

논문 95-4-1-05

SDB 웨이퍼를 이용한 절대압 실리콘 압력센서의 제조

이창준*, 강신원**, 최시영*

Fabrication of absolute silicon pressure sensor using SDB wafer

Chang-Jun Lee*, Shin-Won Kang**, and Sie-Young Choi*

요 약

SDB웨이퍼를 이용하여 절대압을 감지할 수 있는 압저항형 실리콘 다이아프램 압력센서를 제조하였다. 제조된 센서는 브릿지 형태로 연결된 4개의 압저항과 인가되는 압력에 대한 기계적인 증폭기 역할을 할 수 있는 다이아프램으로 구성되어 있다. 다이아프램 공극(cavity)을 낮은 진공상태로 만들기 위해 실리콘 다이아프램과 Pyrex 7740유리를 0.02mmHg, 400℃에서 정전 접합하였다. 제조된 센서의 감도와 오프셋 전압은 각각 $30.4\mu\text{V/VmmHg}$, 30.6mV 였다.

Abstract

The absolute silicon pressure sensors are fabricated using SDB(silicon direct bonded) wafer. The fabricated pressure sensors consist of four bridge type piezoresistances and a diaphragm which plays a role of mechanic amplifier to supplying pressure. In order to make the diaphragm cavity in low vacuum condition, we anodically bonded Si diaphragm with pyrex 7740 glass in 0.02mmHg, at 400℃. The sensitivity and offset voltage of the fabricated sensors were $30.4\mu\text{V/VmmHg}$ and 30.6mV , respectively.

I. 서 론

반도체 압력센서의 재료로는 게이지 팩터가 크고, 히스테리시스가 적으며 집적회로 제조 공정을 적용할 수 있는 단결정 실리콘이 널리 활용되고 있다.^[1] 압력센서 가운데 실리콘 다이아프램형 압력센서는 외부 압력에 의한 다이아프램의 휨 정도가 달라짐을 이용하는 정전 용량형^[2]과 다이아프램 위에 위치한 저항체가 응력에 따라 저항값이 바뀌게 됨을 이용하는 압저항형^[3]으로 크게 구분된다.

실리콘을 이용한 압저항형 압력센서는 가해지는 응력에 의해 다이아프램의 변형이 생기게 되고, 이 변형에 의해 그 위에 형성시킨 압저항체의 저항 변화로 압력을 감지하는 것이 기본 원리로서 이에 요구되는 정밀한 두께 제어 및 미세 구조물 제작 기술이 중요한 기초 기술로서 부각되어 왔다.^[4] 센서의 특성 및 양산 수율을 크게 하기 위해선 센서특성에 가장 큰 영향을 미치는 미세 가공 공정이 아주 중요하다. 따라서 웨이퍼 전체에 걸친 균일한 두께의 다이아프램 제조가 필요하다.

다이아프램의 두께를 조절하는 방법에는 실리콘의 식각율을 이용하는 방법^[5], 고농도 붕소층을 이용하는 방법^[6]등이 있다. 이중 고농도 붕소층을 이용하는 방법은 $25\mu\text{m}$ 두께 이상의 다이아프램을 제조할 때는 접합 깊이가 너무 깊어 제조에 어려움이 있고, 또한 고농도로 도핑된 면위에 소자를 형성시키기가 곤란하다는 단

* 경북대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics, Kyungpook Nat'l Univ.)

