

Pd 및 Pd-Rh 게이트 MOS센서의 수소 및 황화수소가스에 대한 검지특성

이창희, 박종욱

한국과학기술원 재료공학과

The H₂ and H₂S sensing characteristics of Pd and Pd-Rh gate MOS sensor

Chang-Hee Lee, Chong-Ook Park

Dept. of Materials Science and Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology

초 록

Pd, Pd-Rh 게이트 MOS센서의 H₂, H₂S 검지특성과 Pd박막의 증착조건이 검지특성에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. rf power의 증가와 증착온도의 증가는 모두 센서의 감도와 초기반응속도를 감소시켰으며 rf power의 변화보다는 증착온도의 변화에 의한 효과가 현저하였다. Pd-Rh 센서의 경우 순수한 Pd 센서에 비해 감도가 낮았으며 Rh의 양이 증가할수록 감도는 감소하였다. Pd-Rh 센서에서 H₂가 H₂S보다 더 뛰어난 감도를 보여주었다. rf power, 증착온도, 기판의 변화가 MOS센서의 감도나 초기반응속도 등의 센서특성에 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다.

Abstract

The H₂ and H₂S sensing characteristics of Pd and Pd-Rh gate MOS sensor and the effect of Pd deposition condition on the hydrogen sensing performance of Pd gate MOS sensor was

investigated. The increase of rf power and deposition temperature led to the decrease in the sensitivity and the initial response rate. The deposition temperature gave more effects on the decrease of the sensitivity and the initial response rate than the rf power. The sensitivity of Pd-Rh sensor gave better performance than pure Pd sensor. As the concentration of Rh in the gate increased, the sensitivity decreased. For Pd-Rh sensor, the sensitivity to H_2 was higher than that to H_2S . It was demonstrated that rf power, deposition temperature had an important role in the sensor performance.

I. 서론

Pd게이트 MOS센서는 수소가스에 의한 Pd게이트의 일함수 변화를 트랜지스터의 문턱전압 변화나 capacitor의 평판대역전압 변화로 측정하는 센서이다^{1,2}. 수소가스에 대한 감도가 뛰어나 수소가스 누출감지기에 응용이 될 뿐만 아니라^{3,4}, 의학, 농업, 생물학등 다방면으로 응용분야가 넓어지고 있다^{5,6,7}. MOS센서는 Pd게이트 이외에 게이트 물질^{8~15}이나 표면형상^{16~20} 등의 게이트의 변화를 통해 여러 가지 센서특성을 얻을 수 있으며 반도체 소자이기 때문에 집적화가 용이하여 최근 전자코 시스템에 적합한 센서로서 집중적인 연구가 이루어지고 있다^{21,22}. 수소가스에 의해 일함수가 변하는 것은 수소가스가 Pd게이트에 흡착되어 촉매반응에 의해 분해되면서 수소원자가 생성되고 분해에 의해 생성된 수소원자는 매우 빠른 시간 내에 확산을 통해 계면으로 이동한 다음, 계면에 흡착이 되어 쌍극자를 형성함으로써 이루어진다고 알려져 있다². 이상의 동작원리로 볼 때 Pd박막특성은 표면에서의 수소가스 흡착, 분해정도나 계면에서의 수소원자 흡착성질을 좌우하여 수소가스 검지특성에 영향을 미칠 것으로 여겨진다. 그러나 ΔV_{max} 값이 주로 나타나는 500mV가 아닌 810mV, 360mV사이의 값을 나타내는 경우도 있으며 이를 진공증착시 아직 밝혀지지 않은 요인에 의한 Pd

박막성질의 차이에 기인한 것으로 설명한 연구결과가 있을 뿐 Pd 박막특성이 센서특성에 미치는 영향에 대한 체계적인 접근은 없었다²³.

게이트 물질로 Pd등의 한가지 재료를 사용한 MOS 센서의 경우 안정성이나 선택성의 측면에서 한계까지 왔고, 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 여러 가지 물질을 사용한 게이트를 제조하여, 실험하는 경우가 보고되고 있다^{13,26}. 기본적인 물질로 Pd을 사용하며, 여기에 다른 촉매금속들을 소량 첨가한 게이트막들이 가장 일반적으로 연구되고 있는 분야이다. 그러나 아직까지 센서특성이나 검지 메커니즘에 대해서는 거의 밝혀진 바가 없는 실정이다.

본 연구는 rf power, 증착온도, 기판 등의 Pd 증착조건을 달리 하여 제작된 MOS센서의 수소가스 검지특성을 비교하고 서로 다른 증착조건에 의한 Pd 박막성질의 차이로 수소가스 검지특성의 변화를 설명하고자 하였다. 또한 Pd을 기초로 하여 Rh을 소량 첨가한 게이트 박막을 증착하여 MOS 센서를 제작하고, 이를 여러 가지 가스분위기에 노출시킬 때의 특성을 조사, 분석하였다.

