

Humidity-Sensing Properties of RF Sputtered Vanadium Oxide Thin Films

崔福吉* · 崔昌圭* · 金成振**

(Bok-Gil Choi · Chang-Kyu Choi · Sung-Jin Kim)

Abstract - Vanadium oxide thin films (VOx) have been deposited by RF magnetron sputtering from V_2O_5 target under different oxygen partial pressure ratios(0%, 10%) and substrate temperatures(27°C, 400°C). Crystallographic structure and morphology of the films are studied by XRD and SEM. Humidity-sensing properties of resistive sensors having interdigitated electrode structure are characterized through electrical conduction measurements. The films deposited at room temperature are amorphous whereas the ones deposited above 400°C are polycrystalline. The sensors show good response to humidity over 20%RH to 80%RH. Vanadium oxide thin films deposited with 0% O_2 partial pressure at 400°C exhibit greater sensitivity to humidity change than others.

Key Words : Vanadium Oxide, Thin Films, Sputtering, Humidity Sensor

1. 서 론

화학 센서의 일종인 습도 센서는 가전 및 의료기기, 자동차, 과학 계측, 산업 및 농업분야 생산 공정 등에서 습도를 정밀하게 측정하여 제어하는데 사용되고 있으며, 고체 전해질, 세라믹, 유기 고분자 등을 감습 재료로 한 벌크형, 후막 및 박막형 센서가 제조되고 있다[1,2]. 습도 센서는 동작 원리에 따라 이온성 전도, 전자성 전도, 정전용량 형으로 크게 분류할 수 있는데, 현재 널리 사용되고 있는 습도 센서는 저항 변화형으로서 이는 습도의 변화에 의해 센서의 저항값이 변화하고 그 변화를 전기신호의 변화로서 검출하는 방식이다. 저항 변화형 습도 센서의 감습 재료로는 LiCl 등의 전해질, Se, Ge 등의 반도체 재료, $MgCr_2O_4$, $ZnCr_2O_4$, TiO_2 , SnO_2 등의 금속산화물 소결체, Al_2O_3 등의 다공질 금속 산화막, 나일론 등의 고분자 재료, 유기 혹은 무기 고분자 전해질막 등이 있다[3-5]. 세라믹 습도 센서의 동작은 알루미늄과 같은 다공질 반도체의 세공(pore)과 결정립계에서 물 분자의 흡착에 바탕을 두고 있으며, 세라믹 센서 제작시 조성이나 소결 조건을 선택함으로써 습도 민감 특성을 얻을 수 있는데 재현성과 최적의 센서 응답 특성을 얻기 위해서는 세공의 치수와 분포를 제어하는 것이 매우 중요하다[6].

바나듐 산화물은 상온에서 저항률이 $10^{-2} \sim 10^5 \Omega \cdot cm$ 정도로 특정 온도에서 비저항이 급격히 변화하면서 금속-반도체

(또는 절연체) 상전이가 발생하는 전이 온도를 갖고 있는데 이는 결정 구조의 변화에 기인한다고 알려져 있다. V_2O_5 와 VO_2 는 특히 각각 257°C와 68°C 부근에서 전기적, 광학적 특성이 크게 변하는 특성을 보임에 따라 전자 및 광소자, 센서 응용 등에 많은 관심이 집중되고 연구가 이루어지고 있다[7,8]. 일반적으로 화학량론적 V_2O_5 로부터 더 낮은 산화 상으로의 전이는 바나듐 원자를 에워싸는 산소 다면체의 재배열을 수반하며, V_2O_5 격자로부터 산소가 제거되면 점결합(공격자점)을 만들게 되고 바나듐 산화물의 화학적, 전기적 성질에 영향을 미치게 된다[9]. 바나듐을 기반으로 한 합금과 산화물은 태양전지의 창, 고체전지의 전극, 열-전계 변색 소자, 열-광학 스위칭 소자, 화학 센서, 측온 및 열감지 영상 소자 등의 제조를 위한 물질로서 광범위하게 응용되어 왔으며, 바나듐 산화막은 열증착, 열산화, 겔 용해증발, 스퍼터링, CVD 법으로 제조되고 있다[10-12]. 그런데 스퍼터링으로 얇은 바나듐 산화막을 증착시키는 경우 공정 조건에 따라 막 내에 다양한 바나듐 산화물 형태가 혼재할 수 있으므로 단일 상의 안정된 바나듐 산화막을 얻기 위해서는 타겟 물질, 산소 분압, 기판 온도, 증착률, 박막의 두께, 후열처리 등의 공정 변수를 최적화 할 필요가 있다[13].

