

범프 본딩된 압저항 실리콘 가속도센서의 제조

(Fabrication of Bump Bonded Piezoresistive Silicon Accelerometer)

沈俊煥*, 李相昊*, 李鍾玄*

(Jun Hwan Sim, Sang Ho Lee, and Jong Hyun Lee)

요 약

다공질 실리콘 마이크로머시닝과 집적회로 공정기술을 사용하여 범프 본딩된 압저항 실리콘 가속도센서를 제조하였다. (111)면 $n/n^+/n$ 3층 구조의 실리콘 기판으로 제조된 가속도센서의 출력 전압은 2.3 g까지 1% 이하의 좋은 선형특성을 보였고, 감도는 약 $743 \mu V/g$, 공진 주파수는 약 2.04 kHz이었다. 그리고 타측감도는 5.2%로 나타났다. 또한 센서출력에 대한 범프 본딩의 영향을 알아보기 위해 $-50^\circ C \sim 120^\circ C$ 까지 온도변화를 가진 열 충격에 대하여 압저항값의 변화를 측정하였다. 이때 base 저항값인 3.61 k Ω 에 대하여 약 0.014%의 변화를 나타내어 범프 본딩으로 인한 영향은 거의 없음을 알 수 있었다.

Abstract

Bump bonded piezoresistive silicon accelerometer was fabricated by the porous silicon micromachining and the process technique of integrated circuit. The output voltage of the accelerometer fabricated on (111)-oriented Si substrates with $n/n^+/n$ triple layers showed good linear characteristic of less than 1%. The measured sensitivity and the resonant frequency was about $743 \mu V/g$ and 2.04 kHz, respectively. And the transverse sensitivity of 5.2% was measured from the accelerometer. Also, to investigate an influence on the output characteristics of the sensor due to bump bonding, the values of the piezoresistors were measured through thermal-cycling test in the temperature variation from -50 to $120^\circ C$. Then, there was 0.014% resistance changes about 3.61 k Ω , so the output characteristics of the sensor was less affected by bump bonding.

I. 서 론

실리콘 가속도센서는 실리콘의 우수한 기계적 성질을 이용할 수 있으며^[1,2], 집적회로 기술로 제작되므로 정교하고 소형 경량이며 규격화, 양산화가 쉽고 가격이 낮은 장점이 있다^[3]. 또한, 센서의 주변회로를 칩 위에 집적하는 것이 가능하기 때문에 신뢰성, 감도 및 신호 대 잡음특성이 우수하며, 센서의 스마트화 및

시스템에의 적용성이 뛰어나 최근에 실리콘 마이크로머시닝 기술을 이용하여 압저항형^[4-6], 용량형^[7], 압전형^[8] 감지소자를 가진 여러 가지 실리콘 가속도센서가 보고되고 있다.

그 중에서 압저항형 실리콘 가속도센서는 주로 이방성 식각액(KOH, EPW 등)을 이용한 벌크 마이크로머시닝(bulk micromachining)^[9,10]으로 수행되고 있는데, 고온($60 \sim 120^\circ C$)에서 장시간의 식각, 양면 마스크 작업에 의한 정합 오차, 미세구조의 방향이나 기판 결정면의 제한 등의 단점들을 가지고 있다. 이에 본 논문에서는 미세구조의 형상이나 기판 결정면에 관계없이 정확한 미세구조를 형성시킬 수 있는 다공질

* 正會員, 慶北大學校 電子·電氣工學部
(School of Electronic & Electrical Eng., Kyung-pook Nat'l Univ.)

接受日字:1997年3月20日, 수정완료일:1997年6月5日

실리콘 마이크로머시닝^[11] 기술을 사용하여 가속도센서의 미세구조를 형성하였다.

또한 요즘 패키지 분야에서 주목을 많이 받고 있는 범프 본딩 기술^[12] 을 이용하여 기존의 와이어 본딩 대신 범프를 이용하여 칩과 기판을 전기적으로 연결하였다. 범프 본딩 기술은 칩 위에 범프를 형성시킨 후 뒤집어 기판위의 패드와 연결하는 방법으로 칩의 거의 모든 면적을 사용할 수 있어 고밀도 실장을 할 수 있다. 그리고 Pb/Sn 솔더 범프로 칩과 기판이 연결되므로 기존의 와이어 본딩에 비해 10~20배의 본딩 강도를 가지기 때문에 기계적인 충격에 응답하는 가속도센서의 신뢰성이 향상된다.

또한, 범프는 본딩에서의 inductance 성분이 와이어 본딩에 비하여 수십배 줄어들어 출력신호에 대한 기생 수동소자 성분의 영향을 최소화 할 수 있는 장점이 있다^[13,14].