II. 실험방법

MOS capacitor제작에는 비저항이 9~10 Ω cm인 p형 (100) Si wafer위에 thermal oxidation으로

1000 Å의 SiO₂를 형성시킨 wafer를 사용하였다. Pd박막은 Cerac사에서 제조한 순도 99.99%의 Pd target을 사용하여 스퍼터링으로 증착하였으며 shadow mask를 이용하여 직경 1mm의 dot를 형성하였다. 증착시 base pressure는 4.4~8.7×10⁻⁶ torr정도이며 증착압력은 Ar gas로 1×10⁻³ torr를 유지하였다. 또한 Pd-Rh 박막은 Pd target과 Rh target을 동시에 사용하여 co-sputtering 함으로써 증착하였으며, Rh의 조성은 Pd과 Rh의 power비를 조절함으로써 5~20%까지 변화시켰다. MOS Capacitor에 쓰인 Pd, Pd-Rh 박막은 비교를 위해 증착시간을 조절하여 1000 Å 정도로 두께를 일정하게 하였다. backside contact은 backside의 SiO₂를 polishing으로 제거하거나 10:1 HF로 제거한 후 Al을 evaporation하여 완성하였다.

C-V측정은 Hewlet Peckard사의 HP 4280A C-V meter를 이용하여 1MHz에서 측정하였다. 가스를 흘리면서 일함수의 변화를 관찰하기 위해서는 일정한 정전용량을 유지하면서 이에 필요한 바이어스의 변화를 읽어 내야하는데 이러한 피드백(feedback)은 프로그래밍을 통해서 C-V meter를 PC로 제어함으로써 실현하였다. 가스를 흘리면서 in-situ로 측정하기 위해서 test fixture를 만들어 furnace안에 장착하였으며 furnace내의 quartz tube에서 ±2° 정도로 일정하게 온도를 유지하면서 가스를 공급하였다. 실험에 사용한 가스는 H₂, H₂S였으며, 가스농도조절은 flowmeter로 전체가스의 flow rate가 500sccm으로 일정하게 유지되도록 하면서 공기와 1.11% H₂/N₂, 5000ppm H₂S/N₂의 flowrate를 상대적으로 조절함으로써 실현하였다. 측정은 공기중이나 1000ppm의 수소분위기에 노출시킴으로써 센서의 특성이 안정된 후에 시작하였으며, 측정장치는 Fig. 1에 나타내었다. 박막의 결정성 분석은 (111) Peak을 기준으로 XRD를 측정하여 반가폭(FWHM : Full Width Half

Maximum)을 구함으로써 행하였다. AES로 박막의 성분을 분석하였다.

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 2에 rf power 60W에서 증착한 Pd박막 MOS센서의 각 수소가스농도에서의 시간에 따른 ΔV_{FB}를 나타내었다. 주로 보고되는 센서특성과 달리 수소가스농도가 200ppm~300ppm정도까지는 아무런 반응을 나타내지 않다가 그 이상 수소