본 연구에서는 습도 센서의 제조를 위한 감습 물질로 바나듐 산화막을 활용하기 위해 실리콘 기판 위에 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템을 사용하여 V_2O_5 타겟으로부터 산소 분압비와 기판 온도를 공정 변수로 바나듐 산화막을 증착시킨 다음 각각의 변수에 따른 구조적 특성의 변화를 측정·평가하였다. 또한 유리 기판 위에 빗살형의 전극과 바나듐 산화막을 증착하여 표면형 습도 센서를 제작한 다음 습도-전류 특성 및 습도 응답 특성을 조사하였으며, 에탄올, NO_2 등 화학 센서 제조를 위한 바나듐 산화막의 활용 가능성을 검토하였다.

† 교신저자, 正會員 : 公州大 工大 電氣電子工學部 教授

E-mail : bgchoi@kongju.ac.kr

* 學生會員 : 서울産業大 電氣工學科 教授

** 正會員 : 慶南大 工大 電子電氣工學部 副教授

接受日字 : 2006年 8月 17日

最終完了 : 2006年 8月 28日

2. 실험

타깃을 제조하기 위해 순도 99.9% V_2O_5 분말(CERAC Inc.)을 사용하였다. V_2O_5 분말을 평량하여 강철제 성형틀에 넣고 700 kg/cm^2 의 압력으로 압축 성형하여 디스크 형 3" V_2O_5 타깃을 제작한 다음 전기로를 사용하여 650°C 에서 2시간 동안 소결하였다. 증착된 박막의 구조적 특성을 조사하기 위해 저항률이 5~20 $\Omega\text{-cm}$ 인 (100) P형 단결정 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하였다. RF 마그네트론 스퍼터링 시스템(Varian VKS35)을 사용하여 바나듐 산화막을 증착시키기 위해 3×10^{-6} Torr 이하까지 초기 진공 상태를 만든 다음 아르곤 가스를 40 sccm 유속으로 반응실 내로 주입시키면서 가스압이 약 3×10^{-3} Torr가 되도록 하고 4.3 W/cm^2 의 RF 전력을 공급하여 플라즈마를 발생시켰다. 총 가스 유입량과 증착 가스압을 동일하게 한 상태에서 다양한(0%, 10%) 산소 분압비 $[P(O_2)/(P(O_2)+P(Ar))]$ 와 기판 온도(27°C , 400°C)로 두께 약 300 nm의 바나듐 산화막을 증착시켰다. 습도 센서를 제작하기 위해 유리 기판(Corning 7059)을 사용하였고 dc 스퍼터링으로 순도 99.999%의 백금을 금속 마스크를 통하여 전극간 거리 0.2 mm, 두께 약 2000 Å 정도로 증착하여 빗살형의 바탕 전극을 형성하였다. 전극 위에 RF 스퍼터링으로 바나듐 산화막을 증착시켜 표면형(surface type)의 센서를 제작하였다.

증착된 박막의 결정학적 구조 변화를 고찰하기 위해 X-ray diffractometer(Rigaku D/MAX-RC)를 사용하여 회절 패턴을 분석하였으며 회절 패턴은 30 KV, 60 mA, Cu Ka (1.5406 \AA) 방사로부터 얻었다. 증착된 박막의 표면 조직 변화와 두께를 측정하기 위해 Scanning Electron Microscope(Philips XL30S)를 사용하였다. 제작된 습도 센서의 감습 특성을 조사하기 위해 자체 제작한 습도 발생 장치와 지지체의 온도 조절이 가능한 probe station을 사용하였다. 주입 가스로 질소를 사용하였고 유량비를 1 l/min으로 하였으며 실리카 겔을 통한 건조 질소 가스와 순수 거품 발생(bubbling)을 통한 습윤(wet) 질소 가스의 혼합비를 조절하여 습도를 변화시켰다. 습도 변화에 따른 센서의 미소 전류는 전극 사이에 3 V의 정전압 바이어스를 인가한 상태에서 electrometer(Keithley 6517A)를 사용하여 측정하였으며, 정상 상태에 가까운 값을 구하기 위해 습도를 변화시킨 다음 15분 후의 값을 측정하였다. 응답 특성 역시 3 V의 정전압 바이어스를 인가한 상태에서 1분 간격으로 측정된 전류의 변화를 저항값으로 환산하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 다양한 산소 분압비(0%, 10%)와 기판 온도(27°C , 400°C)의 조건으로 증착시킨 바나듐 산화막의 XRD 스펙트럼을 나타낸다. 상온에서 증착한 산화막은 산소 분압비에 관계없이 비정질이었으나, 400°C 기판 온도에서 증착한 산화막은 0% 산소 분압비와 10% 산소 분압비로 증착시킨 박막 모두 (001)과 (002)의 사방정계 V_2O_5 격자면에 해당하는 두 개의 피크가 관찰되어 다결정으로 나타났다. Bragg의 식으로부터 계산한 (001) 면간격(d)은 0% 산소 분압비로 400°C 에서 증착시킨 박막은 4.363 \AA , 10% 산소 분압비로

