông qua cổng kết nối USB để lấy tín hiệu điện áp ra của cảm biến. Máy tính sẽ ghi số liệu vào ra của cảm biến và nồng độ khí cấp khi hoạt động.

Việc khảo sát giá trị điện trở của lò vi nhiệt phụ thuộc vào điện áp và nhiệt độ của lò vi nhiệt phụ thuộc vào điện trở được chúng tôi tiến hành theo các bước sau:

Bảng 1. Các thông số điện và nhiệt độ của lò vi nhiệt.

Điện thế(V)	Dòng điện(A)	Điện trở(Ω)	Công suất(W)	Nhiệt độ($^{\circ}C$)
0,5	0,008	61,35	0,004	70,804
1,0	0,016	62,5	0,016	78,006
1,5	0,023	64,655	0,035	89,04
2,0	0,03	67,002	0,06	100,614
2,5	0,036	70,126	0,089	115,613
3,0	0,041	73,439	0,123	131,593
3,5	0,045	77,093	0,159	149,044
4,0	0,05	80,645	0,198	166,103
4,5	0,053	84,666	0,239	185,374
5,0	0,057	88,496	0,283	203,636
5,5	0,059	92,671	0,326	223,624
6,0	0,062	96,618	0,373	242,521
6,5	0,065	100,775	0,419	262,409
7,0	0,067	105,263	0,466	283,872
7,5	0,069	109,489	0,514	304,081
8,0	0,071	113,475	0,564	323,144
8,5	0,072	117,729	0,614	343,479
9,0	0,074	121,786	0,665	362,814



Hình 1. Sơ đồ ghép nối hệ thống của thiết bị đo.

Bước 1: Chuẩn nhiệt độ của cảm biến và điện trở của lò vi nhiệt. Từ việc đo điện trở của cảm biến ở các nhiệt độ khác nhau chúng tôi đưa ra được đường đặc tuyến giữa điện trở, nhiệt độ và công suất lò vi nhiệt của cảm biến như trên

Bước 2: Cấp các điện áp khác nhau (từ 0,5 ÷ 9 V) và đo dòng điện chạy qua lò vi nhiệt qua đó tính được các giá trị điện trở. Dựa trên các giá trị điện trở này, xây dựng đường phụ thuộc nhiệt độ và công suất tiêu thụ của lò vi nhiệt vào điện áp và công suất tiêu thụ Hình 2. Từ các đặc tuyến ta thấy ứng với điện áp cấp cho lò vi nhiệt của cảm biến từ 0,5 ÷ 9 V thì nhiệt độ của lò vi nhiệt sẽ biến thiên từ 70 ÷ 362 $^{\circ}C$ và công suất tiêu thụ nhỏ hơn 700 mW. Chúng tôi khảo sát các đặc trưng đáp ứng cũng như độ đáp ứng khí của cảm biến trong vùng điện áp này. Theo thiết kế của loại cảm biến này thì nhiệt độ của lò vi nhiệt và nhiệt

độ trong vùng nhạy khí có sự sai khác nhau nhất định. Tuy nhiên khoảng cách từ lò vi nhiệt đến vùng nhạy khí chỉ khoảng 40 μm , nên sự sai khác về nhiệt độ giữa hai vùng này là không đáng kể. Chính vì vậy, nhiệt độ của lò vi nhiệt có thể coi là nhiệt độ hoạt động của cảm biến. Từ các đặc tuyến khảo sát chúng tôi đưa ra bảng thay đổi thông số dòng điện, điện trở và công suất theo điện thế đặt vào từ đó và so sánh với nhiệt độ ngoài của lò vi nhiệt như được trình bày trong Bảng 1.

Trên Hình 2 là sự phụ thuộc giữa nhiệt độ cấp nhiệt ngoài trong dải nhiệt độ từ 100°C – 362,8 °C và công suất cấp cho lò vi nhiệt trong dải từ 60 mW đến 665 mW. Các giá trị nhiệt độ và công suất này ta thấy là tương đồng khi xét theo các giá trị điện trở tương ứng của lò vi nhiệt như trên Hình 2. Từ đó ta có thể dựa vào công suất tiêu thụ của lò vi nhiệt ta tính được nhiệt độ của lò vi nhiệt cấp cho cảm biến hoạt động [15].

