

이산화탄소 감지소자를 위한 마이크로볼로미터 구조 최적화 및 특성연구

서호원*** · 김태근** · 문성욱*,†

Structure optimization and characterization of a microbolometer for a CO₂ detector

Ho Won Seo***, Tae Geun Kim**, and Sung Moon*[†]

Abstract

In this work, we optimized a microbolometer for application of a CO₂ detector by using MEMS technology. We fabricated a stable thermal isolation structure by varying the lengths of supporting legs which affect bolometer performance. We could fabricate more stable thermal isolation structure for the microbolometer through the results of ANSYS simulations, and minimize the fabrication processes by using bulk micromachining to use a CO₂ detector. The microbolometer shows a detectivity of 2.5×10^9 cmHz^{1/2}/W at a chopper frequency of 8 Hz and a bias current of 6.25 μ A with a vacuum package of about 3.0×10^{-3} torr. Therefore, we put to conclusion that the microbolometer optimized in this experiment could be useful for the application of a CO₂ detector.

Key Words : MEMS, microbolometer, infrared, detector, carbon dioxide

1. 서 론

지난 수십 년 동안 가스를 감지하는 것은 사람에게 위험하거나 제품가격에 민감하지 않은 산업안전 분야나 제조공정 분야에서만 이용되었다. 최근 들어 가스 감지는 집안에서의 안전을 위한 일산화탄소 감지나 빌딩에서의 환기 조절에 이용되는 이산화탄소 감지와 같이 일상적으로 생활하는 곳이나 상업적인 용도에서 널리 이용되고 있다^[1]. 이산화탄소를 측정하는 방법은 전기화학적(electro chemical) 감지^[2], 촉매(catalytic pellets)^[3], 반도체, 적외선을 이용한 감지와 같은 기술로서 서서히 발전하였다. 지난 수십 년 동안 개발되어온 대부분의 센서 기술들은 반응성(reactive) 센서로서 분석 대상 가스가 가스농도에 비례하는 전기적 신호를 제공하는 센서부에 화학적으로 상호작용하므로 반응 종료 단계에서 화학적 반응의 불안정한 가역성(reversibility)

이 존재하고, 시간이 지남에 따라 화학물질이 소모되는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 비반응성(non reactive)인 적외선을 이용한 감지기술은 오랜 시간동안 가스 감지를 신뢰할 수 있어 그 사용이 증가하고 있다.

그림 1은 이산화탄소의 적외선 흡수특성을 나타낸 것이고, 그림 2는 NDIR 가스 센서의 개략도이다. 이산화탄소 가스 센서는 측정대상 가스에 의해 흡수되는 파장을 포함한 넓은 파장대의 적외선을 방사하는 광원과 가스 샘플 셀, 그리고 이산화탄소의 적외선 흡수피크를 가지는 4.26 μ m의 필터와 적외선 감지기로 구성된다. 이 중에서 이산화탄소 가스 센서의 성능을 향상시킬 수 있는 가장 중요한 구성요소는 적외선을 감지하는 감지소자라 할 수 있다.

본 논문에서는 마이크로볼로미터를 이산화탄소 감지소자로서 적용하기 위해 구조를 최적화 하고, 성능을 향상시키는 목적으로 연구를 수행하였다. 기존에 제작된 마이크로볼로미터는 폴리이미드(polyimide)와 같은 희생층을 형성한 후, 공정의 마지막 단계에 있어서 이 희생층을 제거함으로써 열적고립구조를 얻는 방법을 사용하였으나, 이를 기판 미세가공기법(bulk micromachining)을 이용하여 실리콘 기판을 식각함으로써, 공

*한국과학기술연구원 나노바이오연구센터(Nano Bio Research Center, Korea Institute of Science and Technology)

**고려대학교 전기전자공학부(School of Electronics & Engineering, Korea University)

[†]Corresponding author: s.moon@kist.re.kr

(Received : December 26, 2007, Accepted : January 14, 2008)