400°C 에서 증착시킨 박막은 4.358 \AA 으로 나타났으며, 산소 분압비가 높을수록 면간격은 감소하였다.

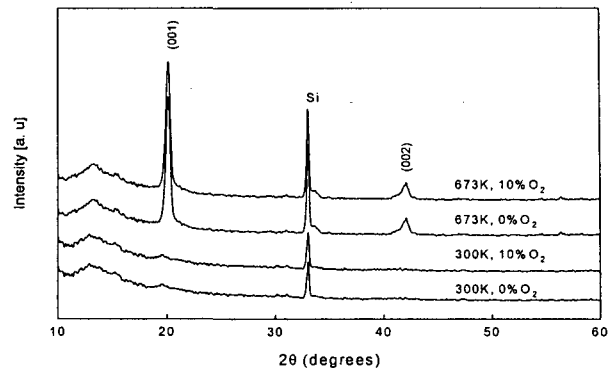


그림 1. 다양한 스퍼터링 조건으로 증착된 바나듐 산화막의 XRD 스펙트럼

Fig. 1. XRD spectra of vanadium oxide thin films deposited on different sputtering conditions.

그림 2는 다양한 산소 분압비(0%, 10%)와 기판 온도(27°C , 400°C)의 조건으로 증착시킨 바나듐 산화막의 SEM 사진이다. 상온에서 증착한 산화막은 결정립이 밀집화되고 응집된 모양을 보이나, 400°C 의 기판 온도로 증착한 산화막에서는 결정립의 성장으로 결정립의 크기가 증가하고 결정립이 개개로 분리되어 있으면서 가늘고 길게 신장된 막대 모양으로 관찰되었다. 이와 같은 XRD와 SEM 분석을 통하여 400°C 이상의 고온에서 증착한 바나듐 산화막에서는 결정립의 성장으로 퇴적막이 장거리 질서를 갖게 됨을 알 수 있다.

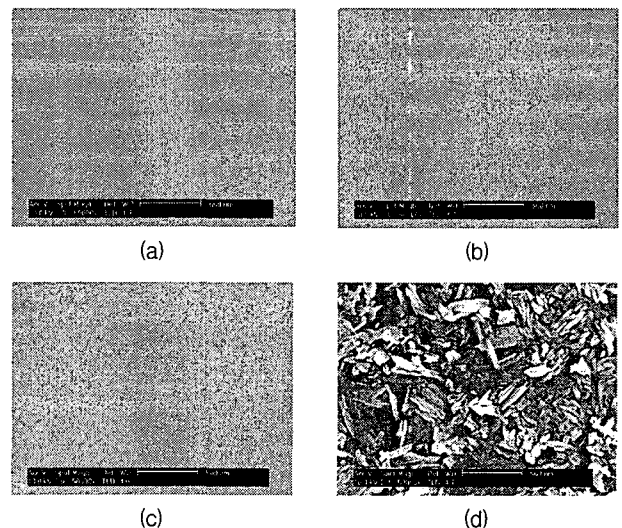


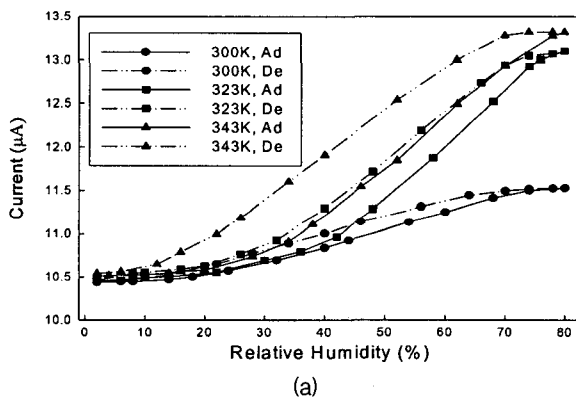
그림 2. 다양한 스퍼터링 조건으로 증착된 바나듐 산화막의 SEM 사진; (a) 27°C 0%, (b) 27°C 10%, (c) 400°C 0%, (d) 400°C 10%

Fig. 2. SEM micrographs of vanadium oxide thin films deposited on different sputtering conditions; (a) 27°C 0%, (b) 27°C 10%, (c) 400°C 0%, (d) 400°C 10%.

