

SOI와 트랜치 구조를 이용한 초저소비전력형 미세발열체의 제작과 그 특성

The Fabrication of Micro-heaters with Low Consumption Power Using SOI and Trench Structures and Its Characteristics

정귀상*, 홍석우**, 이원재***, 송재성***

(Gwiy-Sang Chung*, Seok-Woo Hong**, Won-Jae Lee***, Jae-Sung Song***)

Abstract

This paper presents the optimized design, fabrication and thermal characteristics of micro heaters for thermal MEMS (micro electro mechanical system) applications using SOI (Si-on-insulator) and trench structures. The micro-heater is based on a thermal measurement principle and contains for thermal isolation regions a 10 μm thick Si membrane with oxide-filled trenches in the SOI membrane rim. The micro-heater was fabricated with Pt-RTD (resistance thermometer device) on the same substrate by using MgO as medium layer. The thermal characteristics of the micro-heater with the SOI membrane is 280 $^{\circ}\text{C}$ at input power 0.9 W; for the SOI membrane with 10 trenches, it is 580 $^{\circ}\text{C}$ due to reduction of the external thermal loss. Therefore, the micro-heater with trenches in SOI membrane rim provides a powerful and versatile alternative technology for improving the performance of micro-thermal sensors and actuators.

Key Words : Micro-heater, SOI membrane, trench, Pt-RTD, consumption power

1. 서론

최근 Si 미세가공기술을 이용한 소형, 경량, 고속 응답 및 신기능의 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 연구개발에 관심이 집중되고 있다[1]. 특히, 마이크로머시닝기술에 의해서 제작된 열형 마이크

로 센서 (유속/유량, 가스, 진공) 및 액츄에이터 (밸브, 펌프) 제작시 초미소영역의 열적 활성화 및 열적 제어가 용이한 저소비전력, 정확한 온도제어, 저열적 용량, 센서 어레이화가 쉽고, 높은 저항온도계수 (TCR : Temperature Coefficient of Resistance)와 집적화가 용이하며 온도에 따른 저항변화의 선형성이 우수한 미세발열체가 요구된다[2-3].

Si 멤브레인은 양호한 전기적, 기계적 특성때문에 MEMS분야에 널리 사용되고 있다. 그러나, Si의 높은 열전도성과 미세발열체의 열적 영향때문에 외부 회로에 영향을 줄 수 있다. 따라서, 미세발열체 제작시 외부와의 열적 절연을 통한 열손실 감소 및 저전력 소비를 통한 발열특성을 향상시키기 위하여 NON ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$)막막 유전체 멤브레인과 캔틸레바 및 브릿지 등의 공중 부유구조상에 poly-Si, NiFe Alloy, NiCr, Pt/Ti, Pt/Cr, Pt/ Al_2O_3 , Pt/MgO

* : 동서대학교 정보시스템공학부 메카트로닉스전공
(부산광역시 사상구 주례동 산69-1번지
FAX : 051-315-1592
E mail : gschung@dongseo.ac.kr)

** : 삼성종합기술원 MEMS팀

*** : KERI 신소재응용그룹

2000년 12월 4일 접수, 2001년 1월 31일 1차심사완료
2001년 2월 23일 2차심사완료, 2001년 3월 3일 3차심사
완료

등의 박막을 이용한 미세발열체에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-13]. 그러나, NON박막 멤브레인과 공동부유 구조상에 제작된 미세발열체는 발열특성이 우수하지만, 기계적 충격에 약하며 집적화 MEMS분야에 사용하기에는 적합하지 않다. 따라서, 집적화 열형 MEMS를 연구개발하기 위해서는 Si 멤브레인상에 저소비전력형 미세발열체의 제작기술이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 SDB (Si-wafer Direct Bonding) SOI (Si-on-Insulator)기판을 사용하여 SOI 멤브레인 주위로 트렌치를 형성하여 평면 멤브레인위의 트렌치 갯수 및 폭에 따른 열분포 수치해석에 의해 최적의 미세발열체를 설계하였다. 설계된 SOI 멤브레인과 트렌치 구조상에 MgO를 매개층으로 초미소 영역의 온도제어 및 측정이 용이한 백금박막형 미세발열체와 측온저항체 온도센서 (RTD : Resistance Thermometer Device)를 동일기판에 집적화시켜 온도에 따른 TCR 및 저항변화 그리고 인가전력 및 기판구조에 따른 발열특성을 분석·평가하였다.