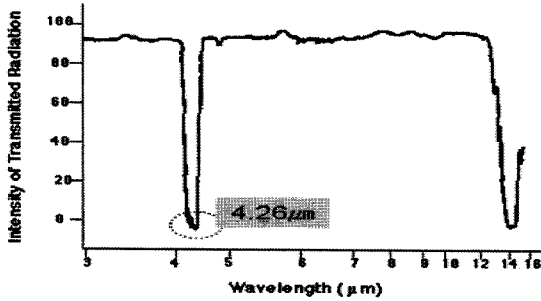


그림 1. 이산화탄소의 적외선 흡수 특성
Fig. 1. Infrared absorption characteristic of carbon dioxide.

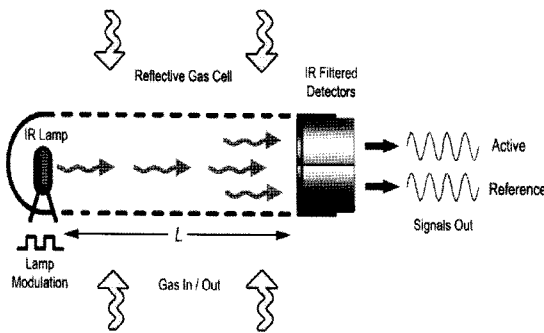


그림 2. NDIR 가스 센서의 모식도
Fig. 2. Schematic diagram of the NDIR gas sensor.

정을 보다 최소화하는 안정적인 열적고립구조를 제작하였다. 또한 마이크로볼로미터 설계 시 열손실을 최소로 할 수 있는 지지다리의 길이와 박막의 두께를 고려하여 이산화탄소 감지소자로의 적용을 위해 최적화하였다.

2. 이 론

마이크로볼로미터는 그림 3과 같이 적외선이 입사되는 부분과 소자를 지지하는 다리가 부유된 구조층 위에 함께 형성되어 있고, 그 위에 온도를 감지하는 저항체가 형성되어 있다. 이 저항체는 다리 위에 형성된 금속패턴을 통하여 기판의 회로와 연결된다. 적외선이 소자에 입사되면 그 에너지로 소자의 온도가 상승한다. 그러나 소자에서 외부로의 열손실이 있기 때문에 외부와 열 평형상태를 이루는 온도에서 소자의 온도가 결정된다. 이 온도변화로 인한 저항의 변화를 감지하여 적외선 복사를 감지한다.

식 (1)은 저항형 볼로미터의 열평형 방정식이다^[4].

$$C \frac{d(\Delta T)}{dt} + G(\Delta T) = \eta P + IV \quad (1)$$

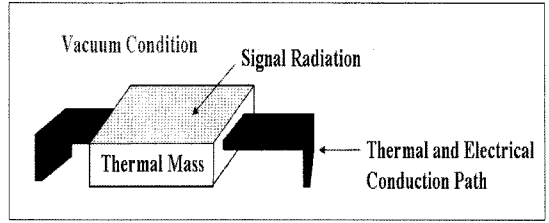


그림 3. 마이크로볼로미터의 모식도
Fig. 3. Schematic diagram of the microbolometer.

C: thermal mass, G: thermal conductance,
η: infrared absorption, P: radiant power

식 (1)의 오른쪽 인자는 볼로미터로 들어오는 열로서 출력신호를 얻기 위해 가해지는 바이어스에 의한 줄(joule) 가열과 입사되는 적외선에 의한 가열로 구분되고, 왼쪽 인자는 외부로부터 빠져나가는 손실 열과 적외선 감지층을 가열하는 열로 구분된다. 손실열의 경우 대류, 전도, 복사의 경로로 열이 빠져나가지만 일반적으로 볼로미터는 주변온도와 항온 유지시키며 진공으로 패키징되기 때문에 전도나 대류는 무시해도 된다. 그러나 지지다리에 의한 열전도는 가장 큰 열손실 인자이다.