본 논문에서는 마이크로머시닝의 한 분야로 부각되고 있는 다공질 실리콘 마이크로머시닝을 이용한 공정 설계를 통하여 제조된 가속도센서를 연구하였다. 먼저 기계적 강도가 큰 (111)면 n형 실리콘 웨이퍼에 미세구조가 될 부분에만 n⁺로 선택적으로 확산하여 n/n⁺/n 3층 구조를 만든 후, 고농도 불산(HF) 용액에서 양극 반응으로 n⁺ 층을 다공질 실리콘으로 형성하였다. 이를 NaOH 용액에서 식각함으로써 4빔 브릿지형 미세구조를 제조하였다. 그리고 센서의 관성질량과 범프를 형성하기 위하여 Pb/Sn/Ag(35 : 63 : 2) 솔더크림을 디스펜싱(dispensing)^[15] 한 후 열처리하여 범프 본딩된 4빔 압저항 실리콘 가속도센서를 제조하고, 그 특성을 조사하였다.

II. 실험 및 측정

그림 1은 진동질량 및 범프가 형성된 가속도센서의 표면 전자현미경 사진이다. 제조된 센서는 소자의 중심에 하나의 관성질량, 이를 지지하는 4개의 빔, 각 빔위에 4개의 압저항, 그리고 모서리 부분에 4개의 범프로 구성되어 있다. 설계된 가속도센서의 매스 패드(mass pad)와 본딩 패드(bonding pad)의 직경은 각각 1 mm와 1.4 mm이며, 빔 길이, 빔 폭, 빔 두께의 각 파라미터 값은 350 μm, 120 μm, 5 μm 이다. 미세구조와 기판 사이의 공극(air-gap)은 20 μm이며, 칩의 면적은 3.7 × 3.7 mm² 이다.



그림 1. 관성질량과 범프가 형성된 시편의 SEM 사진
Fig. 1. SEM photograph of the device formed proof mass and bumps.

그림 2는 압저항형 가속도센서의 제조 단면도를 나타낸 것이다. 먼저 5", (111)면, $\rho = 5 \sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$ 인 실리콘 웨이퍼에 8000 Å 두께의 산화막을 성장시킨 후, 미세구조의 공극이 될 부분에만 선택적으로 인을 60 keV, $2 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 로 이온 주입한 후 열처리하여 깊이가 20 μm인 n⁺ 영역($N_d > 1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$)을 형성하였다. 다음으로 5μm 정도의 저농도 도핑된 n 실리콘 에피층($N_d < 2 \times 10^{15}/\text{cm}^3$)을 성장시켜 n/n⁺/n 구조를 형성하였다(그림 2(a)). 950°C, 10분간 전식산화와 15분간 습식산화한 후, 사진식각법을 압저항 영역을 정의하였다. 붕소를 40 keV, $2.7 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 로 이온 주입한 후, interconnection 영역을 정의하여 붕소를 40 keV, $2.6 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 로 이온 주입하였다(그림 2(b)). APCVD 산화막을 4000 Å 증착한 후, 1070 °C, 70분간 질소분위기에서 열처리하여 압저항을 형성하였다(그림 2(c)). 전면에 있는 산화막을 모두 에칭한 후, 미세구조의 스트레스 완충역할을 하는 산화막을 1000 Å 성장시키고, 사진식각법으로 완충산화막(buffer oxide)을 정의한 후, LPCVD 질화막을 1500 Å 증착하였다. 양극반응시 균일한 전류분포를 얻기 위하여 시편 뒷면에 인을 40 keV, $5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 로 이온 주입하였다(그림 2(d)). 다음으로 HF 양극반응시 마스크(masking) 역할을 하는 Au/Ni-Cr를 e-beam evaporator를 사용하여 7000 Å 증착하여 사진식각법으로 미세구조부를 정의한 후, n 에피층을 reactive ion etching(RIE)로 약 10 μm 식각하여 n⁺ 층을 노출시켰다(그림 2(e)). 다음으로 양극반응시 웨이퍼 뒷면의 전극을 형성하기 위하여 1 μm

두께의 Al을 진공 증착하였다. 12 wt% HF 용액에서 1.85 V의 전압으로 25분간 양극반응하여 n^+ 층에 다공질 실리콘을 형성한 후(그림 2(f)), 5% NaOH 수용액에서 2분간 다공질 실리콘을 식각하여 미세구조를 형성하였다. 그리고 웨이퍼 전면에 있는 Au/Ni-Cr을 모두 에칭하고, 압저항 접촉부와 매스 패드를 동시에 정의하여 질화막과 산화막을 차례로 제거한 뒤 Au/Ni-Cr을 다시 진공증착하여 전극과 매스패드를 형성하였다(그림 2(g)). 마지막으로 매스 패드와 범프 패드 영역에 Pb/Sn/Ag(35 : 63 : 2) 솔더크림을 디스펜싱(dispensing) 한 후, 3-zone reflow 장치로 열처리하여 관성질량과 범프를 형성하였다(그림 2(h)). 이때, 열처리조건은 1-zone은 80 °C, 30초, 2-zone은 160 °C, 30초, 그리고 3-zone은 210 °C, 5초간 이었다. 그림 3은 디스펜서(dispenser)를 사용하여 관성질량과 범프를 동시에 형성하는 범프 본딩하는 방법을 나타낸 그림이다.