2. 설계 및 제작

2.1 설계

미세발열체는 SOI 멤브레인과 트렌치 구조의 열적 절연을 2차원 FDM (Finite Difference method) 시뮬레이션을 이용해 설계하였다. 2차원 FDM 시뮬레이션은 FORTRAN으로 프로그래밍하여 멤브레인 위의 미세발열체에서 외부로의 열전도에 의한 열분포를 해석하였다[3]. 본 연구에서는 Si 멤브레인 구조상의 열해석에서 복사과 대류에 의한 열손실값이 열전도에 의한 값에 비해 매우 작으므로 배제하였다. 열의 전도현상은 어떤 물질을 통해서 열이 전달되어 가는 것으로 전도되는 열량 (Q)은 온도의 변화율과 물질의 열전도도 (thermal conductivity : k)가 비례상수로 주어지는 식(1)의 Fourier의 법칙을 사용하여 시뮬레이션하였다.

$$q = -k \cdot \nabla T \quad (1)$$

또한, 시뮬레이션에서 가해진 전원은 발열체에서 일정하게 소비되며, 주변온도는 20℃로 가정하였다. 따라서, 트렌치 갯수 및 폭에 따라 시뮬레이션한 결과 트렌치 갯수, 폭, 간격이 클수록 발열특성이 좋아졌으나, 센서의 크기를 고려하여 트렌치 갯수는 이상적인 미세발열체를 설계하였다.

2.2 제작

본 연구에서는 2000Å의 열산화막과 10 μm의 SDB SOI기판을 사용했으며, 그림 1은 제작공정순서를 도식적으로 나타낸 것이다. 먼저, 깊이 : 10 μm, 폭 : 15 μm 그리고 간격 : 15 μm의 트렌치를 형성하기 위해 사진식각공정을 이용하여 패터닝한 다음, buffer solution (HF:NH₄F:H₂O=15:10:100)으로 산화막을 제거한 후, 이방성 식각(TMAH 20 w%, 80℃) 기술로 트렌치를 형성하였다[14]. 트렌치에 열적 격리와 기계적 특성 향상을 위해 1.0 μm의 열산화막을 성장시킨후 SOG (Spin-on-Glass)를 채웠다. 고온 열처리시 매개층과의 반응을 피할 수 있으며 절연특성이 우수하고, 백금의 부착특성을 향상시킬 뿐만

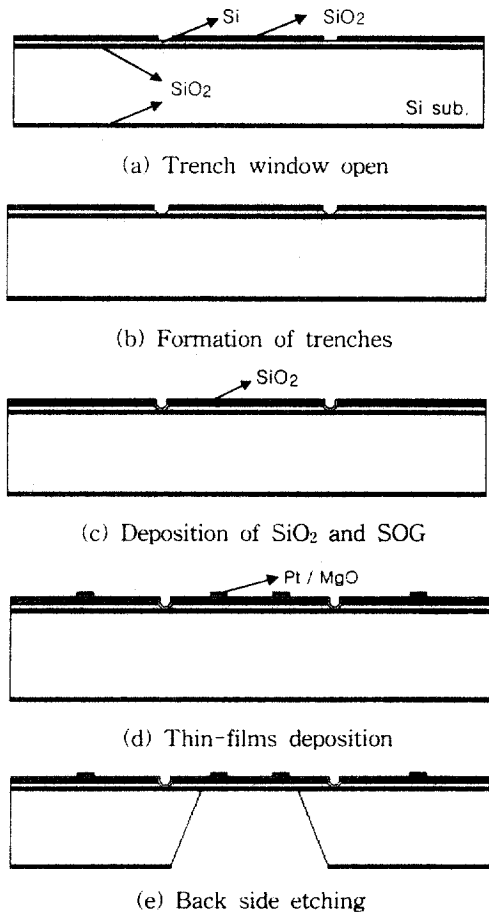


그림 1. SOI 멤브레인상에 트렌치를 갖는 미세발열체의 제작공정 순서도.