3. 설계 및 제작

진공 패키징된 적외선 소자의 열손실의 대부분은 적외선 소자를 부유시키는 지지다리를 통해 발생하기 때문에 성능이 우수한 적외선 감지 소자를 제작하기 위해서는 열손실을 가능한 줄여야 하며, 가능한 작은 열전도도를 갖는 지지다리를 설계해야 된다.

적외선 소자의 열전도도(G)는 지지다리의 치수에 관련된 것으로, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G = \kappa \frac{w \cdot d}{l} \quad (2)$$

K: thermal conductivity, w: width
d: depth, l: length of supporting legs

식 (2)에서 보듯이 열 손실을 최소화하기 위해서 가능한 길고 가느다란 지지다리의 설계와 전기적인 신호를 받을 수 있으면서 최소의 열 방출을 갖는 재료의 선정이 적외선 감지 성능 향상에 중요한 변수가 됨을 알 수 있다.

그림 4는 지지다리의 길이에 따른 열전도도의 특성을 시뮬레이션 한 결과이다. 여기에서 적외선 감지층은 100×100 μm²부터 500×500 μm²까지의 면적에 대해서

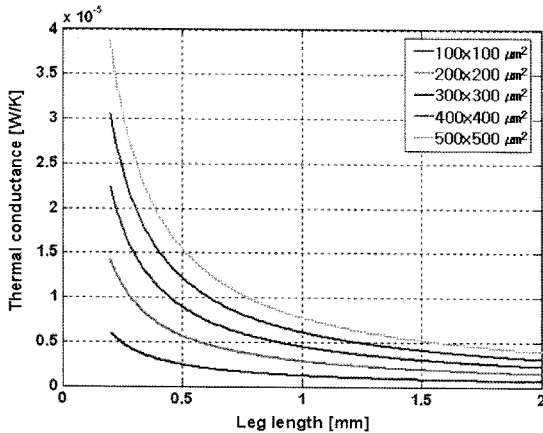


그림 4. 지지다리의 길이에 따른 열전도도의 특성
 Fig. 4. Thermal conductance characteristics as a function of the supporting leg length.

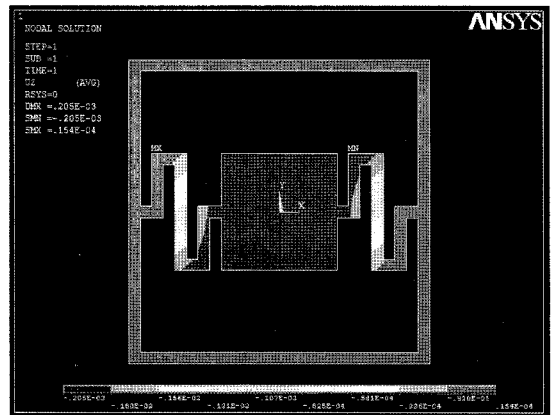
시뮬레이션 하였으며, 지지다리의 길이가 증가함에 따라 열전도도는 점차 감소함을 알 수 있었다.

적외선 감지 소자는 낮은 열용량을 가지는 적외선 흡수층 구조가 필수적으로 요구되는데, 본 논문에서 제안된 흡수층은 높은 적외선 흡수율과 낮은 열용량을 가지기 위해 보호층(SiNx)/감지층(V-W-O)/지지층(SiNx)/반사층(Cr/Au) 등으로 이루어진 구조를 가지며 열용량의 증가를 최소화하였다^[6]. 또한 실리콘 기판을 식각하여 열손실을 최소화하는 열적고립구조를 제작하였다.