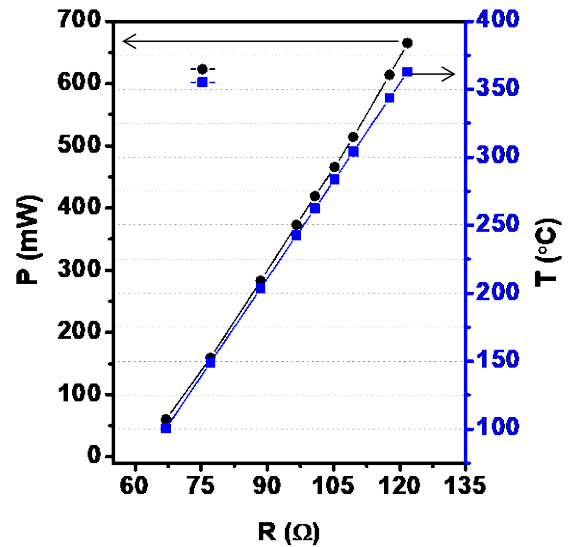
3. Kết quả và thảo luận

Khi đưa cảm biến lên mạch, sự thay đổi của điện trở cảm biến được chuyển thành sự biến thiên của điện áp rơi trên biến trở 100 k Ω mắc nối tiếp với cảm biến. Lúc này độ biến thiên điện áp ra được xác định theo công thức: $V_{out} = R_v * S / (R_s + R_v)$, trong đó V_{out} , R_s , và R_v tương ứng là điện áp ra, điện trở cảm biến, và giá trị đặt của biến trở. Như vậy với sự có mặt của khí H_2 trong môi trường dẫn tới sự tăng điện trở của cảm biến R_s sẽ cho kết quả là điện áp ra V_{out} giảm. Do vậy, độ đáp ứng của thiết bị cảm biến với khí H_2 được tính dựa theo công thức $S = V_{in} / V_{out}$, trong đó V_{in} là điện áp cấp.

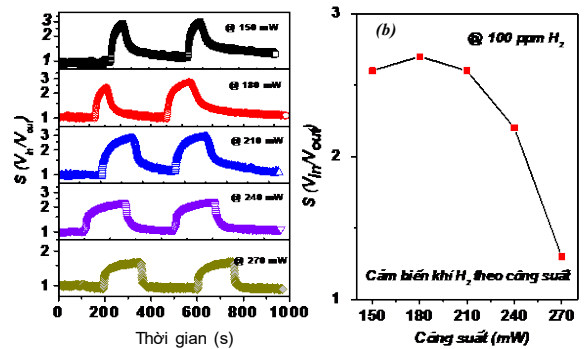
Trên Hình 3(a) là kết quả đo nhạy khí theo công suất tiêu thụ trong dải công suất từ 150 – 270 mW, với các nồng độ 100 ppm khí H_2 (nhiệt độ phòng, độ ẩm khoảng 80%). Ta thấy cảm biến đáp ứng tốt và duy trì ở các mức điện áp ra ổn định ứng với nồng độ khí đo. Những sự thay đổi điện áp ra này nếu được tiến hành xử lý và hiển thị sẽ cho ra các giá trị nồng độ khí thực tế đo được. Trên Hình 3(b) với công suất khác nhau trong dải từ 150 mW đến 270 mW, ta nhận thấy thiết bị cảm biến đạt độ đáp ứng với các giá trị 2,6; 2,7; 2,6; 2,2 và 1,2 lần ứng với trả trị trong dải công suất từ 150 đến 270 mW. Thiết bị cảm biến cho độ đáp ứng cao nhất tại giá trị công suất 180 mW, độ đáp ứng của cảm biến đạt 2,7 lần.