** 경북대학교 센서기술 연구소
(STRC, Kyungpook Nat'l Univ.)
<접수일자 : 1994년 12월 30일>

점이 있다.^[7,8] 이 방법 외에 p-형 웨이퍼 위에 n-에피택셜층을 원하는 두께만큼 성장시켜 p-n접합을 형성한 후 전압을 가한 상태에서 이방성 식각을 하여 n-에피택셜층이 식각용액과 만날 때 n-에피택셜층 표면에 생긴 산화막으로 인하여 식각정지를 얻어 다이아프램을 제조하는 방법이 있으나^[9], 에칭용 지그(jig)를 만들기가 어렵고 웨이퍼의 전체에 전위가 균일하게 가해지기가 어려운점 등으로 인하여 재현성 있고 균일한 두께의 다이아프램을 만들기가 어렵다.^[10] 한편 산화막이나 질화막은 이방성 식각액에 가장 효율적인 식각증지 재료이다. 이런 점에서 볼 때 SDB(silicon direct bonding)기술에 의해 형성된 SOI구조의 실리콘 산화절연막을 식각증지층으로 이용하면 정확한 두께 제어가 가능하며, 대단히 평탄하면서도 균일한 다이아프램을 동시에 대량 제작이 가능하므로 다른 방법에 비해 아주 효율적인 다이아프램 두께 제어 방법이라고 할 수 있다.^[7,11-16]

본 연구에서는 SDB기술로 제조된 웨이퍼를 이용하여 자동차 엔진의 연비를 제어하는데 사용되는 100~760mmHg범위의 절대압 압력센서를 실용화하고자 제조공정을 간단하고 생산성을 높이기 위한 공정개발 및 소자를 제조하여 그 특성을 조사하였다.

II. 소자설계 및 제작

그림 1은 설계된 압력센서의 레이아웃을 나타낸 것이다. 소자의 면적은 $3.0 \times 3.0 \text{ mm}^2$ 이고, 다이아프램의 면적은 $1.4 \times 1.4 \text{ mm}^2$ 이다. 이온 주입에 의해 형성되는 저항체는 압력에 따라 저항값이 변하는 4개의 브릿지 저항과 2개의 보상용 저항으로 구성되어 있다. 4개의 브릿지 저항의 위치는 각 저항이 받는 응력이 최대가 되도록 하기 위해 다이아프램 변의 중앙에 놓이게 하였다. 다이아프램 식각장의 크기는 에칭 결과 형성되는 다이아프램의 변이 압저항체의 가장자리 부분과 일치되도록 하여 최대의 응력이 압저항체에 가해져 센서의 감도가 최대가 될 수 있게 설계하였다. 이때 각 압저항체의 폭은 $20 \mu\text{m}$, 응력에 반응할 수 있는 압저항체의 길이는 $100 \mu\text{m}$ 로 설계하였다. 다이아프램 변에 수직인 압저항체는 다이아프램 변과 일치되도록 하였고 수평인 압저항체는 마스크 정렬 문제를 고려하여 다이아프램 변에서 $40 \mu\text{m}$ 떨어지게 설계하였다.

또한 소자 양산 제조 공정을 간단히 하기 위하여

마스크 수를 줄였다. 압력센서 제조에 사용된 마스크는 총 4장으로, 저항 형성용 마스크, 저항과 전극과의 연결을 위한 콘택 창용 마스크, 금속전극 형성용 마스크, 그리고 다이아프램 형성을 위한 뒷면 실리콘 식각용 마스크로 이루어져 있다. 모든 마스크들은 스텝-리피터(step & repeater)를 이용하여 4인치 웨이퍼 크기로 제작하였다.

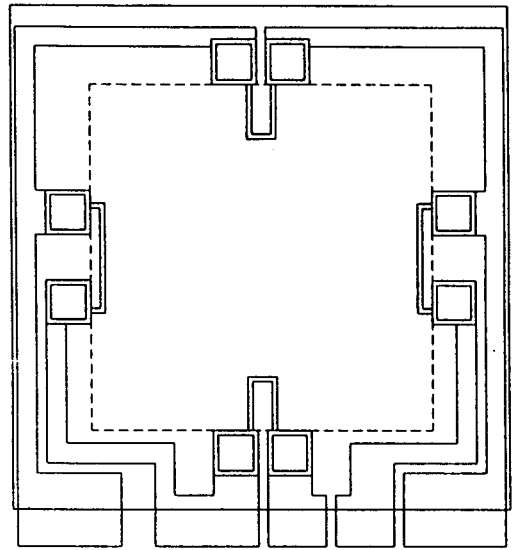


그림 1. 압력센서의 레이아웃

Fig. 1. Layout of pressure sensor.