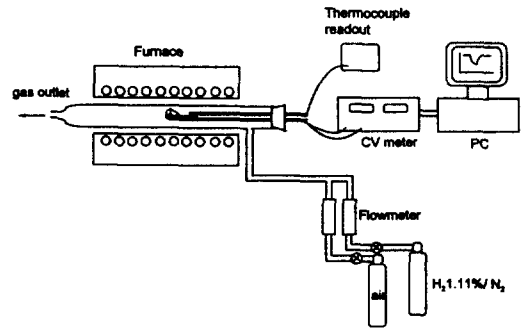


Fig. 1 Schematic diagram of measuring set-up

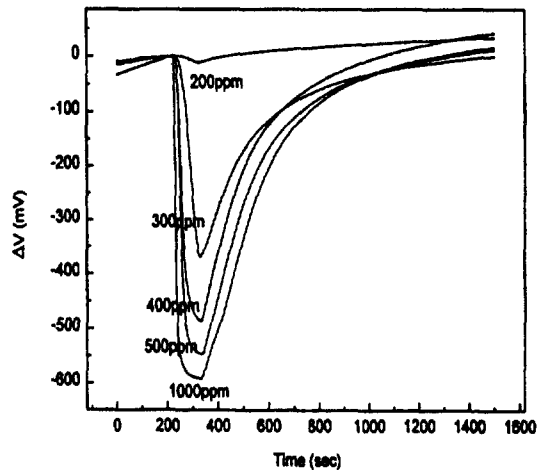


Fig. 2 The change of flat band voltage during 2 min exposure at 150°C

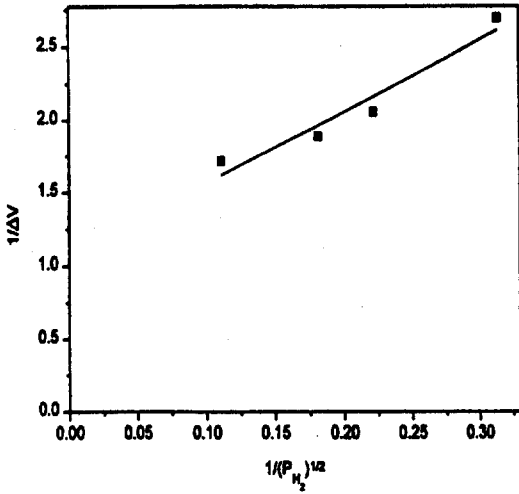


Fig. 3 $1/\Delta V$ v.s $1/\sqrt{P_{H_2}}$

농도를 증가시키면 반응이 나타났다.

Lundström에 의해 수소가스농도와 일함수 변화는 식 (1)의 관계로 표현될 수 있다는 것을 보였다²⁾.

$$\Delta V = \Delta V_{\max} \frac{\alpha \sqrt{P_{H_2}}}{1 + \alpha \sqrt{P_{H_2}}} \quad (1)$$

ΔV_{\max} 는 모든 흡착장소가 채워졌을 때의 일함수의 변화로서 단위면적당 전체 흡착장소와 관계가 있으며 α 는 각 반응의 반응상수와 관계가 있다. 식 (1)의 양변을 역수 취하여 y절편과 다음식으로부터 ΔV_{\max} 와 α 를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{\Delta V} - \frac{1}{\Delta V_{\max}} = \frac{1}{\Delta V_{\max} \alpha} \frac{1}{\sqrt{P_{H_2}(g)}} \quad (2)$$

Fig. 3에 실험결과를 $1/\Delta V$ 와 $1/\sqrt{P_{H_2}}$ 축으로 정리하여 나타내었다. ΔV_{\max} 는 930mV, α 는 $0.220 \text{ pa}^{-1/2}$ 로 Lundström에 의해 보고된 500mV

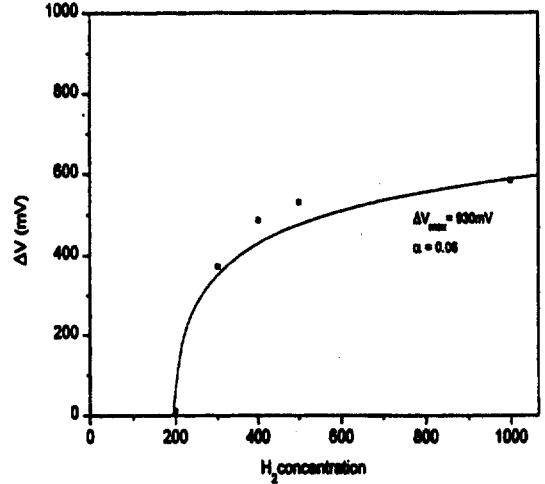


Fig. 4 The dependence of the change of flat band voltage on the hydrogen concentration at 150°C

와 $0.0872 \text{ pa}^{-1/2}$ 보다는 큰 값을 나타내었다²⁾. Lundström은 서로 다른 evaporator로 같은 실험 순서에 의해서 Pd MOS를 제작하여 측정한 결과 대개 5개중에서 4개정 도는 500mV의 ΔV_{\max} 값을 가지나 나머지 하나는 최고 810mV에서 최저 360 mV정도를 가지며 서로 다른 센서특성을 보인다고 보고하였으며 이러한 차이는 센서제작시 제어할 수 없는 요인이 존재하기 때문이며 Pd 박막구조, Pd-SiO₂ 계면에 존재하는 흡착장소의 수, 산화막 자체의 성질에 관련이 있을 것으로 추측하였다²³⁾. ΔV_{\max} 와 α 값이 차이가 나는 것은 본 실험에서는 Lundström과 달리 스퍼터링을 이용하여 60W에서 86A/min, 120W에서 167A/min의 증착 속도로 증착하였다는 사실을 고려해 볼 때 이러한 증착조건의 차이에서 기인할 수 있으며, Pd MOS는 계면의 흡착성질에 매우 민감하므로 Lundström과 같이 열산화에 의해 1000Å 정도의 SiO₂ 산화막을 형성하였지만 공정상이나 센서제작시 생기는 SiO₂ 표면의 차이에서도 기인할 수 있다고 생각된다.

