

표면탄성파를 이용한 아황산 가스센서 개발에 관한 연구

The Study on development of a SAW SO₂ gas sensor

이 영 진*, 김 학 봉**, 노 용 래***, 조 현 민****, 백 성 기****
(Youngjin Lee*, Hakbong Kim**, Yongrae Roh***, Hyunmin Cho****, Sung Baik****)

요 약

아황산가스를 감지하기 위해 새로운 CdS 무기박막을 이용한 표면탄성파 센서를 구현하였다. LiTaO₃ 단결정 압전기판에 중심주파수 54 MHz인 두 개의 SAW 소자 및 발진기를 제작하였으며 아황산가스가 흡착, 탈착할 수 있는 감지막을 지연선 상에 증착시키고 다른 변수로부터의 반응을 보상하기 위해 이중지연선 구조로 제작하였다. CdS 박막은 초음파 노즐을 이용하여 분무 열분해법을 이용하여 증착하였다.

실험결과 표면탄성파 센서는 아황산가스의 농도를 0.25 ppm 까지 검출할 수 있으며 20 ppm 이내의 안정도 및 5분 이내의 빠른 반응시간을 보였다. 또 가스감응 실험의 반복을 통해 센서의 반복성을 확인함으로써 본 연구에서 개발한 센서가 아황산가스 감지용 센서로 사용될 수 있음을 확인하였다. 향후 계획으로 CdS 박막 증착시에 적절한 원소를 첨가하여 박막의 반응성을 증가시키며 또한 표면탄성파 소자의 중심주파수를 증가시켜 센서의 가스감응성을 높이고자 한다.

ABSTRACT

A new type SO₂ gas sensor with a particular inorganic thin film on SAW devices was developed. The sensor consisted of twin SAW oscillators of the center frequency of 54 MHz fabricated on the LiTaO₃ piezoelectric single crystal. One delay line of the sensor was coated with a CdS thin film that selectively adsorbed and desorbed SO₂, while the other was uncoated for use as a stable reference. Deposition of the CdS thin film was carried out by the spray pyrolysis method using an ultrasonic nozzle.

The sensor could measure the concentration in air less than 0.25 parts per million of SO₂. Stability of the sensor turned out to be as good as less than 20ppm, recovery time after each measurement was as short as 5 minutes. Repeatability of the measurement was confirmed through so many reiterated experiments. Hence, the SAW sensor developed through this work showed promising performance as a microsensing tool of SO₂. Further work required to improve the performance of the sensor includes enhancement of the reactivity of the CdS thin film with SO₂ through appropriate dopant addition, an increase of the center frequency of the SAW device.

I. 서 론

최근 환경문제가 심각한 사회문제로 부각되면서 각종 오염원에 대한 관심이 집중되고 있다. 그 중 대기오염은 각종 호흡기 질환을 유발할 뿐 아니라 오존층을 파괴하고 지구 온난화 및 산업시설물의 노화를 일으키는 원인이 되고 있다. 이러한 대기오염의 주원인은 황화합물(SO_x), 질소화합물(NO_x), 일산화탄소(CO), 분진 등이며 CO, SO_x, NO_x의 순으로 배출량이 많은 것으로 알려져

있다¹⁾. 특히 산성비의 주원인으로 알려져 있는 아황산가스는 화석원료를 많이 사용하는 산업분야에서 주로 배출되며 국내의 경우 연간 160만톤 이상의 높은 배출량을 보이고 있다.

아황산가스의 검출 방법은 크게 물리적 방법(Flame Photometric Detection, U.V.Fluorescence Technique), 화학적 방법(Hydrogen Peroxide Method)과 전기 화학적 방법으로 구분할 수 있지만²⁾ 연속적인 측정이 어렵고 장비가 고정되어 있으며 측정을 위해 400℃ 이상의 고온을 유지해야 하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 통신용 소자로 많이 사용되고 있으며 가스센서로 우수성이 검증된^{3, 4, 5)} 표면탄성파(SAW: Surface Acoustic Wave) 소자를 이용하여 휴대성이 뛰어나고 연속적인 감시가 가능

