

# Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 수소 가스 감지 특성

論 文

49C-7-3

## Hydrogen-Sensing Behaviors of Pd- and Pt-SiC Schottky Diodes

金昌教\* · 李周憲\*\* · 趙南仁\*\*\* · 洪秦守§

(Chang-Kyo Kim · Joo-Hun Lee · Nam-Ihn Cho · Chin-Soo Hong)

**Abstract** - Hydrogen-sensing behaviors of Pd- and Pt-SiC Schottky diodes, fabricated on the same SiC substrate, have been systematically compared and analyzed as a function of hydrogen concentration and temperature by I-V and  $\Delta I-t$  methods under steady-state and transient conditions. The effects of hydrogen adsorption on the device parameters such as the barrier height are investigated. The significant differences in their hydrogen sensing characteristics have been examined in terms of sensitivity limit, linearity of response, response rate, and response time. For the investigated temperature range, Pd-SiC Schottky diode shows better performance for H<sub>2</sub> detection than Pt-SiC Schottky diode under the same testing conditions. The physical and chemical mechanisms responsible for hydrogen detection are discussed. Analysis of the steady-state reaction kinetics using I-V method confirmed that the atomistic hydrogen process is responsible for the barrier height change in the diodes.

**Key Words** : Gas Sensor, Schottky Diode, Pd, Pt, Hydrogen, Catalyst, Adsorption, Desorption

### 1. 서 론

실리콘 및 갈륨 비소 같은 반도체를 능동 소자로 이용하는 가스 센서는 다이오드, MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor), MOS (metal oxide semiconductor) 캐패시터 같은 구조로 되어 있으며, 200°C 이하의 온도에서 안정적으로 동작할 수 있는 것으로 보고되고 있다[1-6]. 그러나 이러한 가스 센서는 동작온도의 제한 때문에 실리콘 기판 대신에 고온에서 안정적으로 동작할 수 있는 실리콘 카바이드 (SiC) 또는 다이아몬드 기판으로 대체하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다[7-11]. 본 연구에서 채택된 SiC를 이용한 디바이스는 광대역폭을 갖고 있기 때문에 고온에서 안정적으로 동작하고, 기계적 강도가 매우 크고, 화학적으로 안정한 것으로 알려져 있다[12].

쇼트키 다이오드의 수소 가스 감지는 일반적으로 금속-반도체 계면에서의 수소 쌍극자(dipole)의 흡착에 의한 촉매 금속의 일함수 변화에 기인하지만 특수한 경우에는 금속-반도체 계면 영역에서 계면 상태 밀도(interface-state density)의 변화도 영향을 미친다[6]. 이러한 현상이 촉매 금속-반도체 계면에서의 장벽 높이,  $\phi_b$ 를 수정하는 것으로 나타난

다. 쇼트키 다이오드의 전류는 장벽 높이에 지수 함수적으로 변화하기 때문에, 특정한 인가 전압에서 수소 흡착에 의하여 유기되는 장벽 높이의 변화는 다이오드의 전류의 변화를 크게 일으킨다. 이것이 쇼트키 다이오드를 이용하여 수소 가스를 감지하는 방법이다.

SiC 반도체에 촉매 금속을 사용하는 쇼트키 다이오드의 수소 가스 감지 특성은 촉매 금속의 종류, 촉매 금속의 두께, 및 SiC 반도체 표면 상태(surface state)의 성질에 많이 의존한다[7,8]. 본 연구에서는 촉매 금속에 의한 수소 가스 감지 특성을 조사하고 비교하기 위하여 같은 두께를 갖는 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드를 제작하였고 수소 농도와 온도 변화에 따른 수소 감지 특성의 차이를 조사하였다. 디바이스의 촉매 금속-반도체 계면에서 일어나는 수소 가스 흡착 속도론(kinetics)을 이용하여 I-V 특성을 설명하기 위하여 해석적 관계를 도입하였다. 이러한 해석적 관계는 수소 농도와 온도의 함수로서 I-V 특성의 변화를 분석함으로써 증명하였다. 수소 감지를 나타내는 물리 및 화학적 기구(physical and chemical mechanisms)를 분석하였다.