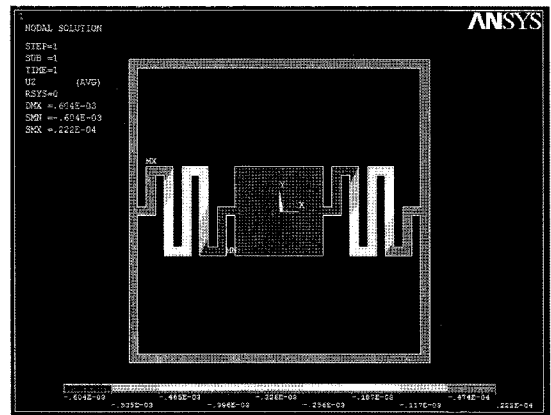
그림 5는 지지다리의 길이에 따른 구조물 전체의 처짐을 고려한 시뮬레이션 결과로, 공중에 부양된 감지부의 처짐 거리와 처짐에 의해 발생하는 지지다리의 응력에 다른 뒤틀림을 고려하여, 실리콘 기판을 식각시 안정적인 열적고립구조 제작하기 위하여 시뮬레이션 하였다.

그림 6은 실제 제작된 마이크로볼로미터의 SEM 이미지로, 시뮬레이션 결과를 통해 안정적으로 부유된 구조물을 지지할 수 있는 지지다리의 폭과 길이를 얻을 수 있었고, 이를 토대로 기판 미세가공기술을 이용한 제작 공정에서 안정적인 열적고립구조를 제작하였다.

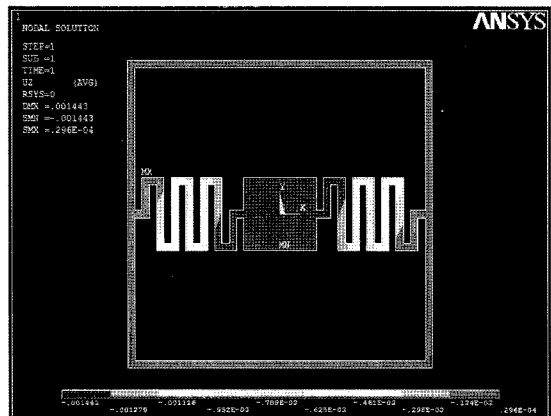
제작된 마이크로볼로미터 공정은 그림 7과 같은 순서로 진행되며 4개의 마스크를 사용하였다. 기판으로 사용되는 실리콘 웨이퍼에 절연층으로 SiNx (Silicon Nitride)를 LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition)를 이용하여 증착하였는데, 이때의 SiNx 박막은 공정완료 이후에 부유된 감지부가 안정적으로 형성되어 동작하기 위해서 저응력의 박막을 증착하였다. 그 위에 Lift-off process를 이용하여 반사층(Cr/Au)을



(a)



(b)



(c)

그림 5. 제안된 볼로미터의 시뮬레이션 결과.
 Fig. 5. Simulation result of proposed bolometer (a) 240 μm_0.2 nm, (b) 460 μm_0.6 nm, (c) 680 μm_1.4 nm.

형성하였고, 그 후에 지지층(SiNx)을 형성하였다. 감지층으로부터 전기적 신호를 얻기 위한 지지다리와 외부

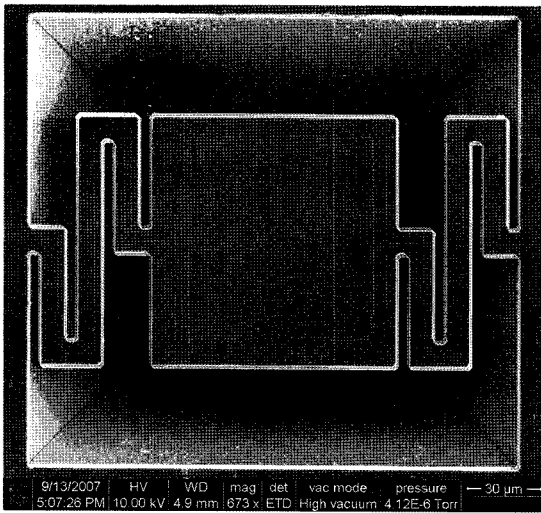


그림 6. 제작된 마이크로볼로미터의 SEM 사진
Fig. 6. SEM image of fabricated microbolometer.