Fig. 1. Fabrication process sequence of a micro-heater with trenches on the SOI membrane.

아니라 특히, 마이크로머시닝기술을 위한 미소패턴 형성이 쉬우며 내열성이 우수한 MgO박막을 매개층으로 사용했다[15]. 또한, 화학적·열적 안정성이 높으며 선형적 응답특성이 양호한 백금을 이용하여 $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ 크기의 활성영역을 갖는 백금박막형 미세발열체와 RTD를 동일기판상에 집적화하였다 [16-17]. 백금 타겟은 99.99%의 2"를 사용하여 DC 마그네트론 스퍼터링법으로 증착하였다. 마지막으로 $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ 크기의 SOI 멤브레인을 양면 aligner를 이용하여, 트랜치가 멤브레인의 립부분에 위치하도록 정렬한 후, 이방성 식각기술로 식각하였다.

그림 2는 SOI 멤브레인과 트랜치 구조상에 MgO 박막을 매개층으로 제조된 박막형 Pt-RTD와 미세 발열체가 집적화된 표면사진과 단면도를 도식적으로 나타낸 것이다. 제작된 미세발열체와 Pt-RTD는

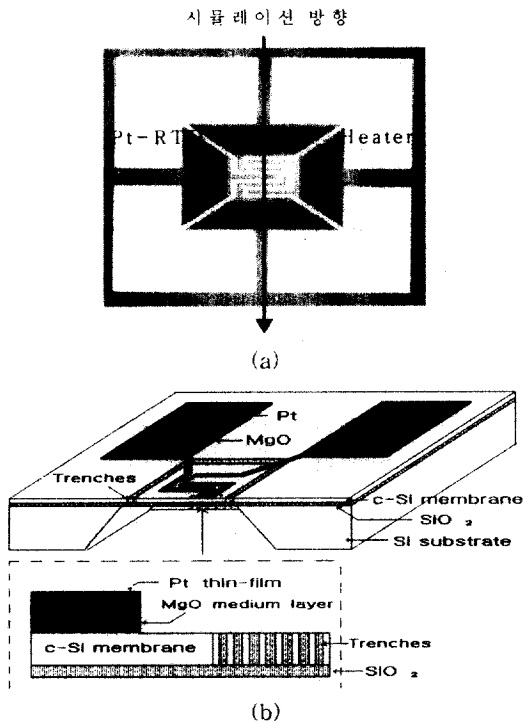


그림 2. SOI 멤브레인과 트랜치 구조상에 제조된 백금박막형 미세발열체와 RTD의 (a) 표면 사진과 (b) 단면도.

Fig. 2. (a) Surface photograph of Pt thin-film type micro-heaters and Pt-RTD fabricated on the SOI membrane and trench structures, and (b) a cross-sectional view.

quartz tube furnace를 이용하여 N₂ 분위기에서 1000°C, 120분 열처리를 행한후[17], 특성을 분석·평가하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 SOI 멤브레인과 트랜치 구조상에 트랜치 갯수에 따른 미세발열체의 온도분포 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 여기서, 트랜치 폭은 15 μm 로 고정했으며 0.6 W의 인가전력하에서 트랜치가 없을 경우, 4개 그리고 10 개에 따른 각각의 시뮬레이션 결과이다. 그림 2의 시뮬레이션 방향으로 멤브레인 중심에서부터 580 μm 까지의 온도분포 시뮬레이션 결과이다. 트랜치 갯수가 많을 수록 멤브레인 위에서 벌크 Si쪽으로 생기는 열전도를 차단하며 열손실이 적어져 미세발열체에서 발생한 열량이 멤브레인상에 일정하게 분포됨을 알 수 있다. 또한, 트랜치가 없을 경우보다 트랜치를 형성함으로써 온도분포가 상당히 향상됨을 알 수 있으며 트랜치 부근에서 급격히 열분포값이 떨어져 트랜치의 열차단이 매우 양호함을 알 수 있다.