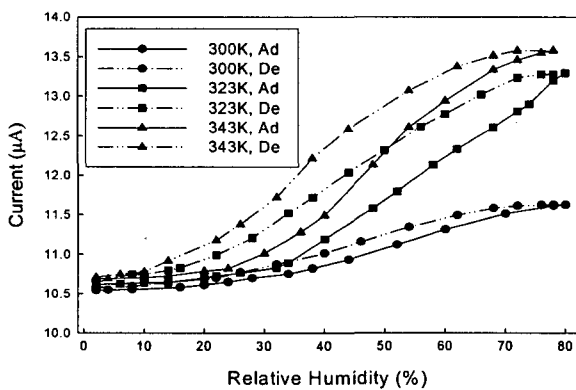
그림 3과 4는 각각 27°C 및 400°C 기판 온도에서 0%와 10%의 산소 분압비로 바나듐 산화막을 증착시켜 제조한 센서의 동작 온도 변화에 따른 상대습도에 대한 센서 전류의 의존성을 보여준다. 저습도에서는 작은 누설 전류가 흐르고 감도가 낮았으나 약 20%RH 이상에서는 습도가 증가함에 따라 센서 전류가 큰 폭으로 증가하여 비교적 양호한 감도를 나타내었으며, 약 70%RH의 고습도가 되면 센서 전류가 포화되는 경향을 보였다. 수분의 흡·탈착 과정에서 히스테리시스 현상을 나타냈으며, 동작 온도가 증가하면 센서 전류가 상승하고 감도는 향상되었으나 히스테리시스 현상은 증가하였다. 고온(400°C)에서 낮은 산소 분압비(0%O₂)로 바나듐 산화막을 증착시켜 제작한 센서의 감도가 가장 높게 나타났다. 센서의 감도(S)는 측정된 전류값을 컨덕턴스로 환산하여 그 비율로 정의하였으며 다음 식을 사용하였다.

$$S = [(G_H - G_A) / G_A] \times 100 \quad (1)$$

여기서 G_H는 습도를 가해주었을 때의 컨덕턴스, G_A는 건조 공기 상태에서의 컨덕턴스이다. 표 1은 조건별로 제작된 센서들의 습도 60%RH에 대한 감도를 보여준다.



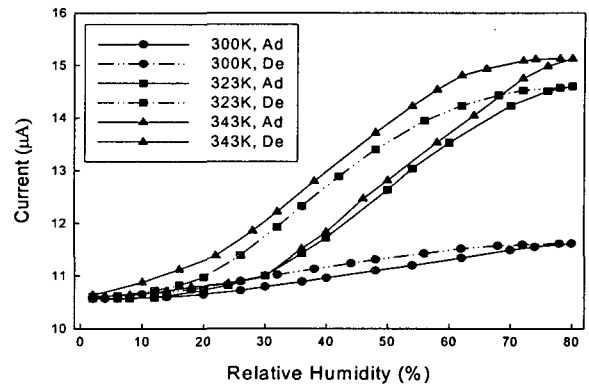
(a)



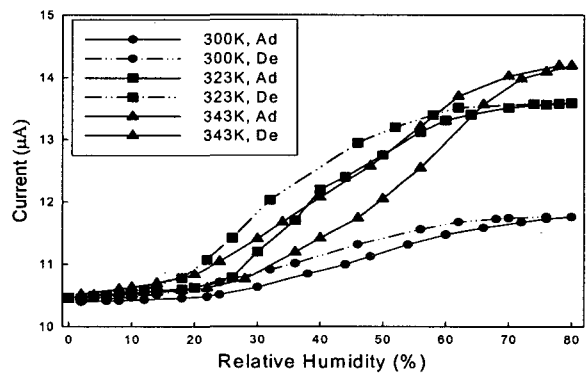
(b)

그림 3. 27°C에서 다양한 산소 분압 스퍼터링 조건으로 증착시킨 바나듐 산화막의 측정 온도에 따른 감습 특성; (a) 0%O₂, (b) 10%O₂

Fig. 3. Humidity-sensitive properties of vanadium oxide thin films deposited with (a)0%O₂ and (b)10%O₂ at 27°C on measuring substrate temperatures.