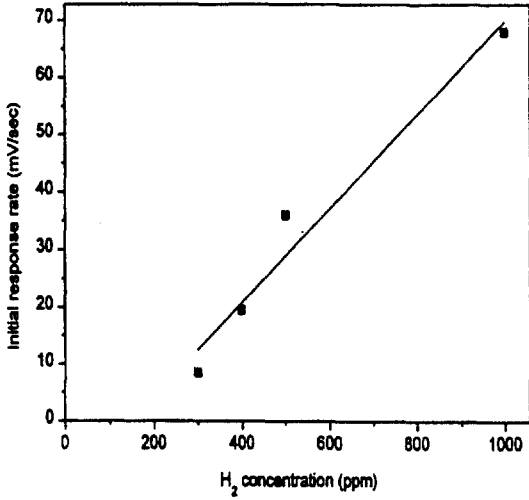


Fig. 5 The dependence of initial response rate on the hydrogen concentration at 150°C

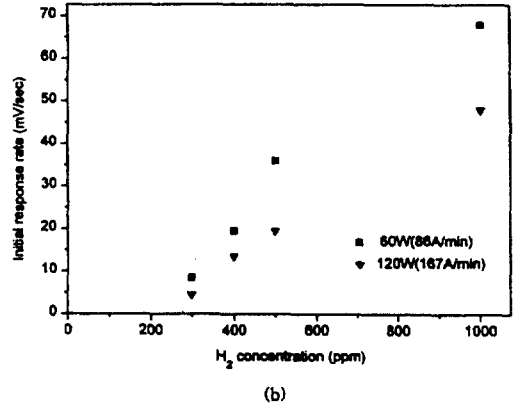
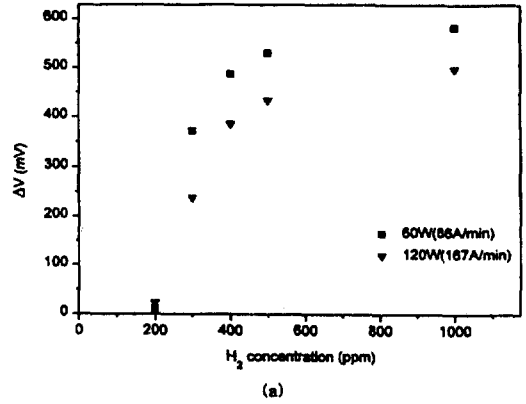


Fig. 7 The sensor performance of Pd MOS sensor using Pd gate deposited at 60W and 120W (deposited at rf power ■ : 60W, ▼ : 120W)
 (a) The flat band voltage change
 (b) The initial response rate

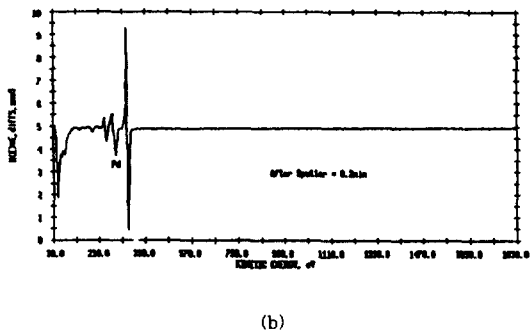
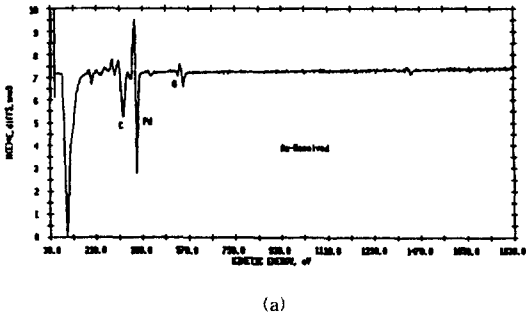


Fig. 6 AES spectra of Pd/SiO₂/Si structure
 (a) as-received (b) after 0.2 min sputtering

Fig. 4에 수소농도에 따라 평탄대역전압의 변화를 측정된 결과와 식(2)에 의해 구한 ΔV_{max} 와 α 를 식 (1)에 대입한 결과를 같이 나타내었다. 200ppm 이상의 영역에서 잘 들어맞는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5에 수소농도에 따른 초기반응속도(initial response rate)를 나타내었다. 기울기로부터 식 (3)의 관계를 이용하여 c_1 을 구할 수 있다.