본 실험에서 압력센서를 제조하기 위하여 사용된 기판은 비저항이 $10 \Omega\text{-cm}$ 인 (100) n형 실리콘 웨이퍼와 실리콘 식각공정시 마스크 역할로 사용되는 $1 \mu\text{m}$ 두께의 산화막을 형성한 (100) n형 웨이퍼를 SDB기술로 접합시킨 웨이퍼로서 앞면 및 뒷면 두께가 각각 $20 \mu\text{m}/450 \mu\text{m}$ 인 SDB 웨이퍼를 사용하였다.

웨이퍼를 표준 세척 공정에 따라 세척한 뒤 1150°C 에서 30분 동안 습식산화시켜 $0.75 \mu\text{m}$ 두께의 산화막을 성장시켰다. 본 실험에서는 센서의 다이아프램을 KOH 이방성 식각을 하여 형성시켰는데, 식각시 식각용액에 대한 보호막으로는 KOH수용액에 대한 식각율이 아주 미소한 실리콘 질화막을 이용하였다. $1.2 \text{ k}\Omega$ 의 저항체를 형성하기 위해 붕소 원자를 dose양 $3 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ 으로 100 keV의 가속 에너지로 이온 주입을 하였다.

뒷면의 다이아프램을 제조하기 위해 순수(D.I. water) 1000 ml 에 KOH 250g을 용해시킨 수용액으로

85°C에서 이방성 식각을 하였다. 그 결과 식각율은 1.89 $\mu\text{m}/\text{min}$ 였다. 앞면의 콘택부분의 산화막을 식각시킨 후 저항가열법으로 0.3 μm 두께의 Al을 진공증착시켰으며 질소 분위기에서 450°C로 30분간 열처리하였다. 그런 뒤 센서의 다이아프램 부분과 유리를 0.02mmHg의 압력 하에서 정전 접합시켜 절대압 실리콘 압력센서를 제조하였다. 앞에서 언급한 센서제조 공정순서도 및 공정단면도를 그림 2에 나타내었다.

이와 같이 SDB 웨이퍼를 이용하므로 4인치 웨이퍼의 전면에 걸쳐서 다이아프램 두께가 20 μm 인 압력센서를 균일하고 정확하게 제작할 수 있었다.⁽¹⁶⁾ 또한 소자의 양품율(yield)이 90% 이상 되었다. 제작된 소자 칩(chip)을 그림과 같이 TO-5 헤더(header)에 패키징(package)하여 압력과 온도에 대한 센서의 특성을 조사하였다.

III. 결과 및 고찰

그림 4은 소자의 압력 측정에 사용된 증폭 회로를 나타낸 것이다. 이 그림에서 센서의 브릿지 저항체 R_{11} 과 R_{12} 의 저항변화와 R_{21} 과 R_{22} 의 저항변화가 연산증폭기 2과 1에 의한 전압 변동으로 V_{L2} 와 V_{T2} 의 출력전압으로 각각 나타난다. 이 전압 변동들이 연산증폭기 3에 의하여 합산되어 증폭된다. 따라서 센서의 브릿지 저항체의 저항변화가 2단 연산증폭되어 출력전압 V_O 로 나타나게 된다. 이때 2단 연산증폭기의 총증폭도는 약 50 배 정도였다.