*경북대학교 센서공학과

**경북대학교 센서기술연구소

***경북대학교 전자공학과/센서공학과

****포항공과대학교 재료금속공학과

접수일자: 1996년 12월 11일

한 아황산가스 센서를 개발하고자 하였다. 표면탄성과 센서는 환경변화에 민감하게 반응하는 특성을 가지고 있으며 뛰어난 감도와 재현성, 안정성과 소형제작이 가능하고 저렴하며 특히 가스센서로 이용될 경우 감지능이 수 ppb에 이르고 감응시간도 상당히 짧은 장점을 가지는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 본 연구에서는 우수한 압전특성과 센서로서 최적의 효과를 나타낼 수 있는 단결정 기판을 결정하여 중심주파수 54 MHz를 가지는 이중 지연선(Dual Delay Line) 형식의 표면탄성과 소자를 제작하였다. 가스 감응 물질로는 반도체형으로 아황산가스에 감응성이 입증된 적이 있는^{5, 7)} Cadmium Sulfide (CdS) 박막을 초음파 분무 열분해법(Ultrasonic Spray Pyrolysis)으로 증착하고 케찰 증폭기를 이용한 발진기를 구성하여 아황산가스에 대한 반응도를 주파수의 변화로 나타나게 하였다. 출력되는 주파수의 변화값을 디지털 신호로 처리한 후 마이크로프로세서를 이용한 컴퓨터 인터페이스를 추가함으로써 연속적인 감시가 가능한 시스템을 구현하였다. 제작된 센서는 가스 감응 실험을 통해 안정성과 감응성, 반복성 및 반응 시간을 평가하여 새로운 형식의 아황산가스 센서로서 사용가능성을 검증하고자 하였다.

II. 표면탄성과 아황산 가스센서의 제작

표면탄성과 소자를 이용한 최초의 센서는 1979년 H. Wohltjen의 습도센서로서 유기물 박막을 Quartz와 LiNbO_3 기판에 증착시켜 사용하였으며⁸⁾ 이 후 유량,⁹⁾ 압력,¹⁰⁾ 가속도,¹¹⁾ 온도,¹²⁾ 습도, 가스^{3, 4, 5)} 등 각종 센서에 응용되었다. 표면탄성과 센서의 감지원리는 표면탄성과가 지나는 지연선 상에 감지하고자 하는 대상에 민감한 물질을 배치하여 표면탄성과의 진폭변화 및 속도변화를 유도하는데 있다. 본연구에서는 고감도 SO_2 가스감지 표면탄성과 센서를 제작하기 위해서 압전기판과 전파방향 선정, 표면탄성과 소자의 최적 형태 설계 및 제작, CdS 박막의 증착, 표면탄성과 센서 시스템과 박막형 히터의 설계 및 제작 단계로 실험을 진행하였다.

2.1 압전기판의 선정

표면탄성과 소자는 일차적 설계 이론으로 대부분의 해석이 가능해졌으나 우수한 성능의 소자가 요구됨에 따라 이차적 효과의 해석이 중요시되고 있다. 특히 정밀한 센서로 사용할 경우 이러한 이차적 효과는 더욱 중요시된다. 그러나 설계시 이차적 효과를 보상하는 것은 단순한 문제가 아니므로 이차적 효과를 최소화하여 무시할 수 있는 방법을 사용되고 있으며 그 첫 단계가 최적 재료의 선정에 있다. 수치해석에 따른 최대 효율을 얻을 수 있는 최적 단결정 절단방향과 전파방향의 결정을 위해 Pure Mode Propagation, 최대 전기-기계 결합계수 (k^2), 최소 Frequency Temperature Coefficient, 최소 Air Loading Attenuation, Beam Steering Angle을 고려하였으며, 부가

적으로 최대 전파 속도, 최대 Surface Permittivity, 최소 Misalignment Sensitivity를 고려하였다. 상세한 해석방법 및 수학적 표현식은 참고문헌 13에 나타내었다.¹³⁾ 그 결과 최적 기판의 선정을 LiTaO_3 Y-cut Z-propagation axis로 결정하였으며 부가적으로 36° Y-X LiTaO_3 기판을 사용하여 단일 전극(single electrode) 형태로 표면탄성과 소자를 제작하였다.