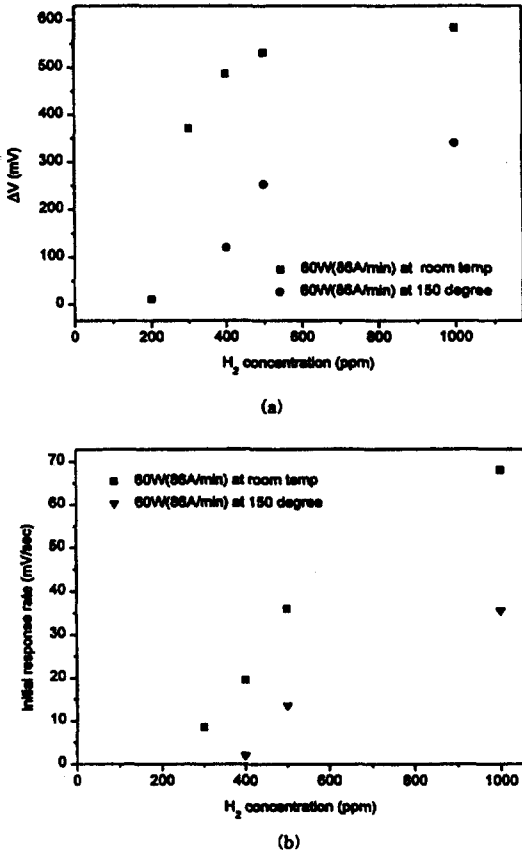


Fig. 8 The sensor performance of Pd MOS sensor using Pd gate deposited at room temp. and 150°C (deposited at ■ : room temp., ▼ : 150°C)
 (a) The flat band voltage change
 (b) The initial response rate

$$\frac{d\Delta V}{dt} = \Delta V_{\max} \frac{d\theta}{dt} = \Delta V_{\max} c_1 P_{H_2} \quad (3)$$

c₁은 수소가스가 Pd표면에 흡착, 분해되는 반응의 반응상수로서 흡착, 분해 반응의 활성화에너지와 관련이 있다. ΔV_{max}를 930mV로 하여 구한 c₁은 8.8×10⁻⁴pa⁻¹s⁻¹으로 Lundström에 의해 보고

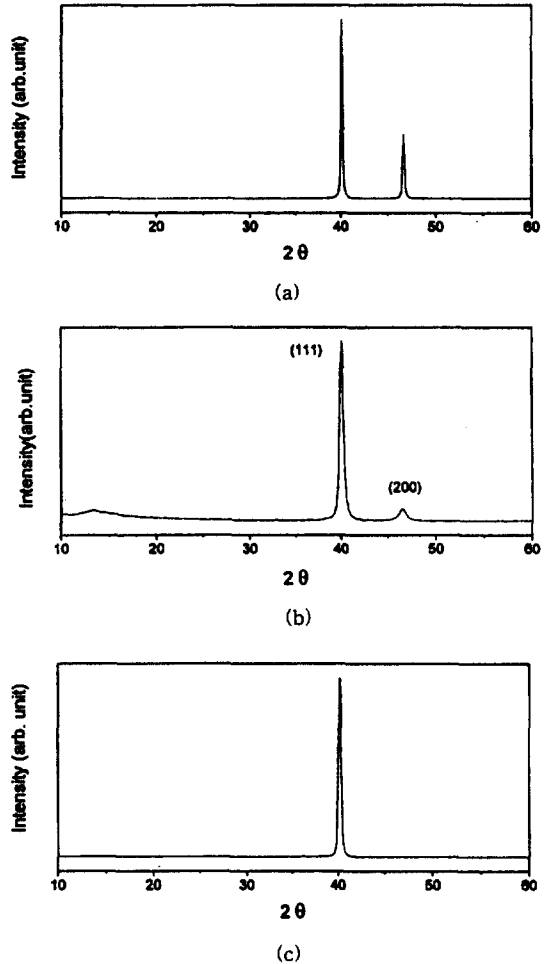


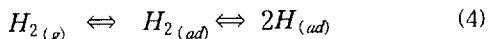
Fig. 9 XRD pattern of Pd thin film deposited at different deposition condition
 (a) deposited at 60W, room temperature
 (b) deposited at 120W, room temperature
 (c) deposited at 60W, 150°C

된 4.5×10⁻³pa⁻¹s⁻¹보다 작았다²⁾.

Fig. 6에 스퍼터링하기 전과 0.2분 스퍼터링한 후의 AES 분석결과를 나타내었다. 0.2분 스퍼터링을 한 후 C, O peak이 사라진 것으로 보아 표면이 약간의 오염이나 산화가 되어 있었던 것으로

생각된다. c_1 이 작은 값을 나타내는 것은 이러한 표면상태에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 7에 60W와 120W에서 증착한 Pd박막으로 제작된 MOS센서의 감도와 초기반응속도를 비교하여 나타내었고 Fig. 8에 상온에서 증착한 Pd 박막과 150°C에서 증착한 Pd 박막을 이용한 센서의 감도와 초기반응속도를 비교하여 나타내었다. rf power를 60W에서 120W로 증가시켰을 때 400ppm에서의 감도와 초기반응속도는 각각 486 mV에서 385mV, 19.5mV/s에서 13.5mV/s로 감소하였다. 증착온도를 상온에서 150°C로 증가시켰을 때 400ppm에서의 감도와 초기반응속도는 486mV에서 120mV, 19.5mV/s에서 2mV/s로 크게 감소하였다. Fig. 9에 60W, 상온에서 증착한 Pd박막과 rf power를 120W로 변화시켜 증착한 Pd박막, 그리고 증착온도를 150°C로 증가시켜 증착한 Pd박막의 XRD를 각각 나타내었다. rf power의 증가와 증착온도의 증가 모두 (111)방향으로 우선배향이 증가하며 결정입자의 크기가 증가하는 경향으로 나타났으나 그 정도가 증착온도를 변화한 경우가 더 현저하다는 것을 확인할 수 있다. UHV에서 Pd 단결정의 경우 (111), (200), (220) 표면 각각에 대해서 흡착에너지(heat of adsorption)가 21, 24.5, 24.4 kcal/mol라는 사실을 고려한다면^{24,25)} 다음과 같이 생각할 수 있다.