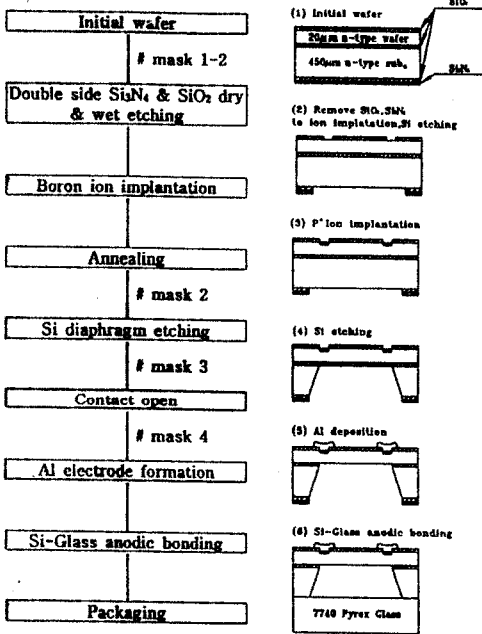


그림 2. 센서제조 공정순서도 및 공정 단면도
Fig. 2. Fabrication process sequence and cross section view of pressure sensor.

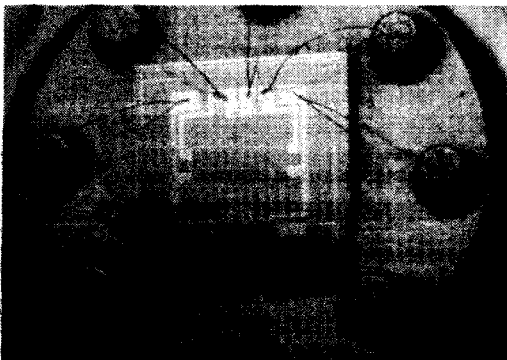


그림 3. 패키징된 센서의 사진
Fig. 3. Packaged sensor photography.

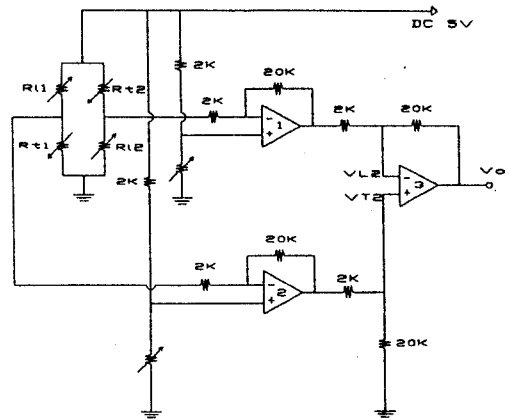


그림 4. 압력 측정용 증폭 회로도
Fig. 4. Amplifier circuit for pressure measurement.

그림 5는 제조된 압력센서의 압력을 100mmHg ~ 대기압 까지의 절대압 변화에 대한 브릿지 저항체의 저항 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 저항 변화는 4개의 브릿지 저항체 모두가 거의 100mmHg당 약 4 Ω 씩 선형적으로 저항 값이 바뀌는 것을 알 수 있었다.

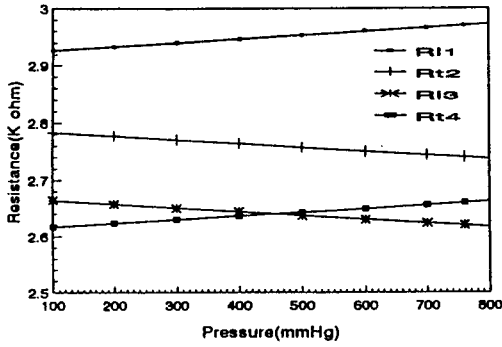


그림 5. 압력에 따른 브릿지 저항 변화
Fig. 5. Bridge resistances as a function of pressures.

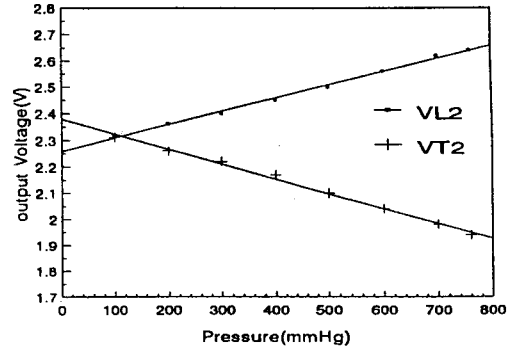


그림 7. 압력 변화에 따른 VL2 과 VT2의 전압 변화
Fig. 7. Voltage variation of VL2 and VT2 as a function of pressure.

