

논문 94-3-1-02

## 흐름측정용 실리콘 소자의 제작 및 특성 평가 (II)

朱炳權\*, 高彰基\*\*, 金鐵柱\*\*, 車均鉉\*\*\*, 吳明煥\*

## Fabrication and Characterization of Silicon Devices for Flow Measurement (II)

B. K. Ju, C. G. Ko, C. J. Kim, K. H. Tchah, and M. H. Oh

## 요 약

본 연구에서는, calorimetric 형 흐름센서 소자를 미세가공된 실리콘 구조상에 제작하고 그 특성을 평가하였다. 기체의 흐름을 통한 냉각효과 및 가열효과를 가열저항을 중심으로 양측에 배열된 두개의 온도센서로 측정하였으며 절연박막 다이어프램을 기판으로 사용하여 열적절연효과를 향상시켰다. 제작된 흐름센서는 0~0.25grs/min의 질소가스의 흐름 범위 내에서, 10V의 브릿지 인가전압에 대해 0~378.4mV의 출력전압을 발생하였으며, 센서가 동작 영역에 이르는 시간은 10초 내외로 나타났다.

## Abstract

In this study, we fabricated and characterized a calorimetric-type flow sensing element using a micromachined silicon substrate. The cooling and heating effects resulted from the gas flow were measured by two temperature sensors located at both sides of the heating resistor, and the insulator diaphragm was employed as a substrate in order to improve thermal isolation. The sensor generated 0~378.4mV output signal under 10V bridge-applied voltage when the nitrogen gas was passed on the sensor surface having a mass flow rate of 0~0.25grs/min, and reached to the stable operating condition within 10 seconds.

## I. 서 론

앞서 실리콘 기판상에 니켈 저항체를 구성하여 hot-wire anemometer 형 흐름측정 소자로서의 동작 특성을 평가한 바 있다.<sup>[1]</sup> 이때, 가스의 흐름에 대한 반응특성은 확인할 수 있었으나 30초에서 1분 내외에 이르는 긴 응답시간과 가열저항으로부터 발생한 열의 전달이 유체의 흐름(convection)에 국한되지 않고, 높은 열전도도(=150wK<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>)를 갖는 두꺼운 실리콘 기

판을 통하여 외부로 전도(conduction)됨으로써 센서의 소비전력이 증가하고 감도가 저하됨을 알 수 있었다.<sup>[2,3]</sup>

따라서 본 논문에서는 가열저항의 양단에 두개의 온도센서를 구성하여 가열저항에서 발생한 열이 흐름을 통해 전달되는 정도를 양단간의 온도차로 측정하는 calorimetric 원리를 적용하여 보았다.<sup>[4]</sup> 또한, 이러한 저항체들을 절연층들로 이루어진 절연 박막 다이어프램상에 구성하여 우수한 열적 절연이 이루어지도록 하였다. 이와 같이 함으로서 센서의 전력소모를 줄이고 센서의 감도 및 응답시간을 향상시킬 수 있었다.

\* 正會員 : 韓國科學技術研究院 情報電子研究附  
(Div. Electronics and Information Tech.)

\*\* 서울市立大學校 電子工學科  
(Dept. of Electronics, Seoul City Univ. )

\*\*\* 高麗大學校 電子工學科  
(Dept. of Electronics, Korea Univ.)

<접수일자 : 1993년 12월 6일>

## II. 기판에 따른 열 전달특성의 비교

센서가 위치할 기판의 열전달 특성을 비교하기 위하여 각각 다른 재질의 기판(Si 웨이퍼, SiO<sub>2</sub>막/Si 웨

이퍼, 두꺼운 유리, 얇은 유리)상에 그림 1에 보인 구조와 같이 100nm 두께의 니켈 저항 패턴을 열 증착 및 사진식각 방법에 의해 형성하였다. 이때 패턴 A는 가열저항으로, B는 가열저항의 온도측정용으로, C, D, E는 가열저항을 중심으로 한 온도분포를 측정하기 위해 사용되었다.