Thời gian đáp ứng (τ_{res}) và thời gian hồi phục (τ_{rec}) là những thông số quan trọng khác để đánh giá cảm biến khí. Thời gian đáp ứng được tính là thời gian để điện áp của cảm biến giảm đến 90% của giá trị điện áp ban đầu tính từ thời điểm đo khí H_2 . Thời gian hồi phục là thời gian để điện áp cảm biến trở về 90% của giá trị điện áp ban đầu (trong môi trường không khí). Thời gian đáp ứng, hồi phục của cảm biến tùy thuộc vào công suất tiêu thụ của cảm biến. Thời gian đáp ứng cụ thể được tính toán với giá trị

công suất là 270, 240, 210, 180 và 150 mW đạt giá trị 8, 16, 49, 80 và 110 giây. Thời gian hồi phục là 53, 65, 74, 96 và 180 giây tương ứng với công suất lần lượt là 270, 240, 210, 180 và 150 mW.



Hình 2. Đường chuẩn nhiệt độ và công suất tiêu thụ phụ thuộc điện trở của lò vi nhiệt.

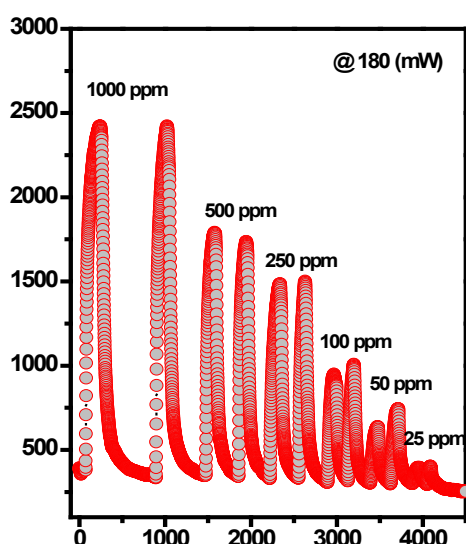


Hình 3. Đặc trưng nhạy khí của thiết bị cảm biến SnO₂/Pd phụ thuộc công suất theo thời gian (a) và độ đáp ứng khí theo công suất tại nồng độ 100 ppm khí H₂ (b).

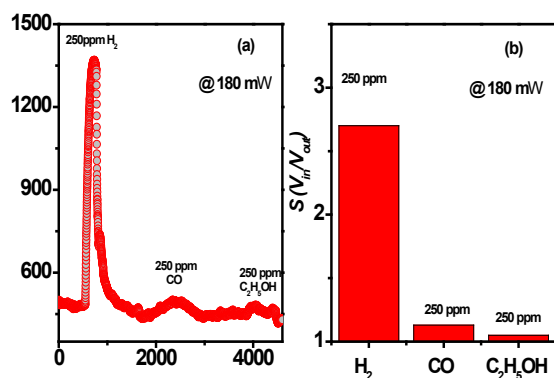
Sau khi tìm được công suất làm việc tối ưu của thiết bị cảm biến tại công suất 180 mW, dựa trên điều kiện công suất này chúng tôi khảo sát đặc trưng nhạy khí H_2 với các nồng độ khác nhau (25 – 1000 ppm) của thiết bị cảm biến như trên Hình 4. Ta nhận thấy thiết bị cảm biến cho độ đáp ứng và hồi phục tốt với các nồng độ khí khác nhau. Độ đáp ứng của thiết bị cảm biến giảm tuyến tính theo nồng độ khí cấp với các giá trị nồng độ là 1000; 500; 250; 100; 50 và 25 ppm khí H_2 .

So sánh với một số cảm biến thương mại đo khí H_2 có sẵn trên thị trường như MQ-8 của hãng Zhengzhou Winsen Electronics Technology CO., LTD thì công suất tiêu thụ của cảm biến xấp xỉ 900 mW [16]. Cũng như mẫu MQ-8 của hãng HANWEI ELETRONICS CO.,LTD thì công suất tiêu thụ cho cảm biến xấp xỉ 800 mW [17]. Cảm biến đo

khí H₂ loại SGAS701 của hãng Integrated Device Technology, Inc thì công suất tiêu thụ của cảm biến là khoảng 600 mW [18]. Chúng tôi nhận thấy thiết bị cảm biến của chúng tôi chế tạo có công suất tiêu thụ cảm biến thấp hơn hẳn so với một số thiết bị đo có sẵn trên thị trường. Đây là một trong những điều rất có ý nghĩa nhằm giảm công suất tiêu thụ của thiết bị từ đó nâng cao khả năng ứng dụng trong các thiết bị đo cầm tay, thiết bị ứng dụng internet vạn vật kết nối.