Pd 표면에 반응(4)에 따라 수소가스가 흡착한 후 흡착된 수소가스가 분해되고 분해되어 생성된 수소원자가 일함수의 변화를 일으키므로 센서의 감도는 표면에서의 수소가스 흡착량에 비례한다. 흡착에너지가 작은 (111)방향으로의 우선배향이 증가하면 Pd 표면에서의 수소가스 흡착량이 줄어

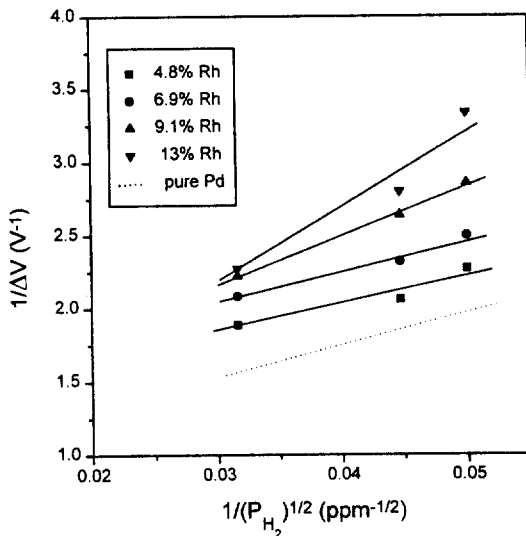


Fig. 10 Sensing characteristics of Pd-Rh MOS sensor exposed to H₂

센서의 감도 감소로 나타날 것이다. rf power 증가에 의해서보다 증착온도 증가에 의해서 센서감도가 크게 감소하는 사실을 증착온도의 증가시 (111)방향으로 우선배향정도가 매우 커서 수소가스의 흡착이 크게 감소했기 때문이라고 설명할 수 있다.

Pd-Rh 게이트를 스퍼터링으로 증착한 MOS 센서의 수소가스에 대한 감지특성과 황화수소가스에 대한 감지특성이 각각 Fig. 10과 Fig. 11에 나타나있다. Rh의 농도가 증가할수록 수소가스에 대한 감도와 황화수소가스에 대한 감도는 각각 감소하였다. 이것을 Pd 게이트 MOS 센서의 결과와 비교해 보아도 감도가 작다. 또한 직선의 기울기는 증가하였으며, ΔV_{max} 는 감소하는 경향을 보여 주었다. 이는 MOS 센서의 감도가 게이트 표면에 가스가 흡착 할 수 있는 장소가 얼마나 많은가와 흡착이 얼마나 쉬운가에 관련이 있다고 본다면, 수소가스의 흡착이 Rh보다 Pd에서 훨씬 쉬우므로

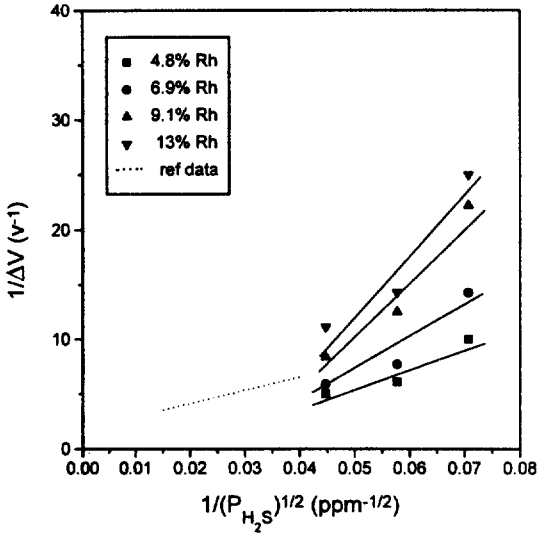
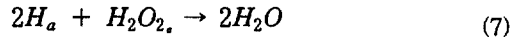
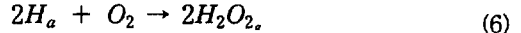