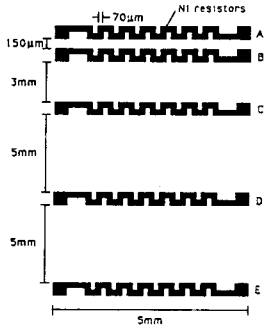


그림 1. 니켈 박막 저항체들의 구조.

Fig. 1. Structure of the Ni thin film resistors.

그림 2는 가열저항 A에 전력을 인가하여 가열저항의 온도를 상온에 비해 12°C만큼 높게 유지한 상태에서 저항 C, D, E들이 위치한 지점의 온도를 앞서 추출한 니켈 저항체의 온도계수를 이용하여 측정하였다.<sup>[15]</sup>

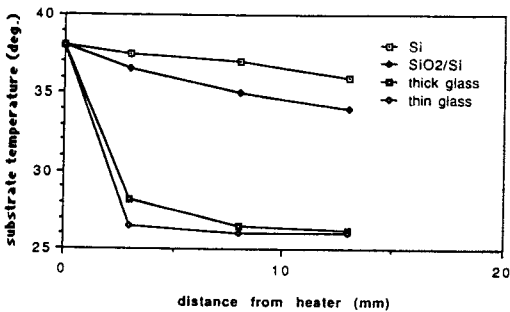


그림 2. 서로 다른 기판들에 있어서 온도분포의 비교.

Fig. 2. Comparison of the temperature distribution in the various substrates.

520µm 두께의 Si 기판을 이용한 경우 가열원으로부터 13mm 떨어진 지점의 온도차가 2°C 이내로 실리콘의 높은 열 전도도로 인해 열 평형 상태가 용이하게 일어남을 알 수 있다. Si 웨이퍼상에 1µm 두께의 습식 열산화막을 성장시켜 기판으로 사용한 경우 SiO<sub>2</sub> 막의 낮은 열전도율(1.4wK<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>)로 인한 버퍼작용으

로 어느 정도의 열적 절연(thermal isolation)이 이루어지나 bulk Si 내로의 열 확산으로 인한 손실이 커 절연 효과는 극히 미미하다. 또한, Corning #7070 유리 (열 전도도: 1wK<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>)를 사용한 경우 열적 절연효과가 매우 우수하게 되며, 특히 0.5mm 두께의 얇은 유리 기판에 있어서는 열 용량(thermal capacity)이 보다 작아져 열의 전도가 무시될 정도로 적다. 따라서, 얇은 두께의 절연 박막으로 이루어진 다이아프램 기판을 사용하면 가열저항에서 발생한 열의 대부분이 유체를 통해 전달되어 기판에 의한 열의 전도손실(conduction loss)을 극소화할 수 있음을 알 수 있다.<sup>[4,6]</sup>

### III. 센서의 제조

본 센서의 앞면에 관한 구조 및 제조 방법의 일부는 기 발표된 바 있다.<sup>[1]</sup> 즉, 두께 520µm의 n형 (100) 웨이퍼상에 300nm의 열 산화막, 400nm의 CVD 질화막, 그리고 300nm의 CVD 산화막을 연속적으로 성장 및 증착시켜 다이아프램용 절연 박막층을 형성하였다. 다음으로 100nm 두께의 니켈 박막을 열 증착한 뒤 저항체 부분의 폭이 10µm가 되도록 패터닝하였으며, 마지막 단계로 두번째 사진식각을 통해 저항체로 사용할 부분을 제외하고 Au plating을 행하였다. 이상의 앞면 공정이 완료된 칩의 모양을 그림 3에 나타내었다.