### 2. 실험 방법

n형 6H-SiC 웨이퍼를 이용하여 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드를 제작하였다. SiC 웨이퍼를 TCE (trichloroethylene) 용액, 아세톤과 메틸 알코홀에서 순차적으로 세척한 후에 탈이온수를 이용하여 초음파 세척 (rinse)하였다. 음성 접촉 (ohmic contact)을 위하여 SiC 웨이퍼의 뒷면에 Ti 막을 d.c. 스퍼터를 이용하여 증착한 후에 Ar 분위기에서

\* 正 會 員 : 順天鄉大 情報技術工學部 副教授 · 工博

\*\* 準 會 員 : 順天鄉大 情報技術工學部 碩士

\*\*\* 正 會 員 : 鮮文大 電子工學科 教授 · 工博

\*\*\*\* 正 會 員 : 順天鄉大 情報物理學科 助教授 · 理博

接受日字 : 2000年 3月 16日

最終完了 : 2000年 6月 16日

30 분 동안 450°C에서 열처리하였다. 다음에 Ti막의 산화를 방지하기 위하여 Ti 막위에 1000 Å 두께의 Au를 증착하였다. 촉매 금속으로서 800 Å 두께의 Pd 및 Pt를 SiC의 전면에 스퍼터를 이용하여 증착하였다. Pd 및 Pt 전극은 반지름이 1mm인 원형 모양이고 두께는 800 Å이었다. 그림 1은 쇼트키 다이오드의 제작 공정을 보여주고 있다.

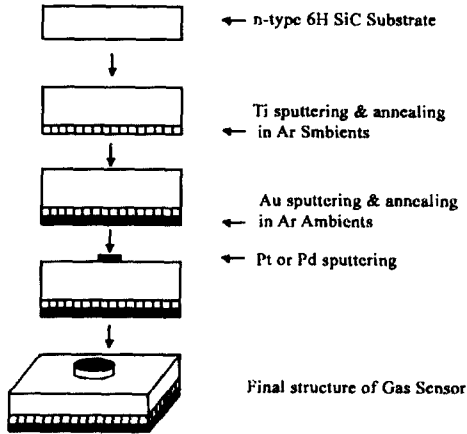


그림 1 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 제작 공정도

Fig. 1 Flow diagram for fabrication process of Pd- and Pt-SiC Schottky diodes

측정 가스는 주사기를 이용한 단속 주입 법으로 측정 상자 내에 H<sub>2</sub> 가스를 주입하였으며, 가스가 측정 상자 내부에서 균일하게 분산되도록 소형 선풍기를 부착하였다. 또한 히터 양단에도 d.c. 전압을 인가하여 자동온도 조절기로 센서 표면에 위치시킨 k형 열전대와 연결하여 센서의 온도가 정확하게 조절되도록 하였다. 공기중에서 I-V 곡선을 얻은 후에 수소 가스를 주입하였다. 수소 가스의 흡착 동안에 시간에 대한 전류 변화와 포화 후에 I-V 곡선을 얻었다.

### 3. 결과 및 고찰

쇼트키 다이오드의 열이온 방출 전도 기구 (thermionic emission conduction mechanism)에 따라서  $V > 3kT/q$ 일 때의 순방향 바이어스에 대한 I-V 관계식은 다음과 같다 [13].

$$I = I_0 \exp(qV/nkT) \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 볼츠만 상수(Boltzmann constant),  $T$ 는 절대온도,  $n$ 은 이상계수(ideality factor)이며,  $I_0$ 는 포화전류이고 다음 식으로 나타낸다.

$$I_0 = A A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{\phi_b}{\phi_T}\right) \quad (2)$$

여기서  $A^{**}$ 는 유효 리차드슨 상수,  $A$ 는 집합면적,  $\phi_b$ 는 장벽 높이, 및  $\phi_T = kT/q$ 를 나타낸다. 그림 2와 그림 3은 500

°에서 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 공기 분위기와 800 ppm H<sub>2</sub> 분위기에서의 전압 변화에 따른  $\ln(I)$  변화 특성이 선형임을 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 측정 전압 범위에서 식(1)을 만족하고 있다는 것을 나타낸다. 즉, Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 전류 전도 기구 (current conduction mechanism)가 측정 전압 범위에서 열이온 방출 이론에 따른다는 것을 의미한다.

