

소형 Si 압력센서의 제작 및 특성 평가

(Fabrication and Characterization of Miniature Si Pressure Sensor)

朱炳權*, 李明福*, 李精一*, 金炯坤*, 姜光南*, 吳明煥*

(Byeong Kwon Ju, Myoung Bok Lee, Jung Il Lee, Hyoung Gon Kim

Kwang Nham Kang, and Myung Hwan Oh)

要 約

표준 Si 공정기술을 이용하여 칩의 크기가 $1.7 \times 1.7 \text{mm}^2$ 인 소형 압저항형 Si 압력센서를 제작하고 그 동작특성을 평가하였다. 제작된 센서는 크기 $1.0 \times 1.0 \text{mm}^2$, 두께 $20 \mu\text{m}$ 의 n형 Si 다이어프램상에 4개의 붕소 확산저항이 브릿지 형태로 연결된 칩 구조를 가지며 최종적으로 게이지압을 측정할 수 있도록 상온 상압하에서 패키징하였다. 이 센서의 동작특성은 상온에서 압력감도 $14.2 \mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{mmHg}$, 정격 압력범위 $0 \sim 760 \text{mmHg}$, 최대 비선형성 1.0% FS로 평가되었다.

Abstract

On the basis of standard Si processing, the miniaturized piezoresistive-type Si pressure sensor with a chip size of $1.7 \times 1.7 \text{mm}^2$ was fabricated and its operating characteristics were investigated. The sensor chip has a full-bridge type of 4 boron-diffused resistors which is formed on an $1.0 \times 1.0 \text{mm}^2$ area, $20 \mu\text{m}$ thick n-type Si diaphragm and finally, encapsulated under room temperature, 1 atm in order to measure a gauge pressure. The operating characteristics of this sensor were determined as a pressure sensitivity of $14.2 \mu\text{V}/\text{V} \text{mmHg}$, a rated pressure range of $0 \sim 760 \text{mmHg}$, and a maximum nonlinearity of 1.0% FS at room temperature.

I. 서 론

가전용품, 의료기구, 생산 공정장비등 현대 인간 복지생활에 기여하고 있는 제분야의 진보 추세가 자동화 및 무인화를 추구함에 따라 이들의 성능향상 정도에 척도가 되는 결정인자로서 센서의 시스템화가 크게 대두되고 있다. 센서의 시스템화란 단지 계측/지시에 국한된 센서 고유의 동작영역을 신호량의 다

점 정밀계측, 분석, 처리 및 전송등 시스템 차원의 영역으로까지 확장하는 것으로 반도체 기관상에 소형 센서칩과 함께 하이브리드 혹은 모노리식 형으로 신호처리를 위한 집적회로부를 내장함으로써 가능하게 된다. 이를 위해 압력, 온도, 이온, 흐름등의 신호량을 측정하기위한 소형 Si 센서들이 각 용도별로 개발되고 있으며 아울러 이들의 어레이화, 복합화, 집적화를 향한 연구가 단계적으로 실현되고 있다.^[1-3]

이들중 특히 Si을 이용한 소형 압저항형 압력센서는 그 연구 개발 및 응용도가 매우 활발한 소자이다. 이는 금속을 재료로 한 압력게이지와 동작특성면

*正會員, 韓國科學技術研究院 光·電技術센터
(Optics & Electronics Center, KIST)

接受日字: 1990年 7月 17日

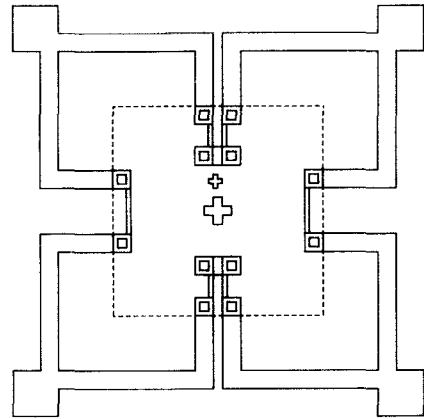
에서 비교하여 볼 때 집적화 및 소형화가 용이하다는 점 이외에도 Si 단결정이 금속보다 약 100배이상 큰 압저항효과를 지니고 있을뿐 아니라 완전한 탄성체이므로 히스테리시스를 나타내지 않으며 확산저항을 다이아프램상에 구성함으로써 2차적인 오차 발생원인을 제거할 수 있다는 등의 잇점이 있다.