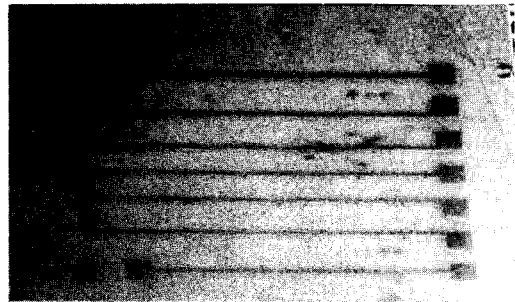
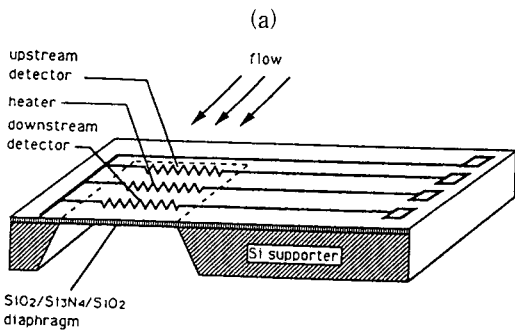
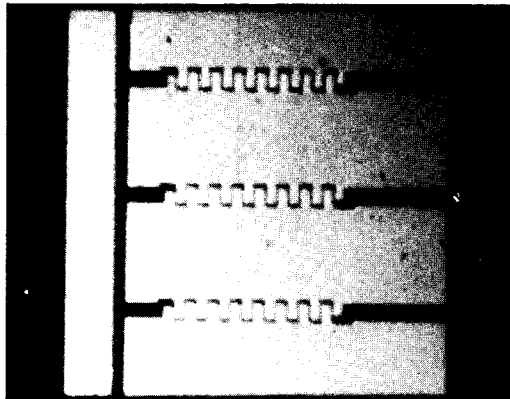


그림 3. 제작된 센서의 앞면 사진 (×20)

Fig. 3. Front-side photograph of the fabricated sensor (×20).

다음으로 웨이퍼의 뒷면에 양면 정합기를 사용하여 정사각형의 산화막층을 형성한 뒤 115°C의 F-etch 용액<sup>[7]</sup>으로 실리콘의 깊은 식각을 행하였다. 회로의 앞면은 실리콘 고무와 유리판을 이용하여 밀봉하였으며 실리콘의 두께가 10µm 정도에 이르렀을 때 용액의

온도를 100°C로 낮추고 stirring bar의 회전을 현저히 줄여 다이아프램에 가해질 수 있는 물리적 충격을 완화하였다. SiO<sub>2</sub> 막의 경우 F-etch 용액 내에서의 식각율이 2 Å/min 정도로<sup>[8]</sup> 외부로부터의 두께 조절이 불필요하나 식각깊이의 추정을 위해 투과광에 의한 방법을 적용하였다.<sup>[9,10]</sup> 그림 4(a)는 제작된 소자에 텅스텐 램프로부터 광을 투과시켜 절연박막 다이아프램상에 올려진 저항체를 관찰한 사진이며 (b)는 소자의 단면을 도시한 것이다.



(b)

그림 4. (a) 박막 다이아프램부의 투과광 패턴 (×50)  
(b) 소자의 단면도

Fig. 4. (a) Transmitted-light pattern through the thin film diaphragm (×50).

(b) Cross sectional view of the device.

#### IV. 동작특성의 측정 및 토의

제작된 센서의 동작 원리를 그림 4(b)를 이용하여 설명하면 다음과 같다. 즉, 그림 4(b)의 가열저항에 일정한 전력을 인가하여 열이 발생하도록 하면 흐름이 없는 상태에서는 가열저항을 중심으로 양단간의 온도

분포는 대칭을 이룬다. 다음으로, 저항체들의 길이에 대한 수직 방향으로 유체를 흐르도록 하면 가열저항에서 발생된 열이 유체로 전달되어 하류측으로 운반되는 효과(heat transfer and transport effect)와 기판을 통한 전도효과(heat conduction effect)가 동시에 일어나게 된다. 이때 흐름상단에 위치한 저항체(upstream detector : UD)는 두 효과가 상쇄되어 냉각되고, 하단의 저항체(downstream detector : DD)는 두 효과가 중첩되어 가열되므로 온도 분포가 비대칭적으로 되어 두 지점에서의 온도차를 측정함으로써 흐름의 양과 속도를 알 수 있다. 이는 calorimetric 형 흐름계(flow meter)의 기본 원리이며,<sup>[11]</sup> 이때, 본 실험에서와 같이 열전도도가 매우 적고 두께가 얇은 기판을 사용할 경우 그림 2로부터 알 수 있듯이 가열저항으로부터 온도센서로의 열 전달은 주위의 분위기를 통한 대류에 의해 일어나며 기판을 통한 전도는 무시될 수 있을 정도로 적다.<sup>[4,6]</sup>