(a)



(b)

그림 4. 400°C에서 다양한 산소 분압 스퍼터링 조건으로 증착시킨 바나듐 산화막의 측정 온도에 따른 감습 특성; (a) 0%O₂, (b) 10%O₂

Fig. 4. Humidity-sensitive properties of vanadium oxide thin films deposited with (a)0%O₂ and (b)10%O₂ at 400°C on measuring substrate temperatures.

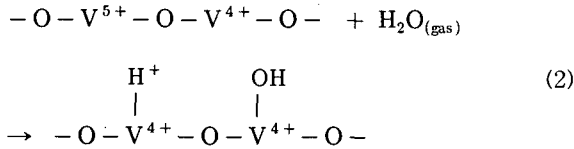
표 1. 박막 증착 조건에 따른 센서의 감도

Table 1. Sensitivity of sensors fabricated from different sputtering conditions.

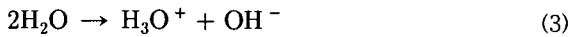
증착 조건	측정 온도 (°C)		
	27	50	70
27°C, 0%O ₂	7.3	12.6	15.3
27°C, 10%O ₂	7	13.1	17
400°C, 0%O ₂	6	21.5	28.9
400°C, 10%O ₂	9.5	21	18.9

바나듐 산화막 센서 전류의 상대습도 의존성은 세라믹 산화물에서 물분자의 흡착 메커니즘에 의해 설명될 수 있다 [3,14]. V₂O₅ 박막 내에는 구조적 결함으로 산소 공격자점 (vacancy)이 존재하게 되며 이러한 산소 공격자점 주위에는 V⁴⁺ 이온이 형성된다. V⁴⁺ 이온은 바나듐 산화막의 전기전도와 수분의 흡·탈착 과정에 중요한 역할을 하게 된다. 처음 소량의 습기가 존재할 때 산화물의 표면에 존재하는 바나듐

이온은 강한 정전계를 형성하며, 아래 기구와 같이 두 개의 인접한 바나듐 이온이 물분자를 해리하여 화학적으로 흡착함으로써 수산기를 형성한다[15].



이 때 표면에서 전기전도는 수산기 이온 사이에서 양성자 hopping을 통해 주로 이루어진다. 그 다음 물분자는 수산기에 이중 수소결합을 이루면서 물리적으로 흡착하여 첫 번째 물분자층을 형성하며, 계속하여 연속적인 수분의 물리적 흡착이 이어질 때 물분자는 하부 물분자층에 단일 수소결합을 이루면서 물분자의 다중층을 형성하게 된다. 물리적으로 흡착된 수분은 화학적으로 흡착된 물분자층의 높은 정전계에 의해 아래 식과 같이 해리된다[1].



이 때 감습층의 표면에 전계가 인가되면 H_3O^+ 이온이 인접 물분자에 양성자를 방출함으로써 인접 물분자 사이의 양성자 hopping을 통해 표면 전기전도가 일어나게 된다. 물의 해리 에너지는 수산기 이온의 해리 에너지보다 작기 때문에 높은 습도 하에서 전기전도도는 높게 나타난다. 또한 높은 습도 하에서는 감지막의 세공에서 물의 모세관 응축이 발생하게 되고 수분 흡착층에서 양성자에 의한 전기전도 외에 전해질에서와 같은 이온성 전도가 더해진다. 반도체 산화막 센서에서 일반적으로 동작 온도가 증가하면 아래 식에서와 같이 전기전도도(σ)는 증가한다[5].

$$\sigma = A \exp(-E_A/kT)p_{(gas)}^{1/N} \quad (4)$$

여기서 A 는 상수, E_A 는 전기전도 활성화 에너지, k 는 볼츠만 상수, T 는 절대 온도, $p_{(gas)}$ 는 가스 분압, N 은 전기전도에 관계하는 주요 결합 형태에 따라 정해지는 상수이다.