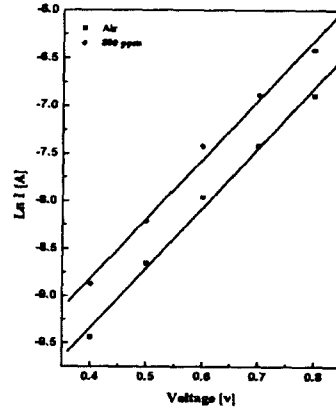


그림 2 500°C에서 Pd-SiC 쇼트키 다이오드의 공기과 800 ppm 수소 분위기에서의 I-V 특성

Fig. 2 I-V characteristics of Pd-SiC Schottky diode in air and 800 ppm hydrogen environments at 500°C

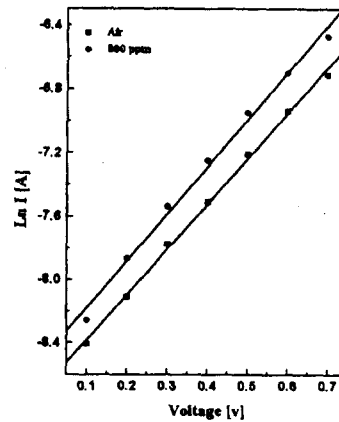


그림 3 500°C에서 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 공기과 800 ppm 수소 분위기에서의 I-V 특성

Fig. 3 I-V characteristics of Pd-SiC Schottky diode in air and 800 ppm hydrogen environments at 500°C

$I_0$ 는 전압이 0 V일 때  $\ln(I)$ 값으로부터 구할 수 있으며 장벽 높이,  $\phi_b$ 는 식(2)로부터 계산할 수 있다. 500°C의 공기 분위기에서  $I_0$ 와  $\phi_b$ 는 0.007 mA와 0.5534 eV이었으며, 800 ppm H<sub>2</sub> 분위기에서의  $I_0$ 는 0.01215 mA로 변화하였고  $\phi_b$ 는 0.0142 eV 만큼 감소하였다. Pt-SiC 쇼트키 장벽 다이오드의 포화 전류와 장벽 높이는 공기 분위기에 0.17 mA,

0.4708 eV이며, 800ppm 의 수소 가스 주입 후 포화 전류는 0.17 mA에서 0.21mA로 변화했으며 장벽의 높이는 0.0055 eV 감소하였다. 즉, H<sub>2</sub>가스 분위기에서  $\phi_b$ 가 감소하고 이로 인하여 전도 전류가 증가하였다는 것을 보여주고 있다.

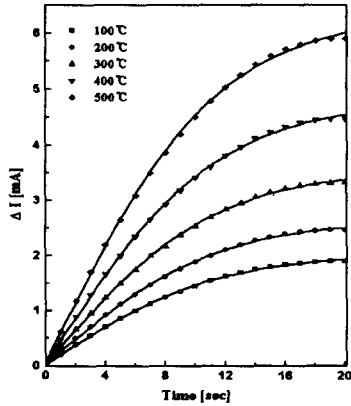


그림 4 800ppm 수소 가스 분위기에서 Pd-SiC 쇼트키 다이오드의 온도 변화에 따른 과도 상태 응답  
 Fig. 4 Adsorption transient behavior of Pd-SiC Schottky diode upon exposure to 800 ppm hydrogen in air at various temperatures

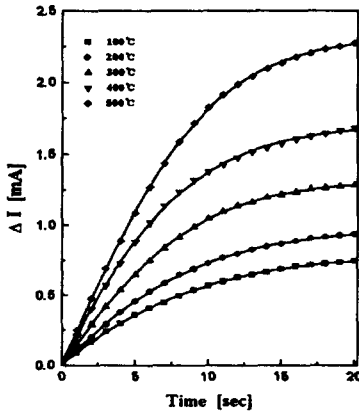


그림 5 800ppm 수소 가스 분위기에서 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 온도 변화에 따른 과도 상태 응답  
 Fig. 5 Adsorption transient behavior of Pt-SiC Schottky diode upon exposure to 800 ppm hydrogen in air at various temperatures

그림 4 및 그림 5는 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드에 2 V의 순방향 바이어스를 인가한 후에 800 ppm의 수소 가스를 test box에 주입하였을 경우에 다이오드 전류의 변화 ( $\Delta I$ )가 변하는 과도 상태 응답을 보여준다. 본 연구에서는  $\Delta I$ 는 가스 감도 (sensitivity)를 나타낸다. 이 실험은 여러 온도에서 디바이스의 반응 특성을 비교하기 위한 것이다. 일반적으로 그림 4 및 그림 5는 수소 농도가 낮을 때 수소 가스 흡착에 따라서  $\Delta I$ 가 급하게 증가하다가 수소 농도가 증가함에 따라서