이를 토대로 본 연구에서는 의료전자 분야 및 반도체 공정장비에 이용될 수 있는 압력-흐름-온도동시측정용 집적센서 개발의 첫 단계로서, 상압이상의 게이지압을 측정할 수 있는 소형 압저항형 Si 압력센서소자를 제작하고 그 특성을 평가하여 보았다.

II. 압력센서의 설계

압저항형 Si 압력센서의 동작요소로는 압력감도, 브릿지 비평형전압 및 이들의 온도계수, 정격 압력범위, 최대 인가압력, 비선형성등이 있는데 이들은 Si 다이아프램의 결정방향, 모양, 크기, 두께 그리고 확산저항, 즉 압저항(piezoresistor)들의 방향, 크기, 배열 위치, 전하 운반자의 종류 및 농도등의 공정변수에 의존한다. 따라서 센서의 제작시 각각의 공정변수들은 센서의 응용분야와 사용환경등에 의해 사전에 엄격히 결정되어야 하며 이와 함께 동작요소와 공정 변수간의 관계에 관한 연구결과들이 기 발표된 바 있다.⁽⁴⁵⁾ 이를 기초로하여 본 연구에서는 의료용에서의 혈압 측정 및 제 공정장비에서의 유체의 압력, 흐름등의 측정에 적합한 사양을 갖는 압력센서를 제

작 공정과정을 고려하여 표 1 과 같이 설계하였다. 아울러 그림 1 은 설계된 압력센서의 레이아웃을 나타낸 것이다.



KIST AEL PS-1

그림 1. 압저항형 Si 압력센서의 칩 레이아웃
Fig. 1. Chip layout of piezoresistive-type Si pressure sensor.

표 1. Si 압력센서의 설계 요건

Table 1. Design consideration of Si pressure sensor.

공정 변수	고려 사항	설정치 (구조)	
Si 다이아프램	모양	제작의 난이도	정사각형
	면 방향	응용 분야	[100]
	크기	동작범위 (0~1기압) 압력감도 (19.7 μ V/VmmHg) 최대인가압력 (4000mmHg)	1.0 \times 1.0mm ²
	두께	수율	20 μ m
확산저항	크기	압력감도 수율	20 \times 200 μ m
	면 저항	압력 감도	175~180 Ω / \square
	불순물	온도계수	봉소
	배열	온도계수	브릿지형
	위치	평균효과 압력감도 양면 정합오차	다이아프램의 가장자리로부터 50 μ m내부에 위치
패키징 방법	응용 분야	게이지압형	

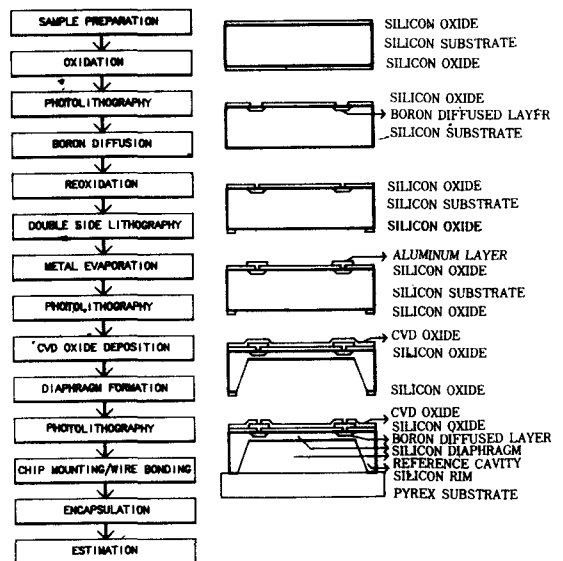


그림 2. Si 압력센서의 공정 순서
Fig. 2. Processing sequence for Si pressure sensor.