감습층에 세공이 존재하면 수증기의 부분압이 포화치 이하일 경우에도 물의 응축이 발생하게 되는데 이와 같은 모세관 효과에 의한 물의 응축 과정은 한쪽 끝이 막힌 모세관에 대한 Kelvin 식으로부터 해석이 가능하다[3].

$$r_K = \frac{2\gamma M}{\rho R T \ln(P_s/P)} \quad (5)$$

여기서 r_K 는 세공의 Kelvin 반경, γ 는 표면 장력, M 은 물의 분자량, ρ 는 물의 밀도, R 은 기체 상수, T 는 절대 온도, P_s 는 포화 수증기압, P 는 수증기압이다. 일정한 수증기압에서 r_K 이하의 반경을 갖는 모든 세공에서 물

의 응축이 발생하며, r_K 값이 작을수록 온도가 낮을수록 응축은 쉽게 일어난다. 따라서 습도가 증가하면 보다 큰 세공에서도 물의 응축이 발생할 수 있으며, 반면 온도가 높아지면 표준 수증기압이 증가하므로 일정 반경의 세공에서 물의 응축이 발생하기 위해서는 더 큰 물의 증기압이 필요하게 된다. 세라믹 산화물 내에는 다양한 크기의 세공이 분포하게 되는데 세공에서 물의 응축이 발생함에 따라 감도는 감소하며, 대부분의 세공들이 응축된 물에 의해 완전히 채워지면 감지 전류(또는 저항)는 포화를 보이게 된다. 히스테리시스 특성은 감습부에 있는 물분자의 평형 증기압이 흡착시와 탈착시 다르기 때문에 나타나는 현상이다. 흡착된 물이 모세관 응축에 의해 표면적이 감소하는 경우 표면 자유에너지의 저하가 히스테리시스의 주요 원인이 된다.

바나듐 산화막 증착 시 고온의 기판 온도 조건 하에서 증착을 하면 산화막 내의 산소가 표면으로 이동하거나 확산하는율이 증가하게 되고, 이로 인해 산화막 내의 산소 공격자점이 증가하게 된다. 그 결과로 국재 준위의 농도가 증가하게 되고, V^{4+} 와 V^{5+} 사이에서 전자의 hopping에 의한 전기전도가 증가하게 된다. 또한 낮은 산소 분압비로 증착한 박막에서는 산소의 부족으로 인해서 박막 내에 다수의 산소 공격자점이 존재하게 되고, V^{4+} 이온으로부터 전자의 공급이 증가하여 전기전도도가 증가하게 된다. 따라서 고온의 기판 온도(400℃)와 낮은 산소 분압비(0%O₂)의 증착 조건으로 제조된 센서의 경우 XRD 분석과 SEM 관찰을 통해 확인된 바와 같이 그레인 성장에 따른 다공성의 증가로 표면적과 수분 흡착률이 증가하고, 감지막 내에 존재하는 다수의 공격자점에 의한 전자성 전기전도가 더해짐으로써 감도가 가장 좋게 나타나는 것으로 판단된다.

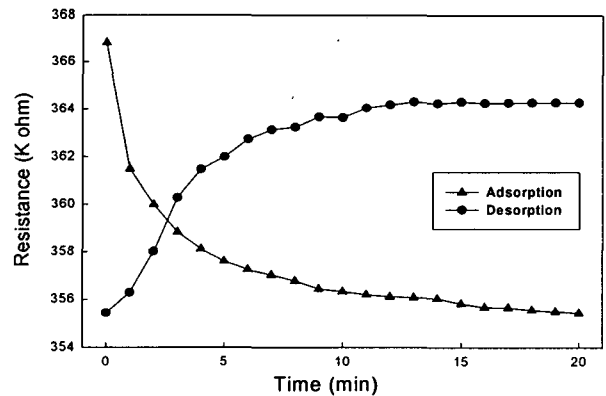


그림 5. 400℃에서 0% 산소 분압비로 제조한 센서의 과도 응답 특성

Fig. 5. Transient response properties of sensor fabricated with 0%O₂ partial pressure at 400℃.

그림 5는 400℃ 기판 온도에서 0%의 산소 분압비로 바나듐 산화막을 증착시켜 제조한 센서의 과도 응답 특성을 보여준다. 응답 특성을 측정하기 위해 습도를 변화시키기 전에 센서의 저항값을 안정시키기 위해 30분간 건조 질소 가스를 흘려주었다. 상온에서 습도를 5%RH에서 80%RH로 갑