temperature distribution near surface

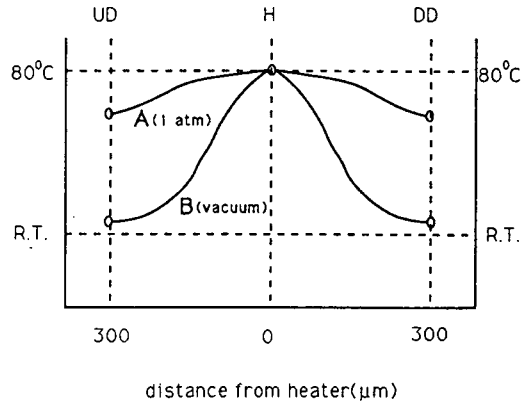


그림 5. 서로 다른 기압하에서 센서표면의 온도분포  
Fig. 5. Temperature distribution of the sensor surface under different atmospheres.

예를 들어 그림 5는 가열저항의 온도를 80°C로 유지한 상태에서 UD와 DD의 온도를 측정하는 것이다. 실선 A로 연결된 측정치는 센서를 상압하에 놓았을 경우로 가열저항으로부터 어느 정도의 열이 전달되고 있음을 알 수 있으며 실선 B의 경우 센서가  $1 \times 10^{-5}$  torr의 진공 내에 위치한 경우로 공기의 대류를 통한 열 전달이 없을 때 기판을 통한 열 전달 정도는 극히 미미함을 알 수 있다. 이때 세 점간을 잇는 실선은 센서 표면과 분위기간에 존재하는 경계층의 열 분포를 추

정한 것이다.<sup>[11]</sup> 이와 같이 열전달이 대류에 의해서만 일어나도록 함으로써 기체의 입자수에 따른 열 전달의 정도를 측정하여 진공도를 감지하는 실리콘 센서도 기 발표된 바 있다.<sup>[12]</sup>

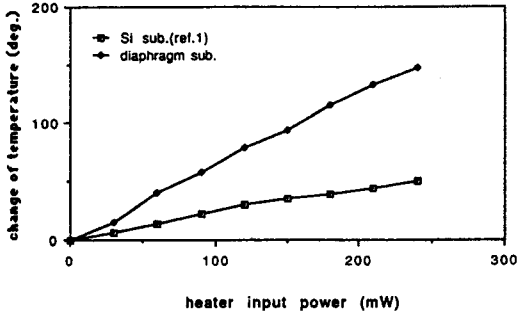


그림 6. 가열체 인가전력과 온도변화간의 관계  
Fig. 6. Relationship between heater input power and temperature change.

가열저항에 인가되는 전력과 온도변화와의 관계를 앞서 발표된<sup>[1]</sup> bulk Si 기판을 이용한 실험 결과와 비교하여 그림 6에 나타내었다. 본 실험에서와 같이 절연 박막 다이아프램 기판을 사용하였을 경우 100nm의 열 산화막이 성장된 520 $\mu$ m 두께의 실리콘 기판을 사용한 경우에 비해 소모전력이 1/3 정도로 감소함을 확인할 수 있는데 이는 전술하였듯이 기판으로의 열 손실이 상대적으로 적기 때문이다.

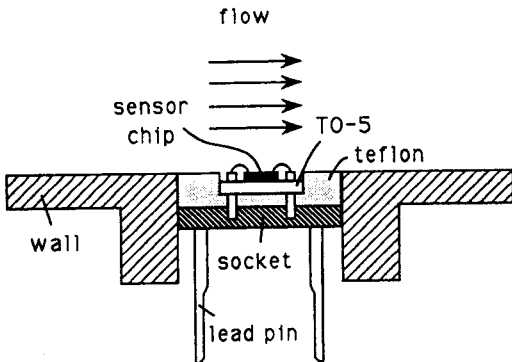


그림 7. 시편 홀더의 모양  
Fig. 7. Illustration of the sample holder.