점점 포화되는 현상을 보여주고 있다. 또한 분위기 온도가 증가함에 따라서  $\Delta I$ 가 증가하는 것을 보여 주고 있다. 그리고 동작 온도가 증가함에 따라서 전류 변화의 초기 변화율  $[\Delta(\Delta I)/\Delta t]_{initial}$ 도 증가하고  $\Delta I$ 값도 커지는 것을 보여주고 있으며, 20 초 이내에 정상상태에 도달하는 것을 보여주고 있다. 이러한 반응 속도는 세라믹형 가스 센서에 비하여 반응 속도가 매우 빠르다는 것을 보여주고 있다. 이러한 현상은 고체 표면상에서의 반응 속도의 충돌이론에 의하여 설명되어질 수 있다 [14]. 즉, 반응 분자의 농도가 더 높아지거나 반응 온도가 높아질수록 반응 분자는 흡착점(adsorption site) 과 더 많이 충돌하게되고 결과적으로 더 많이 흡착되기 때문이다. 그림 6은 500°C에서 3V 순방향 바이어스가 인가되었을 때 수소 농도 변화에 따른 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드 전류 변화,  $\Delta I$ 를 보여 주고 있다. 그림 6은 수소 농도가 낮을 때  $\Delta I$ 가 급격하게 증가하다가 수소 농도가 점점 증가함에 따라서  $\Delta I$ 가 포화되고 있음을 보여주고 있다. 그리고 그림 6에서는 Pd- 및 Pt-SiC 다이오드의 가스 감도와 포화되는 한계가 다르다는 것을 보여주고 있다. 즉, 같은 온도 조건에서 Pd-SiC 쇼트키 다이오드의 수소 가스 감도가 Pt-SiC 쇼트키 다이오드보다 더 높다는 것을 보여주고 있다. 이러한 것은 Pd와 Pt의 촉매 성질이 다르기 때문이다. 예를 들면 같은 온도와 가스 농도에서 Pt의 수소 용해율 (solubility)이 Pd의 수소 용해율보다 훨씬 적지만 Pt와 Pd에서의 확산 계수는 거의 같기 때문이다 [14]. 그림 7은 500°C에서 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드에 3 V의 순방향 바이어스가 인가되었을 때 수소 농도의 변화에 따라서  $\Delta I$ 의 변화를 나타내는 과도 상태 응답을 보여주고 있다. 그림 7에서 수소 농도가 증가함에 따라서  $[\Delta(\Delta I)/\Delta t]_{initial}$ 이 증가하고 있고 수소 농도가 증가함에 따라서 디바이스의  $\Delta I$ 가 증가하는 것을 보여주고 있다.

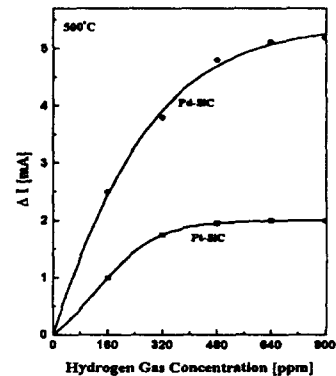


그림 6 500°C에서 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 수소 농도 변화에 따른 전류의 변화  
 Fig. 6. Change in current  $\Delta I$  with hydrogen concentration for Pd- and Pt-SiC Schottky diodes at 500°C

또한 Pd-SiC 쇼트키 다이오드의 수소 가스 감도가 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 가스 감도보다 높다는 것을 보여주고 있다. 그리고 그림 6과 그림 7에서 보여준 결과는 다른 연구자들의 결과와도 일치하고 있다 [15].