자기 변화시키면 초기에 수분의 활발한 흡착 과정을 통한 빠른 응답과 평형 상태에 도달할 때까지 장시간에 걸친 저항 변화로 이어졌다. 응답 시간(response time) 및 회복 시간(recovery time)을 수분의 흡착 및 탈착 과정에서 센서 전체 저항 변화값의 10%에서 90%까지의 경과 시간으로 정의할 때 응답 시간(510 sec)은 회복 시간(460 sec)보다 길게 나타났다. 한편 다른 제조 조건의 시료에서는 응답 시간보다 회복 시간이 더 오랜 시간이 걸리는 것으로 측정되었으며, 응답 시간은 400℃ 기판 온도에서 10%의 산소 분압비로 바나듐 산화막을 증착시켜 제조한 센서에서 가장 짧게 나타났다. 과도 응답 특성은 증착된 박막의 다공도와 세공의 치수 및 분포에 관계하는 것으로 보여진다. 표 2는 조건별로 제작된 센서의 응답 시간 및 회복 시간을 보여준다.

표 2. 다양한 스퍼터링 조건으로 제작된 센서의 응답시간 및 회복시간

Table 2. Response and recovery time of sensors fabricated from different sputtering conditions.

증착 조건	응답시간 (sec)	회복시간 (sec)
27℃, 0%O ₂	490	665
27℃, 10%O ₂	515	552
400℃, 0%O ₂	510	460
400℃, 10%O ₂	460	637

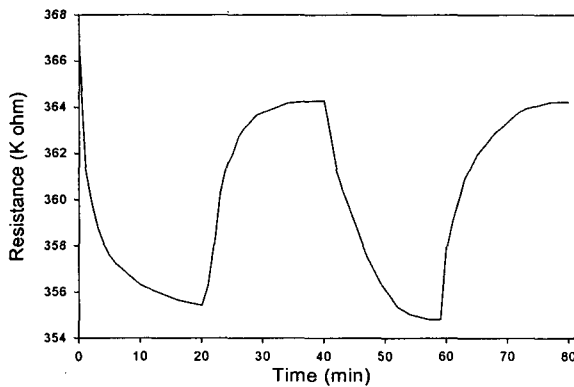


그림 6. 400℃에서 0% 산소 분압비로 제조한 센서의 연속 응답 곡선

Fig. 6. Sequence response curve of sensor fabricated with 0%O₂ partial pressure at 400℃.

그림 6은 400℃ 기판 온도에서 0%의 산소 분압비로 바나듐 산화막을 증착시켜 제조한 센서의 연속 응답 특성을 보여준다. 이때 상온에서 습도를 5%RH와 80%RH 사이로 연속적으로 변화시켰다. 첫 번째 흡·탈착 과정이 완전하게 평형 상태에 도달한 후 두 번째 흡·탈착 과정을 반복했을 때 저항값은 이전 흡·탈착 과정과 비교하여 큰 변화가 없었고 응답 시간 및 회복 시간도 변화가 거의 없었다. 이와 같은 결과로부터 탈착 과정에서 잔류 수분이 거의 남지 않고 완전히 제거됨을 알 수 있다. 바나듐 산화막을 습도를 포함한

화학 센서로서 다양한 대상에 적용하기 위해서는 센서의 감도와 응답 특성을 개선하기 위한 감지막의 최적 형성조건에 관한 추가적 연구가 필요하다.

4. 결 론

RF 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 V₂O₅ 타깃으로부터 다양한 기판 온도(27℃, 400℃)와 산소 분압비(0%, 10%)의 조건으로 유리 기판 위에 바나듐 산화막을 증착하여 표면형의 습도 센서를 제작하였다. 증착된 박막의 구조적 특성과 습도 변화에 대한 감도와 응답 특성을 조사하였으며, 습도를 포함한 화학 센서의 제작을 위한 감지 물질로 바나듐 산화막의 응용 가능성을 검토하였다.

XRD 분석 및 SEM 분석 결과로부터 상온에서 증착시킨 박막은 장거리 원자 질서가 크게 부족하여 산소 분압비에 관계없이 비정질로 나타났으나, 400℃의 기판 온도에서 증착시킨 박막은 다결정으로 나타났다. 이로부터 박막증착 기판 온도가 증가하면 결정립의 성장이 촉진되어 증착막의 치밀도가 감소하고 표면적이 증가한 결과로 나타남을 알 수 있다. 제조된 센서는 저습도에서는 낮은 감도를 보였지만 20%RH 이상의 습도에서는 비교적 양호한 감도를 나타내었다. 감도분석 결과 동작 온도가 증가함에 따라 감도가 향상되었으나 히스테리시스 현상은 증가하였으며, 400℃, 0% 산소 분압비로 바나듐 산화막을 증착시켜 제조한 센서의 감도가 증착막의 치밀도, 표면적, 결함 등 구조적 요인으로 가장 높게 나타났다. 동작 온도가 높을수록 수분의 흡·탈착 활성화 에너지의 감소로 좀더 좋은 감도를 보여주는 감도의 온도 의존성을 확인하였다. 응답 시간과 회복 시간은 8-10분 정도로 서로 큰 차이가 없었으며, 연속된 흡·탈착 과정에도 잔류 수분에 의한 응답 특성의 열화 현상이 크게 나타나지 않았다.