2.2 CdS 박막의 증착

CdS 박막 증착을 위한 장치도를 그림 9에서 나타내었다. 열분해법을 이용한 CdS 박막의 증착 시 증착온도, 용액 주입속도, 용액의 농도, 기판과 노즐의 거리, 증착시의 분위기, 반응 압력 등의 변수에 의해 박막의 형상이 결정되었으며 본 실험에서 증착된 박막은 a축이 4.135 Å이고 c축이 6.713 Å인 hexagonal wurtzite의 결정구조를 나타내었다. CdS 박막 증착을 위해 CdCl_2 (순도 99.99%)와 thiourea(순도 99%)를 부피비 1:1로 정량화하고 증류수에 용해시켜 수용액으로 제조하였으며 약 60~70°C에서 증탕가열로 한 시간 정도를 유지하면서 교반기를 사용하여 완전히 용해시켰다. 제작된 박막의 특성 평가를 위해 결정구조와 상생성의 정도, 표면형상을 관찰하고 증착된 두께를 측정하는 방법을 이용하였다. 박막의 결정구조와 상생성의 정도는 X-ray diffraction(XRD) 분석을 실시하고 박막의 표면형상의 관찰은 Scanning Electron Microscopy(SEM)을 사용하여 표면의 입자크기 및 형상을 관찰하였다. 박막의 두께는 α -step 200과 ellipsometry를 이용하여 측정하였다. 증착시간을 증가하여 박막의 두께를 증가시키고 증착온도를 300°C로 설정할 경우 (0002)면을 우선 방위로 하는 texture 형태의 박막 성장이 이루어졌다.

2.3 표면탄성과 센서 시스템의 설계 및 제작

표면탄성과 소자의 주파수 특성을 검출하는 시스템은 그림 1과 2에서 보이는 것과 같이 크게 표면탄성과의 속도변화를 주파수변화의 형태로 검출할 수 있는 두 개의 발진기, 각각의 발진된 주파수 값을 계수하는 디지털 주파수 계수기와 계수된 출력값을 장시간에 걸쳐 컴퓨터로 전송하여 연속적인 감시 시스템을 가능케 하는 컴퓨터 인터페이스 부분, 그리고 아황산가스가 감지막에 원활하게 흡/탈착할 수 있도록 소자부위만을 국부적으로 가열할 수 있는 박막형 히터로 구성되었다.

발진기는 Multivibrator 구조를 이용하여 발진을 유도하며 이 구조는 차후 디지털 회로와 접속이 용이하고 넓은 주파수 대역을 가지고 있어 뛰어난 응용성을 가지고 있다. 발진된 파형은 53.8MHz로 안정된 발진 파형을 보인다. 이는 표면탄성과 소자의 고유 주파수 특성과 거의 일치하며 여기서 발생하는 수 MHz의 미소한 주파수 오차는 회로부와의 접속에서 생기는 저항성 및 용량, 유도성 성분 때문에 기인하는 것으로 여겨지며 매년 조금씩의 오차를 보였다.