제작된 센서는 그림 7에 도시한 바와 같이 홀더에 장착되어 유체의 흐름에 대한 출력특성이 얻어졌다. 흐름특성의 측정장치는 앞서 기술한 바와 같이 질소 실린더, MFC, HP 컴퓨터, Keithley 전기적 입-출력 장치, plotter등으로 연결되어 있다.<sup>[1,5]</sup>

그림 8은 가열저항의 온도를 145 $^{\circ}$ C로 유지한 상태에서 질소가스의 흐름에 대한 UD와 DD의 온도 및 온도차를 측정된 것이다. 일반적으로 센서소자의 면적이 일정할 때, 유체의 속도가 증가하게 되면 유체가 소자 표면을 통과하는 시간(transit time)이 감소하고, 이로 인해 열확산 시간(thermal diffusion time)을 결정하는 temperature penetration depth(TPD)가 일정치로 제한되게 된다.<sup>[4]</sup>

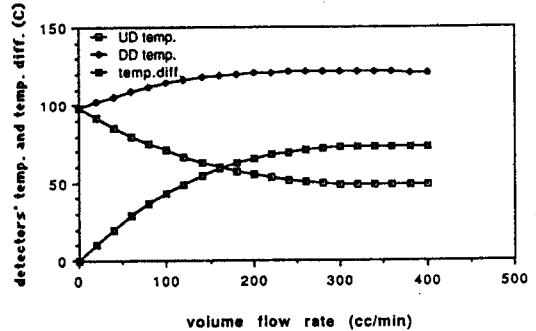


그림 8. 질소가스의 흐름에 대한 센서의 온도 변화.  
Fig. 8. Temperature changes of the detectors in a N<sub>2</sub> gas fluid.

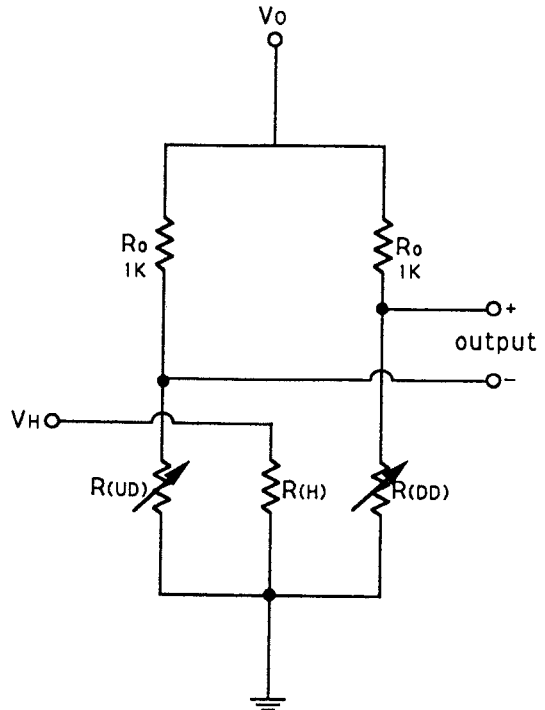


그림 9. 출력신호를 얻기 위한 회로  
Fig. 9. Electronic circuit for obtaining output signal.

따라서 임의의 TPD 값을 초과하는 열확산은 유체의 흐름에 의해 제한을 받게 되어 열 경계층(thermal boundary layer)을 형성하며, 이로 인해 일정치 이상으로 유체의 속도가 증가할 경우 온도센서가 위치한 지점에서의 냉각 및 가열효과가 포화된다. 그림 8로부터 알 수 있듯이 본 소자의 경우 이러한 포화현상은 질소가스에 대해 약 200cc/min 정도의 volume flow rate에서 일어나기 시작함을 알 수 있다.