참 고 문 헌

- [1] B. M. Kulwicki, "Humidity sensors", J. Am. Ceram. Soc., vol. 74, no. 4, pp. 697-708, 1991.
- [2] C. Loughlin, "Tutorial: moisture content and humidity", Sensor Review, pp. 137-140, 1990.
- [3] W. Göpel, J. Hesse and J. N. Zemel, Sensors: Chemical and Biochemical Sensors, vol. 3. VCH Publishers, pp. 981-1012, 1992.
- [4] A. M. Azad, et al., "Solid-state gas sensors: A review", J. Electrochem. Soc., vol. 139, no. 12, pp. 3690-3704, 1992.
- [5] P. T. Moseley, "Materials selection for semiconductor gas sensors", Sensors and Actuators B, vol. 6, pp. 149-156, 1992.
- [6] T. Seiyama, N. Yamazoe and H. Arai, "Ceramic humidity Sensors", Sensors and Actuators, vol. 4, pp. 85-96, 1983.

- [7] R. T. Rajendra Kumar et al., "Pulsed laser deposited vanadium oxide thin films for uncooled infrared detectors", *Sensors and Actuators A*, vol. 107, pp. 62-67, 2003.
- [8] K. C. Kam and A. K. Cheetham, "Thermochromic VO₂ nanorods and other vanadium oxides nanostructures", *Materials Research Bulletin*, vol. 41, pp. 1015-1021, 2006.
- [9] A. Z. Moshfegh and A. Ignatiev, "Formation and characterization of thin film vanadium oxides", *Thin Solid Films*, vol. 198, pp. 251-268, 1991.
- [10] J. Liu, X. Wang, Q. Peng and Y. Li, "Preparation and gas sensing properties of vanadium oxide nanobelts coated with semiconductor oxides", *Sensors and Actuators B*, vol. 115, no. 1, pp. 481-487, 2006.
- [11] A. Benayad et al., "Vanadium pentoxide thin films used as positive electrode in lithium microbatteries: An XPS study during cycling", *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 67, no. 5-6, pp. 1320-1324, 2006.
- [12] L. Ottaviano, A. Pennisi, F. Simone and A. M. Salvi, "RF sputtered electrochromic V₂O₅ films", *Optical Materials*, vol. 27, no. 2, pp. 307-313, 2004.
- [13] M. G. Krishna, Y. Debaugé and A. K. Bhattacharya, "XPS and spectral transmittance study of stoichiometry in sputtered vanadium oxide films", *Thin Solid Films*, vol. 312, pp. 116-122, 1998.
- [14] J. H. Anderson and G. A. Parks, "The electrical conductivity of silica gel in the presence of adsorbed water", *J. Phys. Chem.*, vol. 72, pp. 3662-3668, 1968.
- [15] A. Z. Moshfegh and A. Ignatiev, "A temperature programmed desorption study of the H₂O/V₂O₅ system", *Surface Science Letters*, pp. L650-L654, 1992.

저 자 소 개



최복길 (崔福吉)

1957년 10월 25일생. 1979년 고려대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1997년 일리노이대학교 방문교수. 1992년~현재 공주대 전기전자공학부 교수.

Tel : 041-850-8605, Fax : 041-856-7958
E-mail : bgchoi@kongju.ac.kr



최창규 (崔昌圭)

1953년 2월 25일생. 1979년 울산공과대학 전기공학과 졸업. 1981년 연세대 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년~1995년 Drexel 대학 방문교수. 1981년~현재 서울산업대 전기공학과 교수.

Tel : 02-970-6410, Fax : 02-976-7410
E-mail : choick@duck.snut.ac.kr



김성진 (金成振)

1961년 1월 16일생. 1983년 고려대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년~현재 경남대 전자전기공학부 부교수.

Tel : 055-249-2646, Fax : 055-249-2839
E-mail : sjk1216@kyungnam.ac.kr