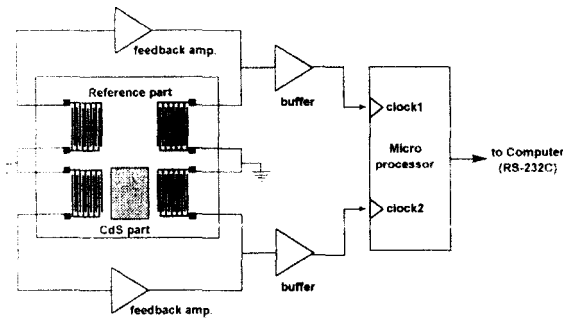


Fig. 1. Block diagram of SAW SO₂ gas sensor system

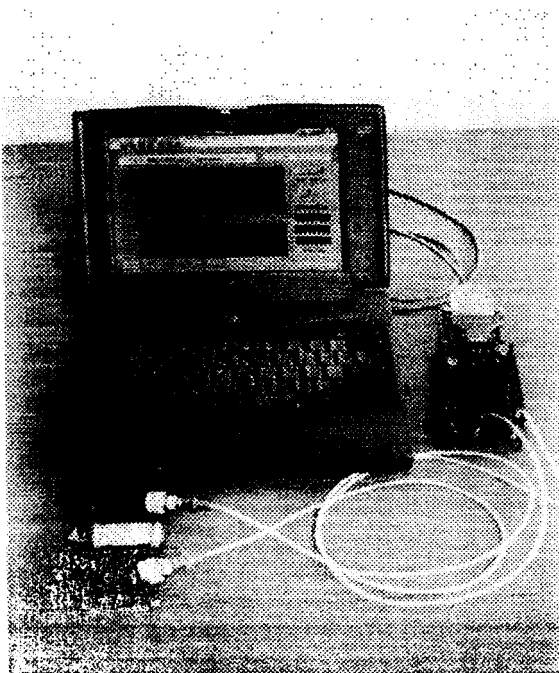


Fig. 2. SAW Sensor system

두 개의 발진기로부터 발진된 각각의 신호의 주파수 차를 구함으로써 아황산가스에 반응한 양을 구할 수 있다. 이전까지의 표면탄성파 센서는 아날로그 믹서와 저역통과 필터를 거쳐 두 신호의 차를 검출하여 계수기로 그 주파수를 읽는 방법을 이용하였다. 하지만 이와 같은 방법을 사용할 경우 기준부분과 박막부분의 발진 신호를 따로 감시하기 위해 추가적인 디지털 계수기가 필요하고 최종값이 절대값으로 출력되기 때문에 오동작의 유무를 판단하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 54MHz로 발진하는 두 신호의 주파수를 계수하기 위해서 고속동작이 가능한 16진 계수기와 89C51 마이크로프로세서를 사용하였다. 측정된 결과는 그래픽 언어 프로그램인 LabVIEW를 이용하여 사용자가 쉽게 그 결과를 판독할 수 있도록 하였다.

대부분의 가스 센서는 가스흡착이 일어나는 표면의 온도를 높여 가스 흡착에 필요한 에너지를 공급하고 있다.

특히 무기재료를 이용하는 경우 상온에서는 거의 반응을 하지 않으므로 센서 운용에 필요한 기본적인 감지능을 가지기가 어렵다. 따라서 본 연구에서도 아황산가스 입자가 원활하게 CdS 박막에 흡/탈착될 수 있도록 소자의 표면을 100~200℃의 온도를 유지하기 위해 저항형 히터를 개발하였다. 기판으로 사용하는 알루미늄 판의 밑면에 저항형 열선을 증착하여 히터로 동작하게 하였다.

III. 표면탄성파 센서의 고유특성 평가

표면탄성파 센서의 주파수 안정도는 박막의 감지능과 함께 곧바로 센서의 감도를 결정하는 요인이 된다. 특히 표면탄성파 센서는 주위의 온도와 습도변화에 대하여 가장 민감한 반응을 보이므로 이에 대한 보상 능력이 센서의 성능을 좌우한다. 제작된 센서는 고온에서 동작하므로 습도의 영향은 배제할 수 있으며 온도에 대한 특성을 평가하기 위해 상온과 고온에서 장시간에 걸친 주파수 안정도를 조사하였다.

36° Rotated Y-X LiTaO₃ 기판을 사용하였을 경우 상온에서 53.9 MHz 중심주파수로 발진하였다. 발진주파수는 주위환경과 제작시 발생하는 공정 오차에 의해 매년 약간의 차이를 보였으며 압전 기판의 종류에 따라서는 차이를 보였다. CdS 박막의 증착으로 인한 기준측과 감지측의 발진주파수는 20~50 MHz의 차이를 나타내었으며 마찬가지로 박막의 두께 및 회로부와의 접촉 저항의 오차에 의해 약간의 차이를 나타내었다.

그림 3에서는 상온에서 8시간에 걸친 표면탄성파 발진기의 출력을 나타내고 있다. 상대적으로 기온이 떨어지는 야간에는 주파수가 증가하고 기온이 상승하는 아침부터는 주파수가 다시 낮아지는 것을 알 수 있으며 발진 주파수는 외부 환경변화에 따라 4 MHz 이상의 편차를 보이고 있다. 그러나 두 주파수의 차이인 최종 출력은 그 편차가 1 MHz 이내로 20 ppm 이하의 안정도를 보였으며 그림 4에서와 같이 160℃의 고온에서도 상온에서와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 즉 온도변화 및 외부 잡음의 영향이 적절