Fig. 11 Sensing characteristics of Pd-Rh MOS sensor exposed to H₂S

Rh의 함량이 증가할수록 수소가스의 흡착량이 감소하게 된다. 일반적으로 수소이온의 촉매금속 내에서의 확산속도는 표면에 가스가 흡착하는 속도보다 훨씬 빠르다고 알려져 있으므로, 박막이 계면을 완전히 덮어줄 만큼 충분히 두껍다면 두께는 반응속도에 거의 영향을 미치지 않으며, 게이트의 표면과 계면에서 일어나는 현상만 고려하면 된다. 게이트와 산화물간의 계면에서의 특성변화는 표면과 계면의 사이트가 비슷하다고 가정한다면 표면에서 수소가스의 흡착량이 감소하는 정도로 계면에서의 사이트가 줄어든다고 볼 수 있고 이는 계면에서의 쌍극자 모먼트량의 감소를 유발시켜 ΔV 값의 변화가 적어지므로 감도가 줄어든다고 생각된다.

H₂와 H₂S에 대한 감지특성을 비교해 보면, H₂에 대한 감도가 더 뛰어나다는 것을 알 수 있다. 이것은 H₂S의 경우 다음과 같은 반응을 거쳐서 검지되기 때문이다²⁷⁾.



계면에서 쌍극자를 형성함으로써 전압변화를 유발시키는 것은 분해된 수소이온이다. 표면에서의 생성된 수소이온의 내부로의 확산 등에는 거의 에너지 소모가 없으므로, 속도결정단계가 되는 가스를 이온상태로 분해시키는데 필요한 에너지만을 고려해 보자. 수소가스의 경우 두 개의 수소이온을 형성시키는데는 H-H 결합하나를 절단시키면 되지만 황화수소의 경우 두 개의 수소이온을 형성시키는데는 두 개의 H-S 결합을 절단시켜야 한다. H-H 결합에너지가 104.2(kJ/mol) 이고, H-S 결합에너지가 82.3(kJ/mol)이므로 두개의 H-S 결합을 끊기 위해 필요한 에너지는 164.6(kJ/mol)로써 수소가스의 경우보다 황화수소의 경우 더 많은 에너지를 필요로 하게 되고 이로 인해 황화수소에서 수소이온의 생성이 더 힘들기 때문에 황화수소에 대한 감도가 수소가스에 대한 감도보다 떨어지게 된다.

IV. 결론

Pd 증착조건이 Pd MOS센서의 수소검지특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 rf power, 증착온도를 변화시켜 Pd MOS Capacitor를 제작하고 수소검지특성을 비교하였다. rf power의 증가와 증착온도의 증가는 모두 센서의 감도와 초기반응속도를 감소시켰으며 rf power의 변화보다는 증착온도의 변화에 의한 효과가 현저하였다. rf power의 증가보다는 증착온도의 증가로 (111)방향 우선배향정도가 현격히 증진되었으며 (111)방향으로의

수소가스 흡착에너지가 (100), (110)방향보다 작다는 사실을 고려한다면 흡착에너지가 작은 (111)방향으로 우선배향이 증가함에 따라 Pd 표면에서의 수소가스 흡착량이 줄어들고 이것이 센서의 감도 감소로 나타난 것이라고 생각할 수 있다. Pd에 Rh를 첨가하여 게이트를 제작한 경우 센서의 감도는 Rh의 함량이 증가할수록 감소하였으며, 이것은 Rh에서의 수소흡착이 힘들기 때문에 전체적인 수소가스 흡착량의 감소에 의한 것이다. Pd-Rh 센서에 대한 H₂와 H₂S의 감도측정 결과 H₂의 감도가 더 높게 나타났으며, 이것은 H₂에서 수소이온 생성이 H₂S에서 수소이온 생성보다 에너지 측면에서 더 쉽기 때문이다. rf power, 증착온도, 기판의 변화는 MOS센서의 감도나 초기반응속도를 비롯한 센서특성에 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었으며 박막성질의 변화를 Pd 표면의 수소가스 흡착성질이나 계면에서의 흡착성질과 연관지어 설명하였다.