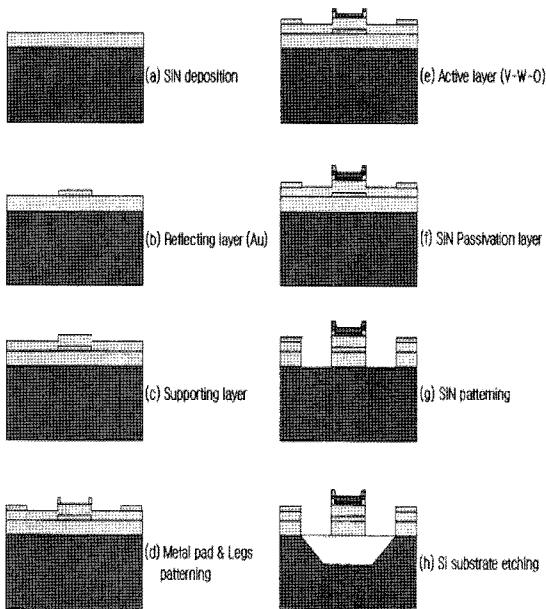


그림 7. 마이크로볼로미터 제작 공정 과정
Fig. 7. Fabrication process of the microbolometer.

로의 출력신호를 얻기 위한 패드 부분은 반사층과 같이 Lift-off process를 통하여 형성시켰다. 적외선 감지층은 V-W 합금(Vanadium Tungsten Alloy)을 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착하고 후속 열처리를 거쳐 VWO 박막을 형성하였다. 마지막 단계에 있어서 감지층을 보호하고 열적고립구조를 제작하기 위해 보호층(SiNx)를 형성한 후, RIE (Reactive Ion Etching)를 이용하여 식각하였다. 여기에 80 °C로 가열된 30 %

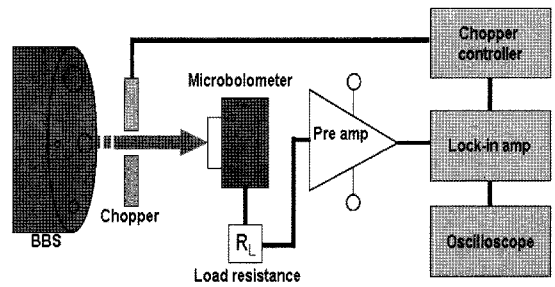


그림 8. 적외선 감지특성 측정을 위한 측정 시스템
Fig. 8. Measurement system for measuring IR detecting characteristics.

KOH (Potassium hydroxide)용액으로 실리콘을 식각하여, 감지층이 약 100 μm 부유된 안정적인 열적 고립구조를 제작하였다.

4. 특성평가

그림 8은 제작된 볼로미터의 성능특성을 측정하기 위한 기본적인 측정시스템의 구성을 보여준다. 광원으로는 BBS (Black Body Source)를 사용하였고, 대류에 의한 열손실을 최소화하기 위하여 3.0×10^{-3} torr로 진공 패키징하였다. BBS로부터 조사되는 적외선은 chopper blade에 의해서 적외선의 주파수가 변하게 되고, 4.26 μm의 필터를 통해 볼로미터에 입사하게 되는데, 이때의 볼로미터는 주기적으로 저항이 변하게 된다. 이 저항차이로 발생하는 전압차이를 증폭하여 rock-in amplifier를 통해 신호전압과 잡음전압이 측정되어 지는데, 신호전압의 측정은 chopper의 주파수와 동일한 주파수에서 얻어지며, 이는 chopper의 주파수를 기준(reference)로 lock-in amplifier에 입력함으로써 얻어진다.