다음으로, 그림 9에 보인 바와 같이 칩의 외부에 두 개의 저항  $R_0$ 를 UD 및 DD와 브릿지 구조로 연결하여 흐름에 대한 전기적인 신호를 추출하여 보았다. 그림 10은 이의 출력특성으로 브릿지 인가전압  $V_0$ 를 10V로 하였을 때, mass flow rate로 환산된 질소가스의 흐름에 대한 출력전압을 나타낸 것이다. 비교적 선형성이 유지되는 범위의 0~0.25grs/min의 질소 흐름에 대해 출력전압은 0~378.4mV 까지 변화하고 있다.

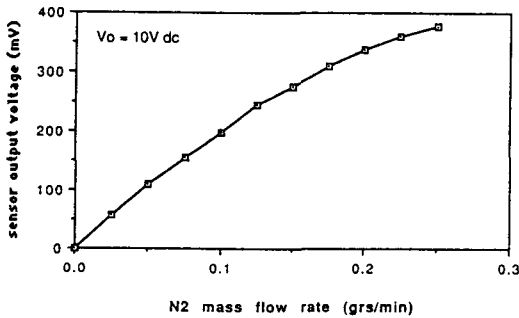


그림 10. 흐름과 센서 출력전압간의 관계  
 Fig. 10. Relationship between flow and sensor output voltage.

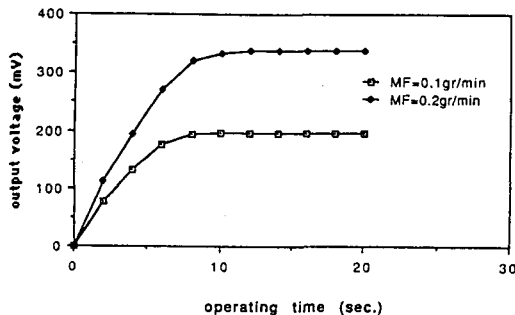


그림 11. 제작된 센서의 응답 특성.  
 Fig. 11. Response characteristic of the fabricated sensor.

그림 11은 일정한 양의 질소가스가 흐르도록 한 후  $t=0$ 초에서 소자를 ON시킨 후 시간의 경과에 따른 소

자의 출력 특성을 측정된 결과로 동작특성이 안정화 될 때까지 걸리는 시간은 흐름의 양에 관계없이 약 10초 정도로 평가되었다.

V. 결 론

본 논문에서는 절연 박막 다이아프램상에 니켈저항체들을 제작하여 calorimetric 형 흐름센서 소자를 구성하고 이의 동작특성을 측정, 분석하여 보았다. 실리콘의 가공에 의해 센서기관의 열적 절연을 향상시킬 경우, 칩으로 전도되는 열 손실이 감소하여 가열저항에 인가되는 전력소모를 줄일 수 있음과 동시에 감도를 높일 수 있고, 적은 열 용량으로 인해 응답시간을 단축시킬 수 있음을 알 수 있었다. 나아가서는, 각각의 저항체들을 절연박막 브릿지상에 구성함으로써 보다 완전한 열적 절연을 얻을 수 있으며, 또한 기관을 통한 열의 전달이 무시될 수 있으므로 독립적인 온도센서를 함께 구성하는 것도 가능하다. 또한 부식성 가스 내에서 사용하기 위해 wire bonding 용 gold pad 를 제외한 영역을 보호막으로 도포하는 것도 바람직하다. 본 센서의 동작영역은 비교적 낮은 범위에 국한되어 있으나 소자 규모와의 적당한 trade-off 로 동작영역을 확장할 수 있으며 비직선성이나 온도보상은 외부 회로기술로 해결할 수 있다.

감사의 글

소자제작에 도움을 주신 KIST 정보전자연구부의 이명복, 한일기씨께 감사드립니다.

참 고 문 헌

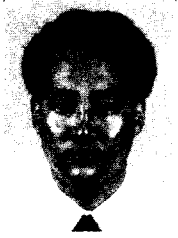
[1] 이명복, 주병권, 이정일, 김형근, 오명환, 강광남, " 흐름측정용 실리콘 소자 의 제작 및 특성평가 (I)," 한국재료학회지, 제3권, 제1호, pp. 28-32, 1992.