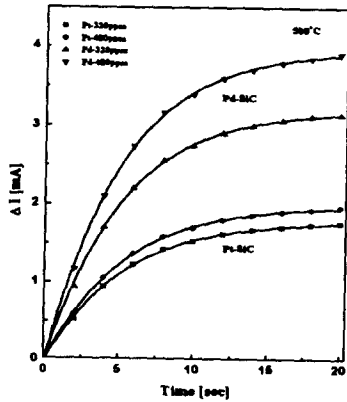


그림 7 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 수소 농도 변화에 따른 500°C에서의 과도 상태 응답  
 Fig. 7 Adsorption transient behavior of Pd- and Pt-SiC Schottky diodes upon exposure to various hydrogen concentration at 500°C

그림 8은 500°C, 3 V 순방향 바이어스 전압에서 1000 ppm 수소 가스에 대한 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 반복성을 보여 주고 있다. 디바이스의 수소 흡착 반응은 20 초 정도이고 다시 공기 중에 노출되었을 때 약 72 초 정도에 수소가 탈착되어서 정상으로 복귀하였다.

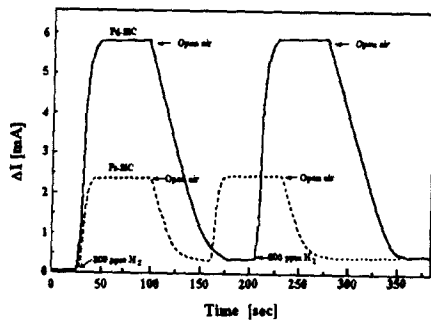


그림 8 1000ppm 수소 감지시 500°C에서 Pd - 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 시간 변화에 따른 전류 변화의 반복성  
 Fig. 8 Repeatability of the change in current vs. time response of Pd- and Pt-SiC Schottky diode at 500°C for detection of 1000 ppm hydrogen

SnO<sub>2</sub> 박막 센서의 수소 가스 흡착 및 탈착 반응 시간이 수분으로 나타나는 것에 비하여 매우 빠른 응답 특성을 보여주는 것이다[16]. 그리고 가스의 흡착 및 탈착에 대한 응답이 반복적이라는 것을 보여 주고 있다. 이것은 디바이스가 가스 감지시 촉매 과정이 포함되어 있다는 것을 나타낸다. 이러한 결과로부터 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드가 수소 가스 센서로서 동작할 수 있다는 것을 나타내고 있다.

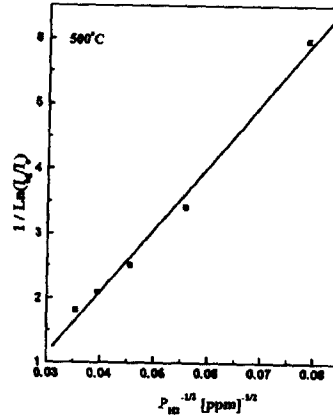


그림 9 Pd-SiC 쇼트키 다이오드의 수소 감지 모델: 1/Ln(I<sub>0</sub> / I<sub>0</sub>) 대 (1/P<sub>H<sub>2</sub></sub>)<sup>1/2</sup>  
 Fig. 9 Hydrogen detection model in Pd-SiC Schottky diodes: Plots of 1/Ln(I<sub>0</sub> / I<sub>0</sub>) vs. (1/P<sub>H<sub>2</sub></sub>)<sup>1/2</sup>

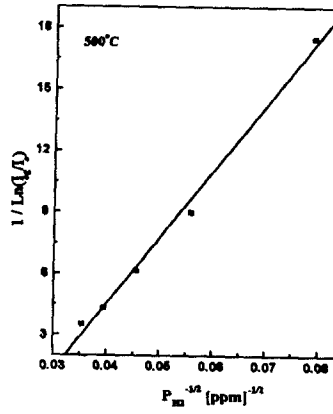


그림 10 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 수소 감지 모델: 1/Ln(I<sub>0</sub> / I<sub>0</sub>) 대 (1/P<sub>H<sub>2</sub></sub>)<sup>1/2</sup>  
 Fig. 10 Hydrogen detection model in Pt-SiC Schottky diodes: Plots of 1/Ln(I<sub>0</sub> / I<sub>0</sub>) vs. (1/P<sub>H<sub>2</sub></sub>)<sup>1/2</sup>

Pd-SiC 쇼트키 다이오드와 수소 가스와의 반응에 의한 I-V 특성의 변화를 수소 반응 속도론에 의하여 다음과 같이 설명할 수 있다. H<sub>2</sub> 가스가 Pd 또는 Pt 표면 위에 수소 분자로 흡착된 후 수소 원자로 분해되어서 (Pd, Pt)-SiC 계면으로 확산하여서 수소 원자는 쌍극자 이중층을 형성하게 된다. 정상 상태 (steady state)에서 (Pd, Pt)-SiC 계면에서의 수소 원자의 분율(coverage fraction)  $\theta$ 는 다음과 같다.