볼로미터의 특성평가를 위한 신호전압, 잡음전압 및

표 1. 측정 파라미터
Table 1. Measurement Parameters

Parameter	Value
BBS temperature	973 K
BBS aperture	0.125 inch
Distance from BBS to lens	4 cm
Bolometer TCR	-2.0 %/K
Pixel resistance	13.5 KΩ
Preamplifier gain	50
Chopper frequency	8 Hz
Responsivity	2.2×10^5 V/W
Detectivity	2.5×10^9 cmHz ^{1/2} /W

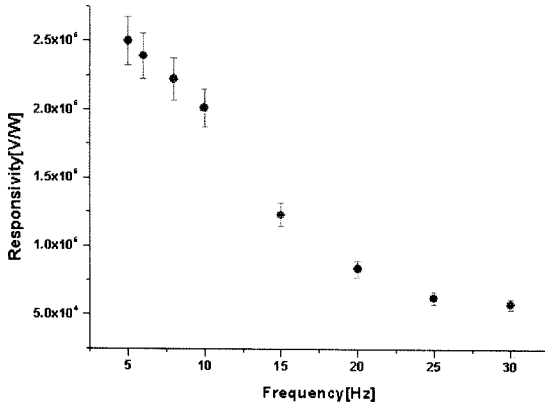


그림 9. 동작주파수에 따른 반응도 특성

Fig. 9. Responsivity characteristics as a function of the modulation frequency.

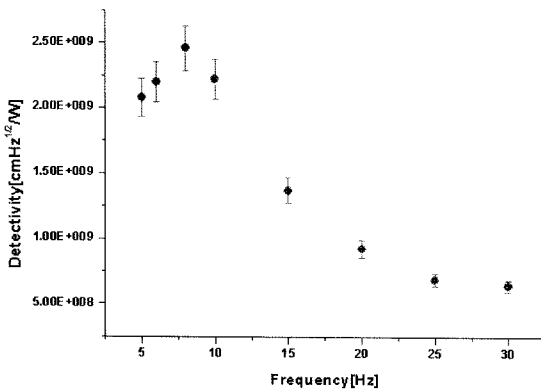


그림 10. 동작주파수에 따른 감지도 특성

Fig. 10. Detectivity characteristics as a function of the modulation frequency.

광량을 측정하여 그에 대한 응답도와 감지도를 측정하였다. 측정 파라미터와 chopper의 동작주파수에 따른 응답도와 감지도는 각각 표 1과 그림 9, 그림 10에 나타내었다. 감지도의 최대는 $2.5 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 로, 가장 높은 응답도의 특성을 보인 주파수가 아닌 특정주파수 (8 Hz)에서 나타나는 경향을 보이는데, 이는 잡음 신호의 증가가 응답도의 증가보다 적외선 특성 평가의 척도인 감지도에 보다 큰 영향을 미치는 것을 증명해주는 결과라고 생각된다.

5. 결 론

MEMS 기술을 사용하여 이산화탄소 센서의 감지소자로의 적용을 위해 마이크로볼로미터의 최적화를 통해 이산화탄소 감지소자로의 적용가능성을 제시하였다. 기관 미세가공기법을 이용한 실리콘 기관 식각시 불로

미터의 성능의 영향인자인 지지다리의 길이를 변화시키면서 시뮬레이션(ANSYS)을 통한 안정적인 열적 고립구조를 제작하였으며, 표면 미세가공기술을 이용한 기존의 공정을 보다 최소화하여 이산화탄소 감지소자로의 사용을 위해 최적화하였다.