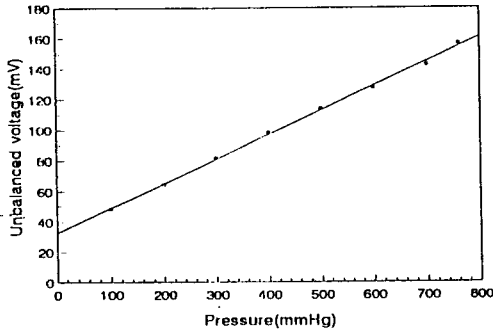


그림 6. 압력에 따른 브릿지 저항체의 비평형 전압 (Vin)
Fig. 6. Unbalanced voltage(Vin) of bridge resistors as a function of pressure.

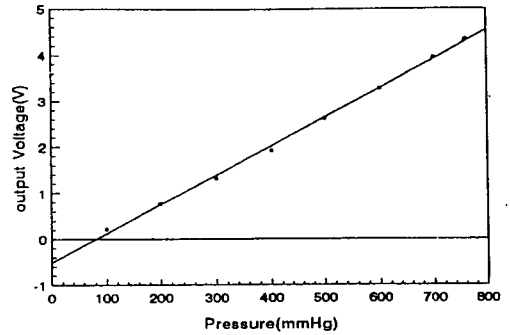


그림 8. 증폭 회로 출력 전압의 압력에 따른 변화
Fig. 8. Output voltage of amplifier circuit as a function of pressure.

그림 6은 브릿지 저항체에 직류 5V전압을 인가하고 압력변화에 따른 브릿지 저항체의 비평형 전압(Vin) 변화를 나타낸 것으로서 제작된 브릿지 저항체의 압력 감도는 $30.4 \mu\text{V}/\text{VmmHg}$, 오프셋 전압은 30.6mV 이었다.

그림 7은 압력변화에 따른 브릿지 저항체의 비평형 전압 변화가 연산증폭기 1과 2에 의해 증폭된 출력전압 VL2와 VT2의 전압 변동을 측정할 것이다. 측정 결과, 연산증폭기의 출력전압인 VL2와 VT2의 전압감도는 각각 $484.8 \mu\text{V}/\text{mmHg}$, $-560.6 \mu\text{V}/\text{mmHg}$ 였다. 이러한 전압감도의 차이는 압력에 따른 R12와 R12의 변화보다 R11과 R11의 변화가 크기 때문이다.

그림 8은 압력변화에 대한 절대압 실리콘 압력센서의 브릿지 비평형 전압이 최종 증폭단을 통해서

나온 출력 전압을 나타낸 것이다. 센서에 가해지는 압력변화가 100mmHg~760mmHg변화에 대하여 센서의 출력 전압변화는 0.22V 에서 4.33V까지 선형적으로 변화하였다. 이는 자동차 엔진내의 공연비 조절용으로 사용되는 압력센서로 사용할 수 있음을 의미한다.⁽¹⁷⁾

그림 9는 제조한 센서에 급격한 압력 변화를 가하였을때의 증폭기의 출력 변화를 오실로스코프로 관찰한 것이다. 센서에 가해지는 압력은 0.4mmHg에서 대기압 상태로 순간적으로 바꾸었다. 이때 나타나는 센서의 출력 전압 변동의 응답시간은 약 50ms로 나타났다.

그림 10은 -30℃ 에서 150℃ 까지의 제조한 센서에 대한 오프셋 드리프트를 나타낸 것이다. 측정 결과로 전 온도 범위에서 최대 4.9mV의 오프셋 드리프트가 발생하였다. 이러한 문제점은 각브릿지 저항의 값들

이 모두 같지 않으므로 발생하는 것으로서 온도변화에 대한 저항값의 변화가 매우 적으므로 무시할 수 있다.