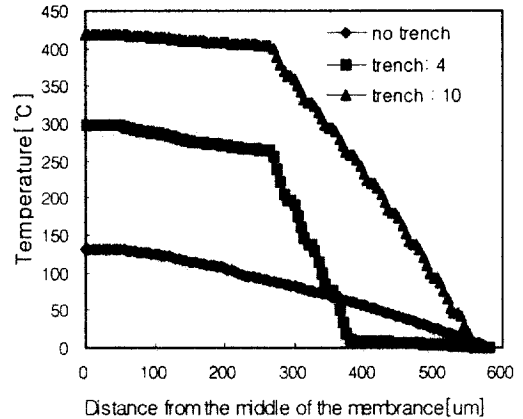


그림 3. SOI 멤브레인위의 트랜치 갯수와 멤브레인의 중앙에서부터 거리에 따른 미세발열체의 FDM 시뮬레이션 온도 분포도.

Fig. 3. FDM simulated temperature distribution of a micro-heater in one direction as a function of the distance from the middle of the membrane according with number of trenches on the SOI membrane.

그림 4는 트랜치 폭에 따른 미세발열체상의 온도 분포를 시뮬레이션하여 나타낸 것이다. 트랜치 갯수

는 4개이며 간격은 15 μm 로 고정하여 폭을 5, 10, 20, 30, 40 μm 으로 나누어 시뮬레이션한 결과이다. 트랜치 폭이 클수록 멤브레인 부분에서 열손실이 작아짐을 알 수 있다.

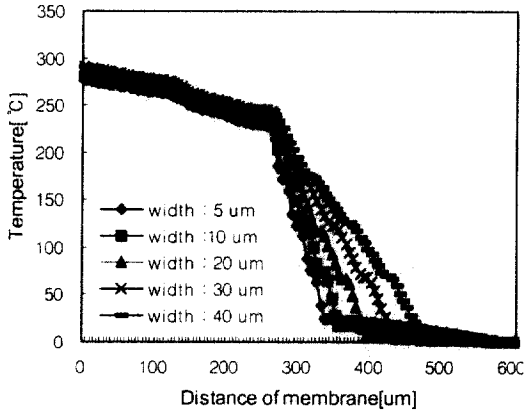


그림 4. SOI 멤브레인위의 트랜치 폭과 멤브레인의 중앙에서부터 거리에 따른 미세발열체의 FDM 시뮬레이션 온도 분포도.

Fig. 4. FDM simulated temperature distribution of a micro-heater in one direction as a function of the distance from the middle of the membrane according with width of trenches on the SOI membrane.

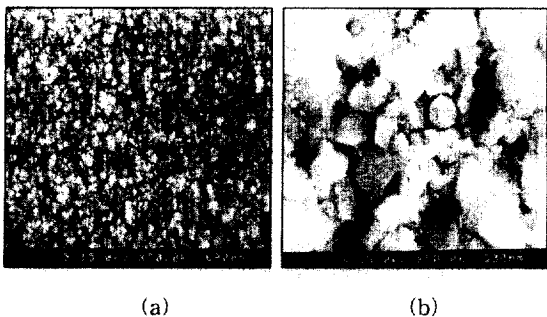


그림 5. MgO 매개층위에 증착된 백금박막의 (a) 열처리하지 않은 것과 (b) 1000°C, 120분간 열처리한 MgO박막의 표면 SEM 사진.

Fig. 5. Surface SEM pictures of Pt thin-films deposited on MgO medium layer (a) without annealing and (b) with annealing temperature of 1000°C for 120 min.

그림 5는 MgO박막위에 증착된 백금박막의 열처리에 따른 표면 SEM 사진이다. 열처리전 표면은 미소패턴 형성에 유리한 균일한 표면특성을 보이고 있으나, 1000°C, 120분 열처리를 행함으로써 결정립이 형성되어 입자들의 경계가 확실해지며 구조적으로 입자들간의 기공의 크기가 작아짐을 알 수 있다. 열처리전 면저항 및 비저항은 각각 0.246 Ω/\square , 24.6 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이며 열처리후 면저항 및 비저항은 각각 0.1288 Ω/\square , 12.88 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 로 측정되므로 백금벌크의 비저항 값인 10.8 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 에 가까워 짐을 알 수 있다[17]. 따라서, 열처리를 행으로써 물리적·전기적으로 백금박막의 특성이 크게 개선됨을 알 수 있다.