Hình 4. Đặc trưng đáp ứng khí H₂ của thiết bị cảm biến SnO₂/Pd theo nồng độ khí khác nhau tại công suất 180 mW.



Hình 5. Độ chọn lọc khí của thiết bị cảm biến SnO₂/Pd theo các nồng độ khí khác nhau tại công suất 180 mW (b).

Độ chọn lọc cũng là một thông số quan trọng của thiết bị cảm biến khí. Do đó, chúng tôi khảo sát độ hồi đáp của thiết bị cảm biến với các khí khác nhau như H₂ (250 ppm), CO (250 ppm) và C₂H₅OH (2500 ppm) tại công suất 180 mW. Độ đáp ứng như một hàm của nồng độ khí được chỉ ra trên Hình 5 (a). Ta nhận thấy rằng thiết bị cảm biến màng mỏng SnO₂/Pd có thể đáp ứng với các loại khí khác nhau. Kết quả trên Hình 5(b) cho thấy độ nhạy của thiết bị cảm biến đạt giá trị 2,7 lần với nồng độ 250 ppm khí

H₂; 1,05 lần với giá trị 250 ppm khí C₂H₅OH và 1,13 lần với 250 ppm khí CO. Điều này cho thấy thiết bị cảm biến có độ chọn lọc cao nhất đối với khí H₂.

4. Kết luận

Thiết bị cảm biến nhạy khí H₂ dựa trên màng mỏng SnO₂/Pd đã được chế tạo thành công tại phòng thí nghiệm bằng cách sử dụng kỹ thuật vi điện tử. Trên cơ sở đó chúng tôi đã chế tạo và xây dựng được đường chuẩn của thiết bị đo khí H₂ cầm tay trên cơ sở cảm biến SnO₂/Pd chế tạo được. Kết quả cho thấy thiết bị cảm biến hoạt động ổn định, độ nhạy đạt xấp xỉ 8,67 lần ở nồng độ khí H₂ là 1000 ppm. Cảm biến có công suất tiêu thụ nhỏ và đạt giá trị tốt nhất tại 180 mW. Các điều kiện thay đổi như nồng độ khí, công suất tiêu thụ của cảm biến cũng được khảo sát. Thiết bị đo khí chế tạo được có thể phát hiện khí H₂ ở nồng độ thấp đến cỡ 25 ppm với độ đáp ứng cao. Các cảm biến có độ chọn lọc tốt khi khảo sát với một số loại khí khác như H₂, CO, và C₂H₅OH. Qua kết quả nghiên cứu cho thấy thiết bị đo cảm biến khí H₂ trên cơ sở màng mỏng SnO₂/Pd hoàn toàn có khả năng ứng dụng vào việc quan trắc môi trường cũng như phòng chống cháy nổ của khí H₂ trong thực tế cuộc sống.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa Hà Nội trong đề tài mã số T2018-PC-073.