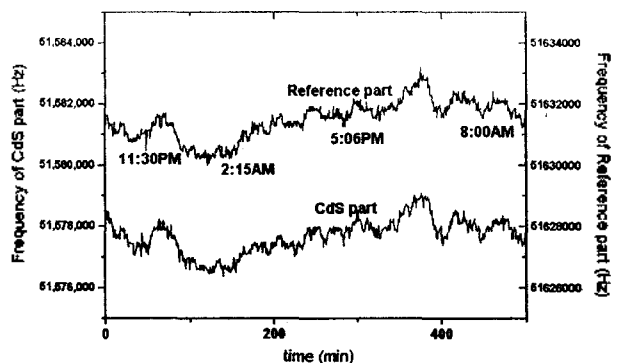


Fig. 3. Output of the SAW Oscillator during 8 hours at Room temperature

히 보상되며 특히 수 분 이내의 단기 안정도는 300 Hz 이내의 값을 가져 상당히 안정하며 이와 같은 20 ppm 이하의 안정도는 기존의 표면탄성과 센서의 안정도가 10~500 ppm인 것에 비할 때 상당히 우수한 특성이 있음을 알 수 있다.

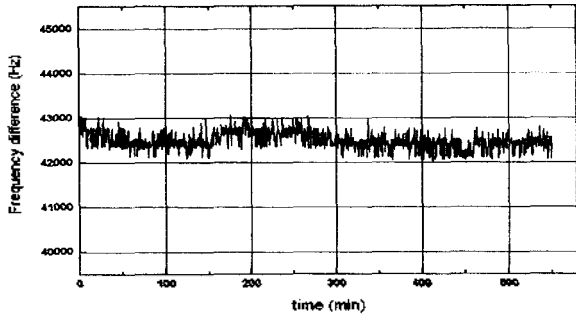


Fig. 4. Output of the SAW sensor system at 160°C

IV. SO₂ 가스에 대한 감응성

가스 감응 실험을 위한 측정 장치는 그림 10과 같이 가스 공급 부분과 반응기 부분 및 각종 측정 장비로 구성되어 있다. 반응기로 흐르는 가스의 유속을 조절하기 위해 두 가지 방법을 이용하였다. 200 ml/min 이하의 느린 속도로 가스를 주입할 때는 Mass Flow Controller로 조절하였으며 그 이상의 유속은 최고유속 2 l/min까지 조절이 가능한 flow meter를 이용하였다. 실험에 사용된 가스는 1%의 SO₂와 99%의 공기로 혼합되어 있으며 느린 유속일 경우는 Mass Flow Controller와 Air Mixer를 이용하여 순도 99.999%의 합성공기와 재혼합하여 원하는 농도로 맞추었다. 1 l/min이상의 빠른 속도로 가스를 주입할 때는 합성공기를 미리 흘린 후 flow meter의 밸브를 통해 SO₂ 가스의 추가되는 양을 조절하여 농도를 조절하였다. 또 빠른 유속으로 가스를 주입할 경우 강한 공기의 흐름으로 인해 표면탄성과 소자에 영향을 끼칠 우려가 있기 때문에 미리 공기를 1.8~2 l/min의 유속으로 흘린 후 SO₂ 가스를 추가로 섞어 넣는 방법을 적용하였다.

최적 기판 온도를 설정하기 위하여 표면탄성과 소자의 온도를 상온에서부터 170°C까지 증가시키면서 출력 특성을 조사하였다. 그 이상의 온도는 실험에서 배제하였는데 그 이유는 가스 흡착시 150°C에서 포화현상을 보였으며, 실제 기판의 온도를 170°C로 올리려면 Pt 기판의 온도는 350°C 이상으로 가열하여야 하는데 이것은 지나친 전력의 소비를 초래하여 이동성의 조건에 문제가 되기 때문이다. 그림 5에서와 같이 가스 흡착의 경우 측정환경을 500 ppm의 농도와 2 l/min의 유속으로 고정하고 온도변화에 대한 감도변화를 측정된 결과 기판의 온도가 증가함에 따라 가스 감응성은 증가함을 알 수 있다. 또 탈착의 경우에는 보다 높은 160°C 이상에서 원활하게 일어

남을 알 수 있었다. 따라서 아황산 가스가 CdS 박막과 가장 가역적인 반응을 하는 최적 기판의 온도를 흡착과 탈착이 원활하게 일어나는 160°C로 결정하였다.