그림 6은 MgO박막위에 증착된 백금박막의 열처리에 따른 XRD 회절패턴을 나타낸 것이다. 백금박막의 열처리 전·후 모두 백금 피크만이 $2\theta = 39.6^\circ$ 부근에 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있으며 열처리를 행함으로써 intensity가 더욱 증가하고 잔여피크가 크게 작아짐을 알 수 있다. 따라서, 열처리후에도 백금박막이 MgO박막과 반응이 없으며 고유의 특성을 가짐을 알 수 있다[15].

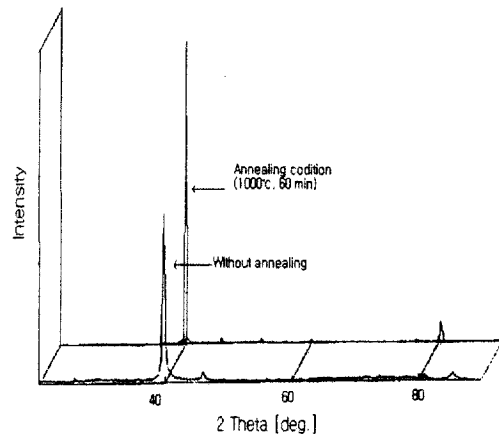
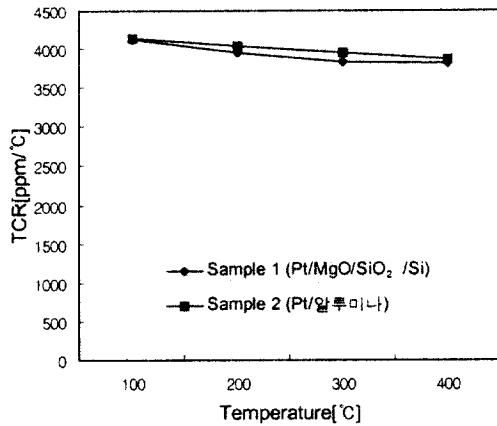


그림 6. MgO 매개층위에 증착된 백금박막의 열처리에 따른 XRD 회절패턴도.

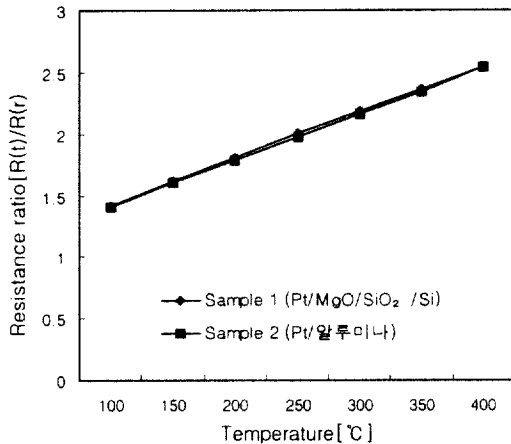
Fig. 6. XRD patterns of Pt thin-films deposited on MgO medium layer according to annealing condition.

그림 7은 제작된 Pt-RTD의 온도변화에 따른 TCR값 및 저항변화율을 각각 나타낸 것이다. 저항 변화율은 질소 분위기인 furnace에서 상온에서부터 400°C까지의 온도범위에서 측정하였다. Sample 1은 Si기판상에 Pt/MgO 이중박막을 Sample 2는 알루미늄

나기판상에 백금을 증착하여 각각 제작한 박막형 Pt-RTD의 특성이다. Si기판상에 MgO박막을 매개층으로 제작된 박막형 Pt-RTD의 특성이 알루미늄기판상에 제작된 박막형 Pt-RTD와 거의 비슷한 값의 TCR값을 얻었다[14]. 그림 7(a)에서 Sample 1 Pt-RTD의 TCR값은 백금 벌크에 가까운 3927 ppm/°C의 평균값을 가지며, TCR값의 표준편차를 분석한 결과 1°C당 0.7 ppm/°C로 매우 선형성이 좋은 특성을 얻었다. 그림 7(b)는 (a)의 TCR값을 저



(a)



(b)

그림 7. 실리콘 및 알루미늄기판위에 각각 제작된 박막형 Pt-RTD의 온도에 따른 (a) TCR값 변화와 (b) 저항변화율.