Ⅲ. 압력센서의 제작공정

센서를 제작하기 위한 전반적인 공정순서는 그림2와 같다.

1. 앞면 회로 공정

사용된 센서용 기판은 직경 4인치, 두께 $520\mu\text{m}$, 저항률 $\rho=3.0\sim 3.2\Omega\text{m}$, 방향성 (100)인 n형 Si 웨이퍼로 이를 $2\times 2\text{cm}^2$ 으로 절단하여 16개의 칩이 일괄 제작되도록 하였다. 즉, 표준세척공정을 거친 Si 기판상에 1500\AA 두께의 습식 열 산화막을 성장한 뒤, 사진식각공정을 통해 폭 $20\mu\text{m}$, 길이 $200\mu\text{m}$ 의 봉소 확산저항패턴을 형성하였다. 이때 다이아프램에 수직인 확산저항패턴은 각 저항의 응력평균효과(stress averaging effect)를 고려하여 저항의 길이 방향으로 1/2의 크기를 갖는 패턴을 각각 2개씩 2쌍을 형성하였다.^[4] 형성된 저항패턴에 봉소를 확산하기 위해 Carborundum BN-1100 고체확산원을 사용하여 1000°C N_2 분위기에서 35분간 사전증착한 뒤, BHF 처리-습식저온산화-BHF 처리를 거쳐 봉소스킨을 제거하였다. 이를 1100°C , N_2/O_2 분위기에서 60분간 드라이브 인을 하였으며 이 때 함께 처리된 테스트 칩을 4 point probe와 spherical drill을 사용하여 측정한 결과면 저항은 $175\sim 180\Omega/\square$ 정도, 접합깊이는 약 $2.1\mu\text{m}$ 정도임을 알 수 있었다.

다음으로 산화막을 제거한 후 다시 1000\AA 두께의 열산화막을 성장하였다. 양면 마스크 정합기를 이용하여 기판 앞면의 접촉창 패턴과 뒷면의 다이아프램 패턴을 정합한 뒤 두 번째 사진식각공정을 행하였다. 급속전극용으로 7000\AA 두께의 Al을 열 증착하고 각 확산저항들이 브릿지 형으로 연결되도록 세번째 사진식각공정을 통해 Al을 배선연결하였다. 최종적으로 Si의 비등방성 식각용액내에서 Al의 부식을 막기 위해 회로형성부분 전체에 걸쳐 2000\AA 두께의 회로보호용 실리콘 산화막을 CVD방법으로 증착하였다. 이 때 사용된 가스는 $\text{N}_2, \text{O}_2, 5\% \text{SiH}_4$ 로 상압, 400°C 의 온도에서 각각 800sccm , 100sccm , 40sccm 의 유량으로 2분동안 흘려주었다. 이상과 같은 공정을 거쳐 제작된 센서의 앞면 회로부는 그림 3 과 같다.

2. 다이아프램의 형성

오차 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 이내의 범위를 갖는 $20\mu\text{m}$ 두께의 다이아프램과 기타 집적센서용 Si 미세기계구조들의 제작에 관해서는 앞서 발표한 바 있다.^[6,7] 본 실험에서는 압력센서용 다이아프램의 제작을 위해 Si의 비등방성 식각용액들중 식각률의 조절이 비교적 용이하고 식각된 표면 즉 (100)면이 경면에 가장 가까운

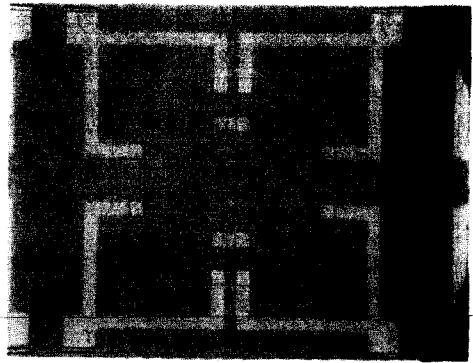


그림 3. 압력센서의 앞면 회로부

Fig. 3. Front-side circuit part of Si pressure sensor.