그림 11은 같은 온도 범위에서 측정된 센서의 출력감도 변화를 나타낸 것이다. 여기에서 온도가 증가함에 따라서 감도가 급격히 감소하였다. 이것은 온도가 증가함에 따라 다이어프램 공극안에 존재하는 기체들이 팽창하게 되어⁽¹³⁻¹⁶⁾ 공극안의 압력이 증가하고, 더불어 온도 증가에 따라서 브릿지 저항체의 온도 변화율이 낮아져서 더욱 센서의 감도가 저하되는 것으로 생각된다. 이를 해결하기 위해서는 압력센서의 공극내의 진공도를 10^{-5} mmHg 이하로 더욱 낮추면 개선되리라 생각된다.⁽¹⁸⁾

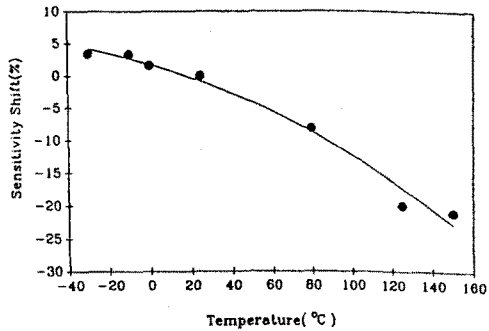


그림 11. 온도에 따른 감도의 변화

Fig. 11. Sensitivity drift as a function of temperature.

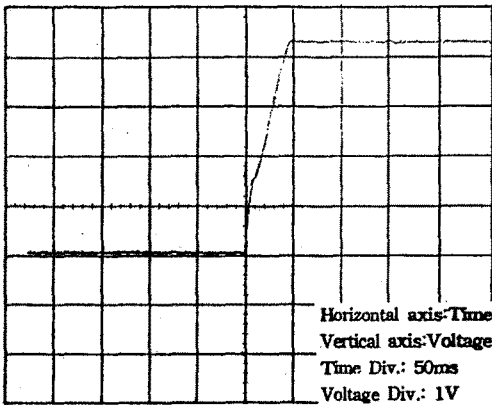


그림 9. 급격히 변하는 압력에 대한 센서출력의 과도 응답

Fig. 9. Transient response as a function of abrupt pressure.

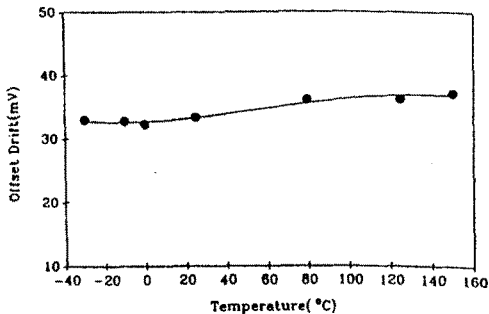


그림 10. 온도에 따른 오프셋 전압의 변동

Fig. 10. Offset voltage drift as a function of temperature.

IV. 결 론

본 연구에서는 SDB웨이퍼를 이용하여 웨이퍼의 전면에 걸쳐 다이어프램 두께가 균일한 압저항형 압력 센서를 양산 제조할 수 있도록 제조 공정 단계의 간소화와 에칭공정을 단순화함으로써 그 제조 양품율이 90%이상 되었다. 대기압 이하의 부압측정을 하기 위하여 제조한 센서를 0.02mmHg의 압력 하에서 pyrex 7740유리와 정전 접합하여 절대압 실리콘 압력센서를 제조하였다. 제조한 센서는 100mmHg~대기압까지의 절대압 변화에 대하여 매우 우수한 선형 특성을 보였고, 센서의 감도와 오프셋 전압은 상온에서 각각 $30.4 \mu V/VmmHg$, $30.6mV$ 였다.