Fig. 7. Variations of (a) TCR value and (b) the resistance ratio of Pt-RTD fabricated on the Si and Al₂O₃ substrates, respectively.

항변화율로 나타낸 것이다. 온도변화에 따른 저항변화율이 거의 직선에 가깝고 선형성이 양호함을 알 수 있다.

그림 8은 Si기판, Si 멤브레인[13], SOI구조의 멤브레인 그리고 SOI와 트랜치 구조(트랜치 갯수 : 10, 폭 : 15 μm, 간격 : 15 μm)의 멤브레인상에 MgO막을 매개층으로 각각 제작한 백금박막형 미세발열체의 인가전력에 따른 발열특성을 나타낸 것이다. Si기판상에 제작된 미세발열체는 Si의 높은 열전도도에 의해 발열특성이 낮으며, 열손실을 줄이기 위해서 멤브레인을 형성했기때문에 열손실이 크게 줄므로 발열특성이 향상됨을 알 수 있다. SOI 멤브레인에 제작할 경우, Si 벌크쪽으로 일어나는 열전도에 의해 열손실을 줄이므로 또한, 개선되었다. 더구나, SOI 멤브레인과 트랜치 구조상에 제작된 미세발열체는 Si측면으로의 열전도에 의한 열손실을 줄여 외부와의 열적 차단효과로 인가전력 0.9 W에서 580°C 이상의 우수한 발열특성을 나타내었다.

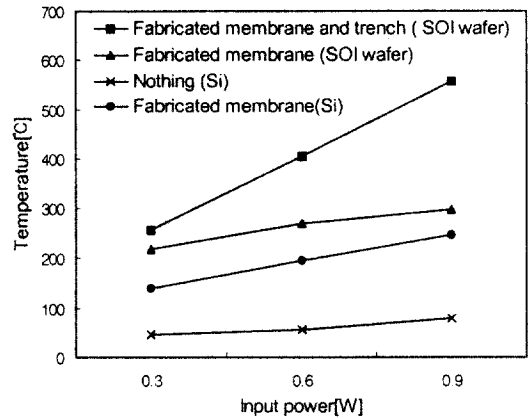


그림 8. 실리콘, 실리콘 멤브레인 그리고 트랜치를 갖는 SOI 멤브레인위에 각각 제조된 미세발열체의 발열특성.

Fig. 8. Thermal characteristics of micro-heaters fabricated on the Si substrate, Si membrane and SOI membrane with trenches, respectively.

4. 결 론

본 논문에서는 SOI 멤브레인과 멤브레인 립부분에 트랜치를 형성된 구조상에 MgO막을 매개층으로 이용한 박막형 Pt-RTD가 집적화된 미세발열체를

설계, 제작 및 측정·분석하였다. SOI 멤브레인 림 부분에 트렌치를 형성함으로 전도에 의한 열손실을 줄이며 외부와의 열차단을 시켜서 발열특성이 크게 향상되었다. 트렌치 갯수가 많아질수록 트렌치 폭 및 간격이 넓을수록 미세발열체의 발열이 멤브레인에 고루게 분포되어 열손실을 줄이며 열차단 효과는 개선되었다. 따라서, 미세발열체 제작시 SOI 멤브레인 림상에 트렌치를 구성함으로 저소비전력으로 동작온도를 정확히 제어가 가능하며 외부회로에 열적 영향을 최소화할 수 있다.