그림 6은 1000 ppm의 아황산가스를 100 ml/min로 유입하였을 때의 출력을 나타낸 것으로 전형적인 가스 감응 형태를 나타내고 있다. 감응시간이 상당히 느리게 나타난 것은 가스의 주입 속도가 전체 반응기의 용량에 비해 매우 느리기 때문이며 100 ml/min의 유속일 경우 전형적으로 농도가 증가한다는 가정 하에서도 50분의 시간이 필요하게 된다. 이것은 가스를 배기한 후 한 시간 정도 후에 탈착이 일어나는 모습에서도 알 수 있다. 그러나 그림 7에서와 같이 2 l/min의 빠른 유속일 경우 반응시간은 상당히 향상된 것을 볼 수 있다. 가스 감응에는 약 2분이 소요되었으며 탈착은 보다 느린 3~4분 정도가 소요되었다.

따라서 CdS 박막의 SO₂ 가스에 대한 감응 및 복귀는 수 분내에 빠르게 일어남을 알 수 있으며 이러한 반응시간은 가역성이 뛰어난 기존의 아황산 가스센서의 반응시간이 1~3분만에 비할 때 매우 빠른 반응을 나타냄을 알 수 있다.

센서의 특성 중 가장 중요한 아황산 가스의 농도 변화에 대한 CdS 박막의 감응성 평가를 위해 가스 농도를 500 ppm, 1000 ppm, 3000 ppm, 5000 ppm, 10000 ppm의 단계로 구분하여 실험을 진행하였다. 그림 8과 같이 실험

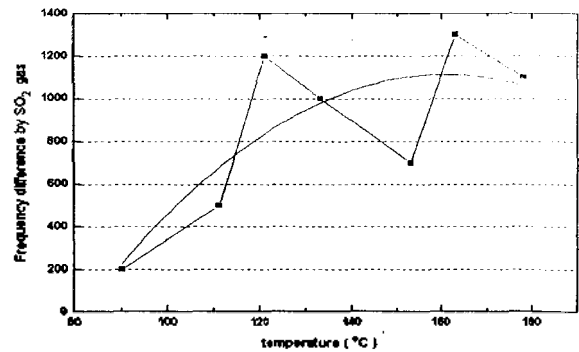


Fig. 5. Frequency shift versus substrate temperature under 500ppm, 2 l/min SO₂ gas

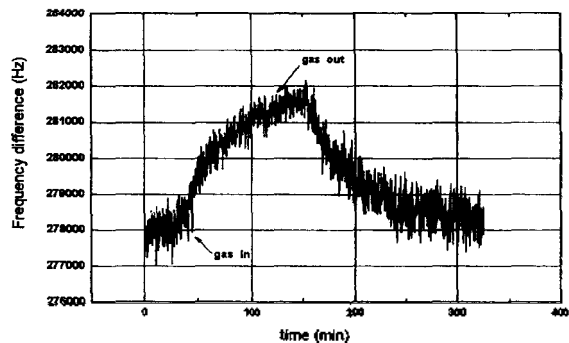


Fig. 6. Output of SAW sensor to 1000ppm, 100ml/min SO₂ gas

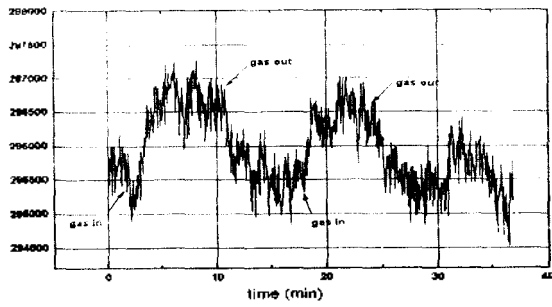


Fig. 7. Output of SAW sensor to 500ppm, 2 l/min SO₂ gas

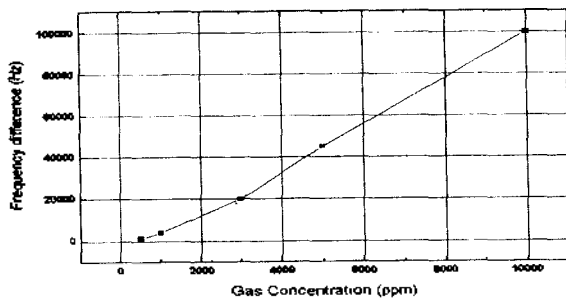


Fig. 8. Frequency shift versus SO₂ gas concentration(500ppm, 2 l/min SO₂ gas)