Ethylenediamine-Pyrocatechol-Water 용액을 각각 $75\text{ml}-12\text{gr}-24\text{ml}$ 의 조성으로하여 $115\pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도에서 사용하였다. 이때 용액의 산화, 조성 및 온도변화등을 방지하기위해 용액교반기, 되흐름기를 사용하였고 또한 용액내에 질소를 100sccm 정도로 불어 넣어주었다. EPW용액에 의한 Si의 식각시 주목할 점은 $300\mu\text{m}$ 이상의 깊은 식각의 경우 식각표면상에 종종 흰색 잔유물이 존재함으로써 식각표면의 평탄화나 균일화를 방해한다는 점이다.^[8,9] 이러한 흰색 잔유물의 모양을 그림 4에 나타내었는데 이는 결정성을 띄지않는 흰색 분말형태이므로 그 조성은 Si-O-H-N-C의 화합물로 구성되며 불산을 제외한 대부분의 용액에도 용해되지 않는다. 이는 용해된 Si의 국부적인 과잉포화로 인해 식각깊이가 깊을수록 더욱 현



그림 4. Si의 비등방성 식각시 표면에 발생하는 흰색 잔유물

Fig. 4. White residues at surface during Si anisotropic etching.

저히 나타나므로 두께 500 μm 이상의 Si기판을 박판화(thinning)하지않은 상태에서 공정을 행할경우 Si의 과잉포화를 막기위해 보다 저온에서 식각하거나 혹은 촉매성분을 첨가하여야 한다. 본 실험에서는 촉매로서 Pyrazine을 약 0.48gr 정도 첨가하여 다이아프램의 수율을 향상할 수 있었다.

아울러 p형 Si 기판상에 n형 에피층을 성장하여 전기화학적 식각정지를 행한 결과 앞면의 회로형성부분에 식각정지용 전위를 공급하는 금속박막의 증착이 어려웠다. 또한 회로부를 제외한 주변영역에 매트릭스형으로 Au/Ti전극을 증착하여 전기화학적 식각을 하여보았는데 Si 에피층의 측면방향으로 전위의 변화가 발생하여 다이아프램의 두께를 정확히 조절할 수 없었다. 따라서 여기서는 식각용액의 조건을 가능한 고정한 뒤 사전에 정해진 식각률(1.25 $\mu\text{m}/\text{min}$)을 고려하여 식각시간을 조절하였으며 동일규격의 기준용 칩을 함께 넣어 그 투과광 및 단면관찰을 통해 다이아프램의 두께 오차를 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 이하로 조절할 수 있었다. 그림 5에 20 μm 두께의 다이아프램 공정이 완료된 압력센서 칩의 단면도를 보였다.

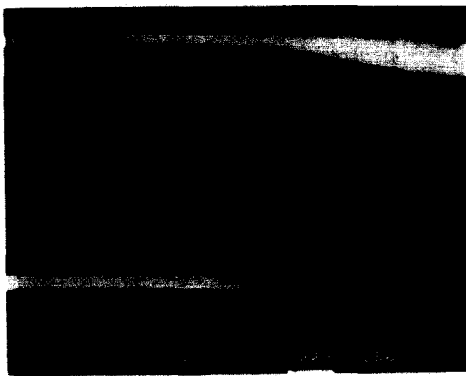


그림 5. 20 μm 두께의 다이아프램을 갖는 Si 압력센서의 단면도

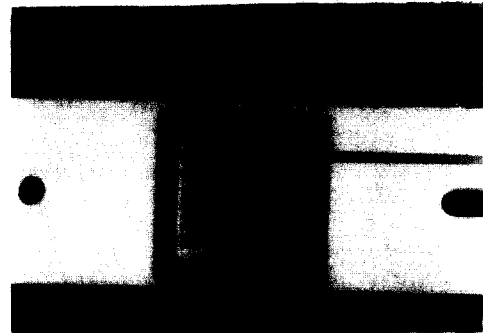
Fig. 5. Cross-section of Si pressure sensor with a 20 μm thick diaphragm.