한편, 매개층 MgO막은 발열체 물질인 백금과 고온의 열처리시에도 화학적 반응없이 백금의 부착특성을 개선시켰으며 완벽한 절연특성을 보였다. 집적화된 박막형 Pt-RTD의 TCR값은 평균 3927 ppm/°C의 높은 값을 가지며 선형성이 1°C 당 편차가 0.7 ppm/°C로 우수하며 DIN 및 JIS의 규격을 만족하였다. 또한, 제조된 백금박막형 미세발열체는 외부와의 열적 차단효과로 인가전력 0.9 W에서 580°C 이상의 우수한 발열특성을 나타내었다.

따라서, SOI 멤브레인과 멤브레인 림부분에 트렌치를 형성된 구조상에 MgO막을 매개층으로 제작된 박막형 Pt-RTD와 미세발열체는 집적화 마이크로 열 센서 및 액츄에이터 개발에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] P. M. Sarro, "Sensor Technology Strategy in Silicon", *Sensors & Actuators A*, Vol. 31, pp. 138-143, 1992.
- [2] M. A. Gajda, et. al., "Application of Thermal Si Sensors on Membranes", *Sensors & Actuators A*, Vol. 49, pp. 1-9, 1995.
- [3] L. Qiu, et. al., "A Microsensor with Integrated Heat Sink and Flow Guide for Gas Flow Sensing Application", *Trans. Eurosensors. IX*, Vol. 130-C2, pp. 520-523, 1995.
- [4] M. Parameswaran et. al., "Micromachined Thermal Radiation Emitter from a Commercial CMOS Process", *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 13, No. 2, pp. 57-59 1991.
- [5] E. Yoon et. al., "An Integrated Mass Flow Sensor with One-chip CMOS Interface Circuitry", *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. 39, No. 6, pp. 1376-1386, 1992.
- [6] J. W. Garderer et. al., "Interated Array Sensors for Detection Organic Solvents", *Sensors & Actuators B*, Vol. 26-27, pp. 135-139, 1995.
- [7] U. Dibbern, "A Substrate for Thin-film Gas Sensors in Microelectronic Technology", *Sensors & Actuators B*, Vol. 2, pp. 63-70, 1990.
- [8] V. V. Luchinin, "Microtechnology and Equipment for Manufacturing SiC-based Sensor of Physical Values for Exterm Operation Conditions", *7th Conf. on Sensor Technology*, pp. 30-37, 1996.
- [9] U. Dibbern, "A Substrate for Thin-film Gas Sensor in Microelectronic Technology", *Sensors & Actuators B*, Vol. 2, pp. 63-67, 1990.
- [10] D. Mutschall, et. al., " Basic Micro-module for Chemical Sensor with One-chip Heater Buried Sensor Structure", *Trans. Eurosensors. IX*, Vol. 57-PA6, pp. 256-257, 1995.
- [11] S. H. Lee, et. al., "A Thermal Properties of Microhot Plate and the Characteristics of Pt/Cr Bilayers due to Annealing Temperature", *J. Korean Sensors Society*, Vol. 5, No. 5, pp. 69-77, 1996.
- [12] G. S. Chung, et. al., "The Fabrication of Pt Microheater Using Aluminum Oxide as Medium Layer and It's Characteristics", *Sensors & Materials*, Vol. 10, No. 5, pp. 251-261, 1998.
- [13] G. S. Chung, et. al., "The Fabrication of Pt Thin-film Type Microheater for Micro Thermal Sensors and Its Characteristics", *J. KIEEME*, Vol. 13, No. 6, pp. 509-513, 2000.
- [14] G. S. Chung, et. al., "Anisotropic Etching Characteristics of Silicon in TMAH:IPA:Pyrazine Solutions", *Sensors & Materials*, Vol. 12, No. 3, pp. 133-142, 2000.
- [15] G. S. Chung, et. al., "The Fabrication and Characteristics of RTD's for Micro Thermal Sensors", *J. Korean Sensors Society*, Vol. 9, No. 3, pp. 171-176, 2000.
- [16] G. S. Chung, et. al., "Deposition of Pt Thin-Films for RTD", *J. KIEEME*, Vol. 9, No. 9, pp. 911-917, 1996.
- [17] G. S. Chung, et. al., "Characteristics of Pt Thin-film RTD with Annealing Conditions", *J. Korean Sensors Society*, Vol. 6, No. 2, pp. 81-86, 1997.