$$\frac{\theta}{1-\theta} = k_o (P_{H_2})^{1/2} \quad (3)$$

여기서  $k_o$ 는 속도 상수를 나타내고  $P_{H_2}$ 는 수소 가스 농도를 나타낸다. (Pd, Pt)-SiC 계면에서 수소 흡착에 의하여 유기된 수소 쌍극자층의 전압 변화  $\Delta V$ 가 계면에서의 수소

쌍극자 분율에 비례하기 때문에 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta V = \Delta V_{\max} \theta \tag{4}$$

식 (3)과 식(4)를 이용하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{\Delta V} - \frac{1}{\Delta V_{\max}} = \frac{1}{\Delta V_{\max}} \frac{1}{k_o} \left( \frac{1}{P_{H_2}} \right)^{1/2} \tag{5}$$

여기서  $\Delta V_{\max}$  는 주어진 온도에서 최대 전압 변화를 나타낸다. 식(2)와 식(5)를 이용하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{\ln(I_{og}/I_o)} = \frac{1}{\ln(I_{og\max}/I_o)} + \frac{1}{\ln(I_{og\max}/I_o)} \frac{1}{k_o} \left( \frac{1}{P_{H_2}} \right)^{1/2} \tag{6}$$

식 (6)으로부터  $1/\ln(I_{og}/I_o)$  대  $(1/P_{H_2})^{1/2}$ 의 그래프가 y축 절편이  $1/\ln(I_{og\max}/I_o)$ 이고 기울기가  $1/(\ln I_{og\max})$ 인 직선인 것을 알 수 있다. 그림 9와 그림 10으로부터  $(1/P_{H_2})^{1/2}$  대  $1/\ln(I_{og}/I_o)$ 에 대한 그래프가 실제로 선형임을 보여주고 있다. 그러므로 실험 결과가 측정 전압 범위에서 쇼트키 다이오드의 열이온 방출 전도 이론과 수소 가스의 반응 속도론에 의하여 유도된 이론을 만족한다는 것을 증명하였다.

#### 4. 결 론

H<sub>2</sub> 가스 감지를 위한 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드를 제작하여 고온에서 디바이스와 수소 가스와의 반응을 분석하였다. Pd-SiC 쇼트키 다이오드가 Pt-SiC 쇼트키 다이오드 보다 더 높은 감도를 나타내었다. Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 과도 상태 응답으로부터 Pd-SiC 쇼트키 다이오드가 Pt-SiC 쇼트키 다이오드보다 수소 가스에 더 빠르게 반응하는 것을 보여 주었다. 그러므로 Pd-SiC 쇼트키 다이오드는 Pt-SiC 쇼트키 다이오드보다 일반적으로 전류변화의 초기 변화율이 더 높고 포화되기까지의 흡착 시간이 더 작은 것으로 나타났다. 수소 장벽의 높이는  $\ln(I) - V$  관계로부터 구하였으며, 측정 전압 범위에서 전류 전도 기구가 열 이온 방출 이론에 의한다는 것을 확인하였다. 수소 흡착에 따른 쇼트키 다이오드의 장벽 높이는 온도가 높아질수록 증가하였다. 이는 Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드를 이용한 수소 센서의 감도가 온도가 높아질수록 증가한다는 것을 의미한다. 디바이스의 초기 수소 흡착율이 수소 농도가 증가하고 온도가 높아질수록 증가하였다. Pd- 및 Pt-SiC 쇼트키 다이오드의 I-V 및 I-t 분석을 통하여 수소 반응 속도론을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

[1] I. Lundstrom, S. Shivaraman, C. Svensson and L. Lundkvist, "Hydrogen sensitive MOS field effect transistor", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 26, pp. 55-57, 1975.  
 [2] G. G. Maclay, "MOS hydrogen sensors with ultrathin