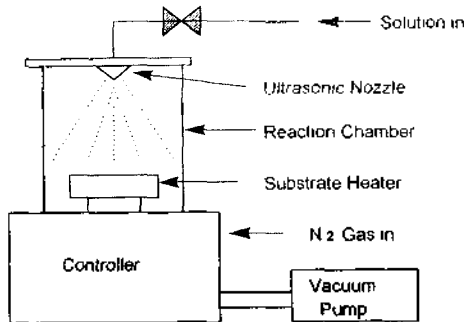


Fig. 9. Schematic diagram of Ultrasonic Spray Pyrolysis system.

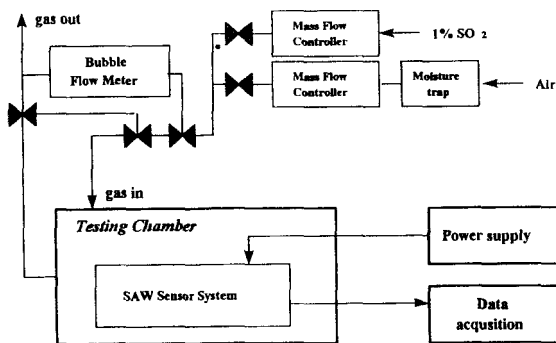


Fig. 10. Schematic diagram of characterization setup for SAW gas sensor.

결과 1000 ppm의 농도에 대해 중심주파수 54 MHz인 소자 일 경우 약 4 kHz의 주파수 변화가 발생하였고 500 ppm의 농도에서는 2 kHz, 3000 ppm에서는 20 kHz, 5000 ppm에서는 45 kHz, 10000 ppm에서는 100 kHz의 변화를 보여 선형성을 나타내었다 따라서 1 Hz의 분해능을 가질 경우 SO₂에 약 0.25 ppm의 감응도를 나타내었다. 센서의 감응도를 향상시키기 위해서는 In과 같은 원자수가 다른 원소를 박막 증착시 첨가하여 박막의 전자농도를 변화시켜 CdS 박막의 감응성을 향상시킬 수 있다. 또한 표면탄성파 센서의 감응성은 소자의 중심주파수의 자수에 비례하고 중심주파수가 높으면 분해능이 증가하게 되므로¹⁴⁾ 현재의 54 MHz의 중심주파수를 보다 증가시킴으로써 센서의 감응성은 보다 향상될 수 있을 것으로 생각된다.

V. 결 론

CdS 박막을 증착한 표면탄성파 소자를 이용하여 아황산 가스를 검출할 수 있는 새로운 센서를 구현하였으며 그 활용 가능성을 확인하였다. 센서 구현을 위해 LiTaO₃ 압전기판에 54 MHz의 중심주파수 및 이중 지연선 구조를 가지는 표면탄성파 소자를 설계, 제작하고 그 특성을 검증하였고 Cadmium Sulfide 박막을 초음파 분무 열분해법을 이용하여 증착하였다. 출력의 형태를 주파수로 나타낼 수 있는 표면탄성파 발진기를 제작하였으며 발진주파수의 차이 값을 구하기 위해 마이크로프로세서를 이용한 주파수 계수기 및 컴퓨터 인터페이스 부분을 개발하여 장시간에 걸친 연속 감시를 가능하게 하였다. 또 원활한 가스감응 및 원상복귀를 위해 백금 박막을 증착한 저항형 히터를 제작하였다.

제작된 표면탄성파 센서의 특성 및 아황산가스에 대한 감응성 실험 결과는 다음과 같다.

- 1) 표면탄성파 가스센서는 상온 및 감응온도에서 20 ppm 이하의 안정도를 보였다.
- 2) 최저온도에서 아황산가스의 농도변화에 대해 최대 0.25ppm의 감응도를 나타내었다.
- 3) 가스감응 후 복귀시간은 5분 이내로 빠른 복귀 시간을 나타내었다.