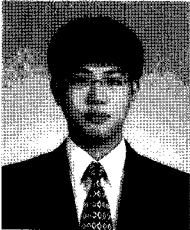
제작된 마이크로볼로미터는 $-2.0\%/K$ 의 TCR, $2.5 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 의 감지도 특성을 보였으며, 이처럼 안정되고 최적화된 공정을 통해 이산화탄소의 감지소자를 이용한 이산화탄소 센서 구현시 저가, 저전력 소비, 소형화 등의 장점을 가진 우수한 성능을 가질 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] Joda Wormhoudt "Infrared methods for gaseous measurements", *Optica Acta*, vol. 33, no. 9, pp. 1095-1095, 1986.
- [2] Currie, J.F., "Micromachined thin film solid state electrochemical CO₂, NO₂, and SO₂ gas sensors", *Sensors and Actuators, B, Chemical*, vol. 59, no. 2/3, pp. 235-241, 1999.
- [3] Andreas H., Oliver B., and Christoph H. Henry B., "Microfabrication techniques for chemical/biosensors", *proc. of the IEEE*, vol. 91, no. 6, 2003.
- [4] Paul W. Kruse and David D. Skatrud, "Uncooled infrared imaging arrays and systems", Academic press, 1997.
- [5] A.D. Parsons, "Thin-film infrared absorber structures for advanced thermal detectors", *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 6, no. 3, pp. 1686-1689, 1998.
- [6] Nguyen chi-Anh, H-J Shin, K-Te Kim, Y-H Han, and Sung Moon, "Characterization of uncooled bolometer with vanadium tungsten oxide infrared active layer", *Sensors and Actuators A* 123-124, 2005.
- [7] Y-H Han, K-T Kim, H-J Shin, and Sung Moon, "Enhanced characteristics of an uncooled microbolometer using vanadium- tungsten oxide as a thermometric material", *Applied Physics letters* 86, 2005.
- [8] Nguyen Chi-Ahn and Sung Moon, "Excess noise in vanadium tungsten oxide bolometric material", *Infrared Physics & Technology*, 38-41, 2007.
- [9] I.Y. Park, I.K. Lee, S.K. Lee, K.M. Kang, S.W. Kang, and J.H. Cho, "Animplementation fo NDIR type CO₂ gas sample chamber and measuring hardware for capnograph system in consideration of the time response characteristics", *J. Korean Sensors Soc.*, vol. 10, no. 5, pp. 279-285, 2001.

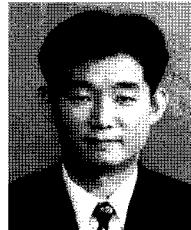
- [10] S-K Kim, Y-H Han, K-T Kim, M-S An, H-J Shin, and Sung Moon, "Application of microbolometer to integrated CO₂ sensor", *Proc. of the International Sensors Conference*, 2004.
- [11] G-J Lee, D-H Oh, J-H Lee, and S-J Kim, "The dia-

phragm structure using the local surface etching for the improvement of sensitivity characteristics", *J. Korean Sensors Soc.*, vol. 13, no. 4, pp. 156-160, 2004.



서 호 원

- 2003년 고려대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 2006년~현재 고려대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정
- 2005년~현재 한국과학기술연구원 나노과학연구본부 나노바이오연구센터
- 주관심분야 : 마이크로센서 및 MEMS



문 성 욱

- 1986년 연세대학교 금속공학과 졸업 (공학사)
- 1988년 연세대학교 대학원 금속공학과 졸업 (공학석사)
- 1994년 연세대학교 대학원 금속공학과 졸업 (공학박사)
- 1995년~1997년 영국 Rutherford연구소 우주연구부 객원연구원
- 1989년~현재 한국과학기술연구원 나노과학연구본부 나노시스템연구단장
- 주관심분야 : 나노바이오센서, M/NEMS, 양자암호시스템



김 태 근

- 1990년 고려대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1993년 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 1997년 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학박사)
- 1997년~1998년 미국 UCSD 연구원
- 1998년~2001년 일본 NEDO 연구원
- 2001년~2002년 삼성종합기술원 전문연구원
- 2002년~2004년 광운대학교 교수
- 2004년~현재 고려대학교 교수
- 주관심분야 : 플래시메모리, 반도체 소자 및 센서응용