layers of Pd," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-32, pp. 1158-1164, 1985.  
 [3] W. P. Kang and C. K. Kim, "Performance analysis of a new metal-insulator-semiconductor capacitor incorporated with Pt-SnO<sub>x</sub> catalytic layers for the detection of O<sub>2</sub> and CO gases", *J. Appl. Phys.* Vol. 75, pp. 4237-4242, 1994.  
 [4] Chang Kyo Kim, Weng Poo Kang, Young Ho Kim and Nam Ihn Cho, "Electric field-induced adsorption/desorption of oxygen on a Pd-SnO<sub>x</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si-Al capacitor", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 37, pp. L255-L257, 1998.  
 [5] 김창교, 이주현, 이영환, 안달, 유광수, "Pt-WO<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si-Al 캐패시터를 이용한 NO<sub>2</sub> 가스 센서," *한국전기전자재료학회논문지*, Vol. 13, No. 4, pp. 333-339, 1999.  
 [6] I. Lundstrom, "Hydrogen-sensitive MOS structure, part 1: principles and applications," *Sensors and Actuators*, Vol. 1, pp. 403-426, 1981.  
 [7] A. Arbab, A. Spetz and I. Lundstrom, Gas sensors for high temperature based on metal-oxide-silicon carbide (MOSiC) devices, *Sensors and Actuators B*, Vol. 15-16, pp. 19-23, 1993.  
 [8] I. Lundstrom, T. Ederth, H. Karis, H. Sundgren, A. Spetz and F. Winquist, "Recent developments in field-effect gas sensors," *Sensors and Actuators B*, Vol. 23, pp. 127-133, 1995.  
 [9] W. P. Kang, Y. Gurbuz, J. L. Davidson and D. V. Kerns, A new hydrogen sensor using a polycrystalline diamond-based Schottky diode, *J. Electrochem. Soc.* Vol. 141, pp. 2231-2234, 1994.  
 [10] Y. Gubuz, W. P. Kang, J. L. Davidson, and D. V. Kerns, "A novel oxygen gas sensor utilizing thin film diamond diode with catalyzed metal-oxide electrode", *Sensors and Actuators B*, Vol. 35-36, pp. 303-307, 1996.  
 [11] Y. Gubuz, W. P. Kang, J. L. Davidson, and D. V. Kerns, "A polycrystalline diamond thin-film based hydrogen sensor," *Sensors and Actuators B*, Vol. 24-25, pp. 421-425, 1995.  
 [12] J. B. Casaday and R. W. Johnson, "Status of silicon carbide (SiC) as a wide-band gap semiconductor for high-temperature applications: a review," *Solid State Electronics*, Vol. 39, No. 10, pp. 1409-1422, 1996.  
 [13] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor*, 2nd ed. John Wiley, New York, 1981.  
 [14] O. F. Devereux, *Topics in Metallurgical Thermodynamics*, Chapter 7, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1989.  
 [15] L. M. Lechuga, A. Calle, D. Golmayo and F. Briones, "Different catalytic metals (Pt, Pd and Ir) for GaAs Schottky barrier sensors," *Sensors and Actuators B*, Vol. 7, pp. 614-618, 1992.

[16] A. Grisel and V. Demarne, in: Tetsuro Seiyama (Ed.), Chemical Sensor Technology, Vol. 2, pp. 43-57, Elsevier Science, Amsterdam, 1989.

저 자 소 개



김 창 교 (金昌敎)

1958년 10월 17일생. 1981년 연세대 전기 공학과 졸업(학사). 1983년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1992년 Vanderbilt University 전기공학과 졸업(공학박) 현재 순 천향대 정보기술공학부 부교수

Tel : 0418-530-1339, Fax : 0418-530-1333  
E-mail : ckkim1@sch.ac.kr



조 남 인 (趙南仁)

1950년 7월 14일생. 1974년 서강대 전자공 학과 졸업(학사). 1988년 텍사스대 전자공 학과 졸업(석사). 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 현재 선문대 전자공학과 교수

Tel : 0418-30-2351, Fax : 0418-41-7426  
E-mail : nicho@omega.sunmoon.ac.kr



이 주 현 (李周憲)

1970년 7월 13일생. 1997년 순천향대 전기 공학과 졸업(학사). 1999년 동 대학원 전 기공학과 졸업(석사). 현재 한국과학재단 인턴 연구원으로 재직

Tel : 0418-532-6469, Fax : 0418-530-1333



홍 진 수 (洪秦守)

1957년 4월 24일생 1980년 연세대 물리학 과 졸업(학사). 1982년 동 대학원 물리학 과 졸업(석사). 1993년 텍사스대 물리학과 졸업(이박). 현재 순천향대 정보물리학과 조교수

Tel : 0418-530-1237, Fax : 0418-530-1229