V. 참고문헌

1. I. Lundström, M. S. Shivaraman., C. S. Svensson, and L. Lundkvist, Hydrogen sensitive MOS field-effect transistor, *Appl. Phys. Lett.*, **26**, 55-57 (1975).
2. I. Lundström, M. S. Shivaraman, and C. S. Svensson, A hydrogen sensitive Pd-gate MOS transistor, *J. Appl. Phys.*, **46**, 3876 (1975).
3. L. Stibler and C. S. Svensson, Hydrogen leak detector using a Pd-gate MOS transistor, *Rev. Sci. Instrum.*, **46**, 1206 (1975)
4. I. Lundström, M. S. Shivaraman, L. Stibler and C. S. Svensson, Hydrogen in smoke detected by Pd-gate field effect transistor, *Rev. Sci. Instrum.*, **47**, 738 (1976)
5. F. Winqvist, A. Spertz and I. Lundström, Determination of urea with and ammonia gas-sensitive semiconductor device in combination with urease, *Anal. Chim. Acta*, **163**, 143 (1984)
6. F. Winqvist, A. Spertz and I. Lundström, Determination of ammonia in air and aqueous samples with a gas-sensitive semiconductor capacitor, *Anal. Chim. Acta*, **164**, 127 (1984)
7. F. Winqvist, A. Spertz, M. Armgarth and I. Lundström, Biosensors based on ammonia sensitive metal-oxide-semiconductor structures, *Sensors and Actuators*, **8**, 91 (1985)
8. I. Lundström, and T. DiStefano, Influence of hydrogen on Pt-SiO₂-Si structures, *Solid State Commun.*, **19**, 871 (1976)
9. T. L. Poteat and B. Lalevic, Transition metal-gate gaseous detectors, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-29**, 1, 123, (1982)
10. T. L. Poteat, B. Lalevic, B. Kuliyeu, M. Yousuf and M. Chen, MOS and schottky diode gas sensors using transition metal electrodes, *J. Electron. Mater.* **12**, 1, (1983)
11. F. Winqvist, A. Spertz, M. Armgarth, C. Nylander, and I. Lundström, Modified Palladium metal-oxied-semiconductor structures with increased ammonia gas sensitivity, *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 839 (1983)
12. R. C. Hughes, W. K. Schubert, T. E. Zipperian, J. L. Rodriguez, and T. A. Plut, Thin-film palladium and silver alloys and layers for metal-insulator-semiconductor

- sensors, *J. Appl. Phys.* vol **62**, No. 2, 1074 (1987)
13. Z. Weixin and Z. Lingjuan, The ammonia sensitivity of Pd-Ir alloy-gate MOS field-effect transistor, *Sensors and Actuators*, **19**, 177 (1989)
 14. W. P. Kang and C. K. Kim, Catalyst-adsorptive oxide-semiconductor gas sensors, *Sensors and Actuators B*, **13-14**, 682 (1993)
 15. W. P. Kang and C. K. Kim, Performance and detection mechanism of a new class of catalyst(Pd, Pt, or Ag)-adsorptive oxide (SnO_x or ZnO)-insulator-semiconductor gas sensor, *Sensors and Actuators B*, **22**, 47 (1994)
 16. D. Krey, K. Dobos and G. Zimmer, An intergrated CO-sensitive MOS transistor, *Sensors and Actuators*, **3**, 169 (1982/83)
 17. G. J. Maclay, MOS hydrogen sensors with ultrathin layers of palladium, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol **ED-32**, No 7, 1158 (1985)
 18. A. Spetz, M. Armgarth, and I. Lundström, Optimization of ammonia-sensitive metal-oxide-semiconductor structures with platinum gates, *Sensors and Actuators*, **11** 349 (1897)
 19. J. F. Ross, I. Robins and B. C. Webb, The ammonia sensitivity of platinum-gate MOSFET devices : Dependence on gate electrode morphology, *Sensors and Actuators*, **11** 73 (1987)
 20. A. Spetz, M. Armgarthn and I. Lundström, Hydrogen and ammonia response of metal-silicon dioxide-silicon structure with thin platinum gates, *J. Appl. Phys.*, **64**, 3, 1274 (1988)
 21. I. Lundström, T. Ederth, H. Kariis, H. Sundgren, A. Spetz and F. Winqvist, Recent developments in field-effect gas sensors, *Sensors and Actuators B*, **23**, 127 (1995)
 22. M. Holmgerg, F. Winqvist, I. Lundström, J. W. Gardner, and E. L. Hines, Identification of paper quality using a hybridelectronic nose, *Sensors and Actuators B*, **26-27**, 246 (1995)
 23. I. Lundström and D. Sodergerg, Hydrogen sensitive MOS-structures Part 2 : Characterization, *Sensors and Actuators*, **2**, 105-138 (1981/82).
 24. H. Conrad, G. Ertl, and E. E. Latta, Adsorption of hydrogen on Pd single crystal surfaces, *Surf. Sci.*, **41**, 435 (1975).
 25. R. J. Behm, K. Christmann, and G. Ertl, Adsorption of hydrogen on Pd(100), *Surf. Sci.*, **99**, 320 (1980).
 26. R. C. Hughes, W. K. Schubert, T. E. Zipperian, J. L. Rodriguez and T. A. Plut, Thin -Film palladium and silver alloys and layers for metal-insulator-semiconductor sensors, *J. Appl. Phys.*, **62**, 1074 (1987)
 27. M. S. Shivaraman, Detection of H₂S with Pd-gate MOS field-effect transistors, *J. Appl. Phys.*, **47**, 3592 (1976)