[2] N. Swart, A. Nathan, M. Shams, and M. Parameswaran, "Numerical Optimisation of Flow-Rate Microsensors Using Circuit Simulation Tools," Transducers'91, pp. 26-29, 1991.

[3] B. W. van Oudheusden and A. W. van Herwaarden, "High-sensitivity 2-D Flow Sensor with an Etched Thermal Isolation

- Structure," *Sensors and Actuators*, vol. A21-A23, pp. 425-430, 1990.
- [4] R. G. Johnson and R. E. Higashi, "A Highly Sensitive Silicon Chip Microtransducer for Air Flow and Differential Pressure Sensing Applications," *Sensors and Actuators*, vol. 11, pp. 63-72, 1987.
- [5] 과학기술처 연구보고서, 집적화 마이크로 센서 기술 개발, N6572(2)-3948-1, pp. 55-68, 1990.
- [6] N. Tanaka, A. Jinda, J. Tanaka, Y. Inami, and M. Hijikigawa, "Micro-chip Flow Sensors for Measurement of Flow Velocity and Direction," *Transducers'87*, pp. 352-355, 1987.
- [7] A. Reisman, M. Berkenblit, S. A. chan, F. B. Kaufman and D. C. Green, "The Controlled Etching of Silicon in Catalyzed Ethylene-Pyrocatechol-Water Solutions," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 126, no. 8, pp. 1406-1415, 1979.
- [8] K. E. Petersen, "Silicon as a Mechanical Material," *Proc. IEEE*, vol. 70, no. 5, pp. 420-457, 1982.
- [9] 특허, "실리콘막의 두께 조절방법 및 장치," 특허 출원번호 제16394호, 1992.
- [10] Byeong Kwon Ju, Byeoung Ju Ha, Chul Ju Kim, Myung Hwan Oh and Kyun Hyon Tchah, "Microscopy Studies for the Deep-Anisotropic Etching of (100) Si Wafers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 31, part 1, no. 11, pp. 3489-3494, 1992.
- [11] J. Scholz and T. Ricolfi, *Thermal Sensors*, VCH, Weinheim, Germany, pp. 323-343, 1990.
- [12] A. W. van Herwaarden and P. M. Sarro, "Integrated Vacuum Sensor," *Sensors and Actuators*, vol. 8, pp. 187-196, 1985.

著 者 紹 介



朱 炳 權

1962년생. 1986년 서울시립대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 1988년 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사). 1988년 ~현재 한국과학기술연구원 정보전자부 연구원. 1991년 ~현재 고

려대학교 전자공학과 박사과정. 주관심분야 : 마이크로머시닝, 실리콘 센서, 전계방출소자.



高 彰 基

1970년생. 1994년 2월 서울시립대학교 전자공학과 졸업예정. 1994년 2월 서울시립대학교 대학원 전자공학과 입학예정. 현재 한국과학기술연구원 학생 연구원. 주관심 분야 : 마이크로머시닝, 실

리콘 센서, 전계방출소자.



金 鐵 柱

1947년생

1973년 2월 한양대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 1981년 3월 일본 동해대학 대학원 졸업 (공학석사). 1984년 3월 일본 동해대학 대학원 졸업 (공학박사). 1984년

3월 - 현재 서울시립대학교 전자공학과 교수. 주관심 분야 : 반도체 재료 및 소자 (SOI, TFT, microstructure, 3차원 집적회로 등).

車 均 鉉

1939년생. 1965년 2월 서울대학교 졸업 (공학사). 1967년 미국 일리노이대학교 대학원 졸업 (공학석사). 1976년 서울대학교 대학원 졸업 (공학박사). 1978년 ~ 현재 고려대학교 전자공학과 교수. 주관심분야 반도체 소자, CAD 및 통신시스템.



吳 明 煥

1943년생. 1965년 서울대학교 전기공학과 졸업 (공학사). 1972년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사). 1979년 프랑스 Paul Sabatier Univ. 전기공학과 졸업 (공학박사). 현재 한국과학

기술연구원 정보전자부 책임연구원. 당 학회 학술이사. 주관심 분야 : 마이크로머시닝, 실리콘 센서, 평판 표시장치.