3. 패키징

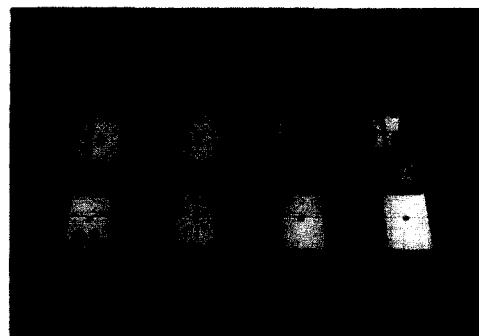
다이아프램 형성후 마지막 사진식각공정을 통해 앞면의 배선연결용 패드부의 CVD 산화막 및 뒷면의 열 산화막을 제거하였다. 다음단계로 에폭시를 사용하여 표면이 경면인 파이렉스 유리판과 센서칩의 뒷면을 완전히 접착하였으며 이때 기준 공동의 형성조건은 상온-대기압으로 하였다. Si-유리의 정

전 열접합(electrostatic bonding)⁽¹⁰⁾을 행할 경우 350 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 고온에서 밀봉된 공동내의 공기가 상온에서 수축되어 대기압을 기준으로하는 게이지압 측정용 압력센서의 동작특성을 저하시킬 우려가 있어 이를 배제하였다.

최종적으로 그림 6(a)와 같은 듀얼 인 라인 칩 캐리어상에서 와이어 본더를 사용하여 칩의 배선연결을 하였는데 금후 정전류원, 차동증폭회로, 온도 및 비선형성 보상회로등 신호처리부와외의 집적화를 고려하여 40핀 패키지를 사용하였다. 아울러 그림 6(b)는 공정이 완료된 게이지압 측정용 압저항형 Si 압력센서의 최종 모형이다.



(a)



(b)

그림 6. 제작된 Si 압력센서들

- (a) 듀얼 인 라인 패키지상에 올려진 센서 칩
- (b) 압력 인입구를 갖는 게이지압 측정용 Si 압력센서들

Fig. 6. Fabricated Si pressure sensors.

- (a) Sensor chip mounted on dual-in-line package,
- (b) Si pressure sensors with a pressure-inlet tube for measuring gauge pressure.

IV. 게이지압 측정용 센서의 동작특성 평가

제작된 압력센서의 동작특성을 평가하기 위해 그림 7과 같은 측정 시스템을 구성하였다. 압력인가원으로 질소 실린더를 사용하였으며 이로부터 미세조절밸브를 통해 0.0~1.5KgF/cm² 범위의 압력이 0.05KgF/cm²의 간격으로 센서와 기준 압력게이지(JOFRA calibrator LPC2A)에 동시 전달된다. 이와 함께 압력센서의 두 단자간에는 정전압용(Keithley 228 V/I Source)에 의해 10V DC전압이 인가되며 압력인가시 각 확산저항들의 변화로 발생하는 다른 두 단자간의 전위차가 전압계(Keithley 619 Electrometer)로 검출되어 기록된다.

그림 8(a)는 상온에서 측정된 압력센서의 인가압력-출력전압의 관계이다. 브릿지비평형전압 V(OFFSET)은 280.5mV로 이는 각 붕소확산저항들간의 저항치의 차이에 기인한 것이다. 아울러 이 센서의 동작영역인 0~1기압(0.00~1.03KgF/cm², 대기압을 0으로 한 경우)범위내에서 출력전압은 0.00~107.64mV의 변화폭을 갖는다. 즉, 이 센서의 압력감도는 상온에서 약 14.2μV/V mmHg로 이는 센서 시뮬레이션 프로그램[4]을 이용하여 얻어진 값인 이상압력감도 19.7μV/V mmHg에 비해 28%정도 작은 값이다. 이와같이 압력감도가 이상치보다 적은 이유로는 다이아프램의 두께 오차, 다이아프램과 확산저항 브릿지간의 양면 정합오차, 확산저항치의 공정오차로