Tài liệu tham khảo

- [1] L. Schlapbach, Technology: Hydrogen-fuelled vehicles., Nature, vol. 460, no. 7257, pp. 809–811, Aug. 2009, <http://doi.org/10.1038/460809a>
- [2] H. Afgan and M. G. Carvalho, Sustainability assessment of a hybrid energy system, Energy Policy, vol. 36, no. 8, pp. 2893–2900, 2008.
- [3] K. Hacatoglu, I. Dincer, and M. a. Rosen, Sustainability assessment of a hybrid energy system with hydrogen-based storage, Int. J. Hydrogen Energy, vol. 40, no. 3, pp. 1559–1568, 2015, <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.079>.
- [4] Hübert, L. Boon-Brett, G. Black, and U. Banach, Hydrogen sensors – A review, Sensors Actuators B Chem., vol. 157, no. 2, pp. 329–352, Oct. 2011, <http://doi.org/10.1016/j.snb.2011.04.070>.
- [5] N. Yamazoe, New approaches for improving semiconductor gas sensors, Sensors Actuators B Chem., vol. 5, no. 1–4, pp. 7–19, Aug. 1991, [http://doi.org/10.1016/0925-4005\(91\)80213-4](http://doi.org/10.1016/0925-4005(91)80213-4).
- [6] T. Seiyama, K. Fujiishi, M. Nagatani, and A. Kato, A New Detector for Gaseous Components Using Zinc Oxide Thin Films, J. Soc. Chem. Ind. Japan, vol. 66, no. 5, pp. 652–655, 1963.
- [7] S. Korea, Low-power micro gas sensor, vol. 33, pp. 147–150, 1996, [http://doi.org/10.1016/0925-4005\(96\)01822-9](http://doi.org/10.1016/0925-4005(96)01822-9).

- [8] A. Z. Adamyan, Z. N. Adamyan, and V. M. Aroutiounian, Study of sensitivity and response kinetics changes for SnO₂ thin-film hydrogen sensors, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 19, pp. 8438–8443, Oct. 2009, <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.001>.
- [9] H. S. Al-Salman and M. J. Abdullah, Hydrogen gas sensing based on ZnO nanostructure prepared by RF-sputtering on quartz and PET substrates, *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 181, pp. 259–266, May. 2013, <http://doi.org/10.1016/j.snb.2013.01.065>.
- [10] R. Godbole, V. Godbole, and S. Bhagwat, Palladium enriched tungsten oxide thin films: an efficient gas sensor for hazardous gases, *Eur. Phys. J. B*, vol. 92, no. 4, Apr. 2019, <http://doi.org/10.1140/epjb/e2019-90622-0>.
- [11] M. Shahabuddin, A. Umar, M. Tomar, and V. Gupta, Custom designed metal anchored SnO₂ sensor for H₂ detection, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 7, pp. 4597–4609, 2017, <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.054>.
- [12] F. Xie, W. Li, Q. Zhang, and S. Zhang, Highly Sensitive and Selective CO/NO/H₂/NO₂ Gas Sensors Using Noble Metal (Pt, Pd) Decorated MOx (M = Sn, W) Combined with SiO₂ Membrane, *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 22, pp. 10674–10679, 2019, <http://doi.org/10.1109/jksen.2019.2929504>.
- [13] N. V. Toan, N. V. Chien, N. V. Duy, H. S. Hong, H. Nguyen, N. D. Hoa, and N. V. Hieu, Fabrication of highly sensitive and selective H₂ gas sensor based on SnO₂ thin film sensitized with micro-sized Pd islands, *J. Hazard. Mater.*, vol. 301, pp. 433–442, 2016, <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.09.013>.
- [14] E. German, C. Pistonesi, and V. Verdinelli, A DFT study of H₂ adsorption on Pd_n/SnO₂ (110) surfaces (n = 1–10), *Eur. Phys. J. B*, vol. 92, no. 5, 2019, <http://doi.org/10.1140/epjb/e2019-90659-y>.
- [15] N. X. Thai, N. V. Duy, N. V. Toan, C. M. Hung, N. V. Hieu, and N. D. Hoa, Effective monitoring and classification of hydrogen and ammonia gases with a bilayer Pt/SnO₂ thin film sensor, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 3, pp. 2418–2428, 2020, <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.072>.
- [16] F. G. Sensor, Flammable Gas Sensor MQ-8, Zhengzhou Winsen Electronics Technology CO., LTD, p. 7, 2014.
- [17] B. Environment, Mq-8 Gas Sensor, Hanwei Eletronics Co.,Ltd, 2014.
- [18] Idt, Trace Hydrogen (H₂) Sensor SGAS701 Datasheet, pp. 1–16, 2017.