제조된 절대압 압저항형 실리콘 압력센서의 출력 전압은 100mmHg에서 760mmHg까지의 압력 변화에 대해 0.22V에서 4.33V까지 선형적으로 변화하였으며, 또한 응답 시간도 50ms이내였다. 따라서 이것은 자동차 엔진 내의 공연비 조절용 절대압 압력센서로서 사용할 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

1. Kurt E. Peterson, "Silicon as a Mechanical Material", *IEEE Proc.*, vol.70, No.5, pp. 420-456, 1982.
2. G. Blasquez, P. Pons & A. Boukabache, "Capabilities and limits of silicon pressure sensors", *Sensors and Actuators*, vol.17, pp. 387-403, 1989.

3. Sea-Chung Kim & Kensall D. Wise, "Temperature sensitivity in silicon piezoresistivity Pressure transducers", *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-30, no.7, pp. 802-810, 1983.
4. K. Peterson et al, "silicon sensor & microstructures", *Novasensor*, 1990.
5. E. Bassous, "Fabrication of novel three-dimensional microstructures by the anisotropic etching of (100) and (110) silicon", *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-25, no.10, pp.1178-1185, 1978.
6. H. Seidel, "The mechanism of anisotropic silicon etching and its relevance for micromachining", *Transducers'87*, pp.120-125, 1987.
7. Shi-Ji, Zeng Zeng and Qin-Yi Tong, "A new silicon micromachining method using SOI/SDB technology", *sensors and actuators*, A21-23, pp. 961-963, 1990.
8. 김동천, 부종욱, 전영삼, 심영조, "Si 압력센서의 제조에 있어서 Electrochemical etch stop의 연구", *센서기술학술 대회 논문집*, pp.273-278, 1992.
9. Ben Kloeck, Scott D. Collins, Nico F. De Rooij & Rosemary L. Smith "Study of electrochemical etch-stop for high-precision thickness control of sensor membranes", *IEEE Trans. on Electron devices*, vol. ED-36, no.4, pp. 663-669, 1989.
10. 남효진, 최준림, "Boron Heavily Doping을 이용한 Etch-Stop 및 Si Membrane의 기계적 특성", *센서기술학술대회 논문집*, pp.292-295, 1992.
11. Ljubisa Ristic, *Sensor technology and device*, Artech House, INC, pp.158.
12. 안근영, 정귀상, 이경수, 윤선진, 강상원, "미세 가공기술을 위한 규소기판 접합", *센서기술학술 대회 논문집*, pp.262-265, 1992.
13. 김우정, "압저항형 압력센서의 제작 및 그 온도보상", *경북대학교 석사학위 논문*, 1990.
14. H. Henmi, S. Shoji, Y. Shoji, K. Yosimi and M. Esashi, "Vacuum packaging for microsensors by glass-silicon anodic bonding", *Transducers'93*, pp.584-587, 1993.
15. 손병복, 이재근, 최시영 "사각뿔 형태의 Mass보상된 실리콘 압저항형 가속도 센서" *센서학회지*, vol.3, no.1, pp. 19-25, 1994.
16. 이창준, 이재근, 최시영 "SDB 웨이퍼를 이용한 자동차용 엔진 압력센서의 제조," *한국 자동차어학술회의 논문집*, 제1권, pp. 304-309, 1994.
17. 김명해, *센서 인터페이싱*, 기전연구사, No. 2, pp. 141-158, 1987.
18. 최시영, 강신원, 이재근, 이창준 "자동차용 엔진압력 압력센서 cell개발", *발표예정*, 1995.

著 者 紹 介



이 창 준

1969년 12월 25일생. 1993년 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1995년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1995년 ~ 현재 현대전자 반도체연구소 근무. 주관심분야 : 반도체 압력센서

최 시 영

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-11, p.100 참조.
현재 경북대학교 전자공학과 교수



강 신 원

1955년 3월 12일생. 1978년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1980년 영남대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1993년 일본 게이오대학 대학원 생체의공학과 졸업(공학박사). 1995년~현재

경북대학교 센서기술연구소 전임강사. 주관심분야 : 광전자직접회로(OEIC), 광도파로형바이오센서, 반도체 센서.