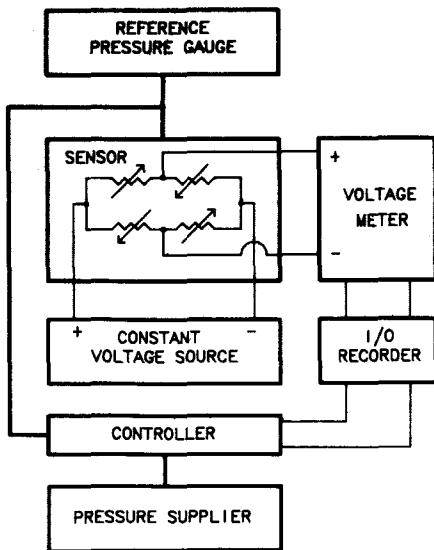
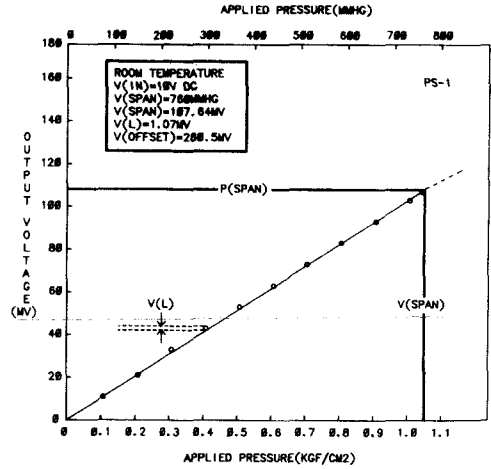
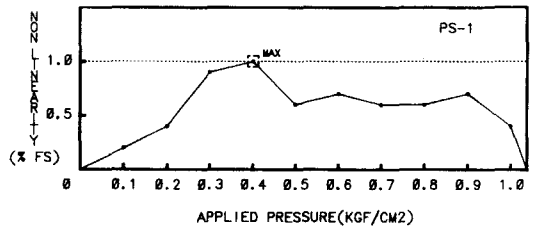


그림 7. 압력센서의 특성 측정 시스템
Fig. 7. Measurement system for pressure sensor.



(a)



(b)

그림 8. 센서의 압력 응답 특성
(a) 인가압력에 따른 브릿지 출력전압
(b) 동작영역내에서의 비선형성

Fig. 8. Pressure response characteristics of pressure sensor.

- (a) bridge output voltage as a function of applied pressure,
- (b) nonlinearity in the range of rated operating region.

인한 변화등을 추정할 수 있다. 최대 비선형성은 0.4KgF/cm²의 압력인가시 발생하는데 이는 그림 8(a)로부터 V(L)/V(SPAN)×100≈1.0% FS로 얻어진다. 이때, V(L)은 정격 압력범위의 하단과 상단을 잇는 직선으로부터의 측정치 최대편차, V(SPAN)은 정격 압력범위인 P(SPAN)에 대한 브릿지 전압의 출력범위를 나타낸다.

아울러 센서의 동작영역내에서 측정된 비선형성 오차를 그림 8(b)에 나타내었다. 이들은 대략 0.2~1.0% FS의 범위를 갖는데 이는 다이아프램의 과잉편향에 의한 것이라기보다는 압저항계수의 비선형성에 기인한 것으로 사료된다. 상술한 게이지압 측정용 압저항형 Si 압력센서의 주요 동작특성을 표 2에 요약하였다.

표 2. 제작된 Si 압력센서의 동작특성(상온)
 Table 2. Characteristics of fabricated Si pressure sensor. (at R. T.)