따라서 본 연구 논문에서 개발한 SO₂ SAW 센서는 안정성과 감응성, 반복성 및 감응시간에서 우수한 특성을 나타내었다. 향후 성능개선 방안으로 CdS 박막에 원자수가 다른 원소를 첨가하여 박막의 전자농도를 변화시킴으로써 가스 감응성을 향상시킬 수 있으며 또한 표면탄성파 소자의 중심주파수를 높임으로써 센서자체의 감도 및 분해능을 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

1. 환경처, "환경백서," pp. 29, 1994.
2. R. Perry, R. J. Young, "Handbook of Air Pollution Analy-

- sis," *Chapman and Hall*, pp. 240-254, 1977.
3. H. Wohltjen, A. W. Snow, W. R. Barger, D. S. Ballantine, "Trace chemical vapor detection using SAW delay line oscillators," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, UFFC-34(2) pp. 172-178, 1987.
 4. M. S. Nieuwenhuizen, A. W. Barendsz, "Processes involved at the chemical interface of a SAW chemosensor," *Sensors and Actuators*, 11 pp. 45-62, 1987.
 5. P. A. Payne, "Sensors and their applications," *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 16, pp. 947, 1983.
 6. V. V. Golovanov, A. I. Gudis, V. A. Smyntyna, "A Cadmium Sulfide gas analyzer sensor," *Zhurnal Analiticheskoi Khimii*, vol. 46, pp. 2374- 2379, 1991.
 7. N. Golovan, V. Smyntyna, "The sensitization of semiconductor gas sensors," *Sensors and Actuators B*, vol. 6, pp. 289-292, 1992.
 8. H. Wohltjen, R. Dessy, "Surface Acoustic Wave probe for chemical analysis. I. Introduction and instrument description," *Anal. chem.*, vol. 51, pp. 1458-1464, 1979.
 9. D. Rebiere, C. Dejous, J. Pistre, "Acoustic wave devices to measure gas flow: comparison between surface acoustic wave and shear horizontal acoustic plate mode oscillator," *Sensors and Actuators A*, 41-42, pp. 384-388, 1994.
 10. Y. R. Roh, "SAW sensors for measurement of surface forces in fluid flows," *J. Acoustical Society of KOREA*, vol. 9, no. 6, pp. 81-90, 1990.
 11. D. Hauden, "Miniaturized bulk and surface acoustic wave quartz oscillators used as sensor," *IEEE trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 34, no. 2, pp. 253-258, 1987.
 12. J. Neumeister, R. Thum, E. Luder, "A SAW delay-line oscillator as a High-resolution Temperature Sensor," *Sensors and Actuators*, A21-A23, pp. 670-672, 1990.
 13. Y. R. Roh, D. S. Chung, Y. B. Bae, and Y. S. Kim, "Properties of LiTaO₃ single crystals for SAW Device Applications," *Sensors and Materials*, vol. 7, no. 1, pp. 75, 1995.
 14. A. J. Ricco, S. J. Martin, T. E. Zipperian, "SAW gas sensor based on film conductivity change," *Sensors and Actuators*, 8, pp. 319-333, 1985.

▲이 영 진(Youngjin Lee)

1995년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)

1995년 3월~현재: 경북대학교 대학원 센서공학과 석사과정

▲김 학 봉(Hakbong Kim)

1992년 2월: 경북대학교 물리학과(이학사)

1994년 2월: 경북대학교 물리학과(이학석사)

1994년 2월~현재: 경북대학교 센서기술연구소 연구원

▲조 현 민(Hyunmin Cho)

1995년 2월: 포항공대 재료금속공학과(공학사)

1995년 3월~현재: 포항공대 대학원 재료금속공학과 석사과정

▲백 성 기(Sunggi Baik)

1971년: 서울대학교 금속공학과(공학석사)

1974년~1976년: 한국과학기술원 금속연구부 연구원

1981년: 미국 Cornell 대학교 재료금속과(공학박사)

1983년~1986년: Oak Ridge 국립연구소 연구원

1987년~현재: 포항공과대학교 재료금속공학과 교수

▲노 용 래(Yongrae Roh)

한국음향학회지 15권5호 참조