측정압력형태	게이지압
인가 전원	10V DC
브릿지 비평형전압	280.5mV
최대 인가압력	약 4000mmHg
정격 압력범위	0~1기압
정격 출력범위	0~107.64mV
압력 감도	14.3 μ V/VmmHg
최대 비선형성	1.0% FS

V. 결 론

의료전자 분야 및 반도체 공정장비에의 응용을 목적으로, 대기압을 기준으로 할 때 0~1기압의 측정범위를 갖는 소형 압저항형 Si 압력센서를 제작하여 보았다. 브릿지 비평형 전압 280.5mV, 최대 비선형성 1.0% FS를 감안하면 제작된 압력센서는 약 14.2 μ V/V mmHg의 압력감도로 0~1기압내에서 동작할 수 있음을 확인되었다. 비교적 큰 비평형 전압과 비선형성은 차동증폭회로를 이용한 외부로부터의 이득조절등에 의해 감소될 수 있으며 또한 센서회로 내에 바이폴라 트랜지스터나 확산저항등을 삽입하여 동작특성의 온도변화를 추출하는 것도 반드시 필요할 것이다. 아울러 적은 출력전압에 대한 신호 증폭회로, 전원공급용 정전류/전압회로, A/D 변환기등 신호처리부와의 집적화, 온도 및 흐름센서와의 복합화등이 다음 연구방향으로 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 아울러, 연구가 수행되는 동안 금속 배선공정 및 실험결과에 관한 토의, 정리를 도와주신 본 연구부의 권용무, 한일기, 전형욱, 박종현, 이윤희 연구원께 깊은 감사를 드립니다.

參 考 文 獻

- [1] J.E. Brignell, "Sensors within Systems," *J. Phys. E: Sci. Instrum.* vol. 17, pp. 759-765, 1984.
- [2] 주병권의, "실리콘 Thermopile 집적센서의 기술동향," 전자공학회지, 제16권, 제 6 호, pp. 90-99, 1989
- [3] 주병권의, "생체계측을 위한 피하주입형 Si센서의 기술동향" 전자공학회지, 제17권, 제3호, pp. 1~9, 1990
- [4] K.W. Lee et al., "SENSIM: A Simulation Program for Solid-State Pressure Sensor," *IEEE Tr. Electron Dev.*, vol. ED-29, no. 1, pp. 34-41, 1982.
- [5] H.L. Chau et al., "Scaling Limits in Batch-Fabricated Silicon Pressure Sensors," *IEEE Tr. Electron Dev.*, vol. ED-34, no. 4, pp. 850-858, 1987.
- [6] 주병권의, "N₂H₄-H₂O용액의 {100}Si에 대한 최적식각조건의 설정과 전기화학적 식각에의 응용," 전자공학회논문지, 제26권, 제11호, pp. 66-60, 1989
- [7] 주병권의, "실리콘의 비등방성 식각상태의 고찰과 집적센서용 미세기체구조 제작에의 응용," 전기학회논문지, 제39권, 제 1 호. pp. 75-82, 1990
- [8] A. Reisman et al., "The Controlled Etching of Silicon in Catalyzed Ethylenediamine-Pyrocatechol-Water Solutions," *J. Electrochem. Sco.*, vol. 126, no. 8, pp. 1406-1415, 1979.
- [9] X.P. Wu et al., "A Study on Deep Etching of Silicon using Ethylenediamine-Pyrocatechol-Water," *Sensor. Actuator.*, vol. 9, pp. 333-343, 1986.
- [10] G. Wallis et al., "Field Assisted Glass-Metal Sealing," *J. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 10, pp. 3946-3949, 1969.

 著 者 紹 介

- | | | | |
|-------------|--|-------------|---|
| 朱 炳 權 (正會員) | 第26卷 第11號 參照
현재 KIST 응용전자연구실
연구원
● | 金 炯 坤 (正會員) | 第26卷 第11號 參照
현재 KIST 집적시스템 연구
실 연구실장
● |
| 李 明 福 (正會員) | 第26卷 第 5 號 參照
현재 KIST 광전자연구실 연
구원
● | 姜 光 南 (正會員) | 第26卷 第 5 號 參照
현재 KIST 광전자연구실 연
구실장
● |
| 李 精 一 (正會員) | 第26卷 第 5 號 參照
현재 KIST 광전자연구실 선
임연구원 | 吳 明 煥 (正會員) | 第26卷 第11號 參照
현재 KIST 광·전 기술센터
센터장 |
-