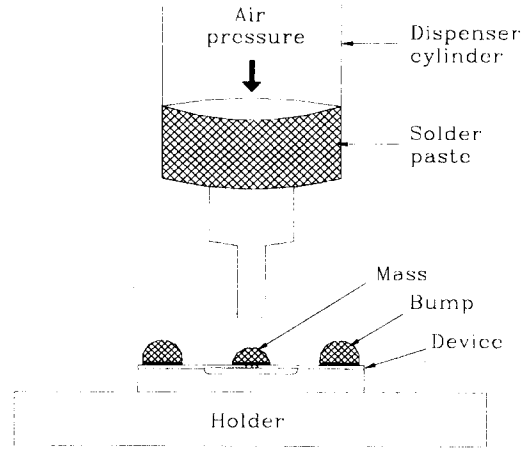


그림 3. 디스펜서를 사용한 범프 본딩 방법
Fig. 3. Bump bonding method using a dispenser.

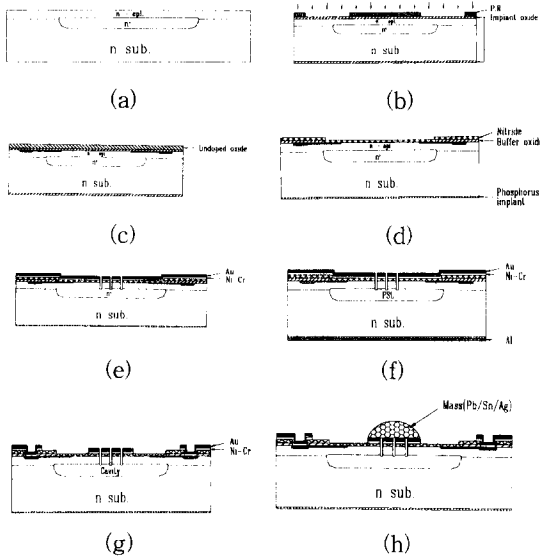


그림 2. 가속도센서의 제조 공정도
Fig. 2. Fabrication process of the accelerometer.

범프의 열 충격에 대한 특성 변화를 조사하기 위하여 온도변화에 따른 소자의 압저항값 변화를 측정함으로써 간접적으로 알아내는 방법을 사용하였다^[16,17]. 그림 4는 열팽창 계수가 서로 다른 두 물질(glass-Silicon) 사이에 있는 범프에 열 충격을 가하기 위하여 -50 °C ~ 120 °C 까지 온도변화를 가진 thermal-cycling 곡선이다.

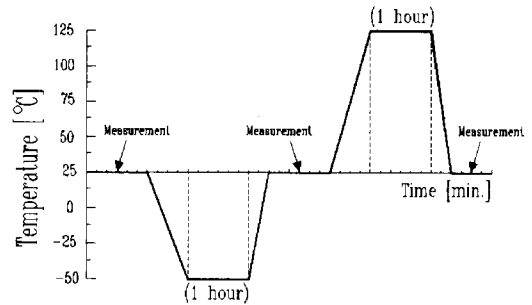


그림 4. 온도 변화 곡선
Fig. 4. Curve of thermal cycle.

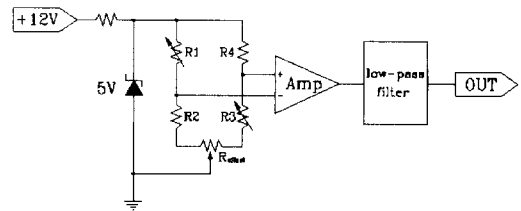


그림 5. 측정회로의 구성도
Fig. 5. Schematic diagram of the measuring circuit.

그림 5는 제조된 가속도센서의 응답을 검출하기 위한 증폭회로를 나타낸 것이다. 미주보는 2개의 범프로 구성된 half-bridge에서 나오는 출력 신호가 증폭회로의 입력으로 들어가서 증폭된 후, 저역필터를 거쳐 최종 출력으로 얻어진다. 이때 브릿지에 가해지는 전압은 5 V이며, 증폭회로의 이득은 약 200 이었다. 그림

6은 진동기를 이용한 사인파형 가속도 측정장치이다. LDS V810 진동기를 사용하였으며, 귀환센서(EN-DEVCO 9210-50)에서 측정된 신호를 귀환시켜 진동기의 진폭 및 주파수를 제어하였으며, 표준압전센서(B & K 4366)와 시편의 출력 파형을 동시에 리코더(AR1100)로 측정하였다.

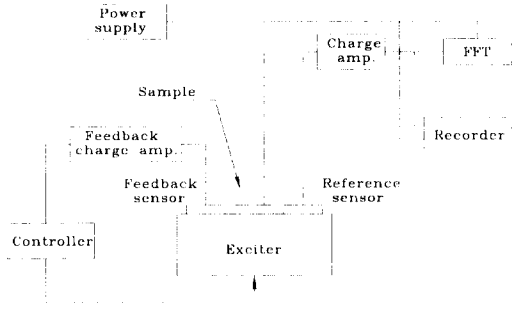
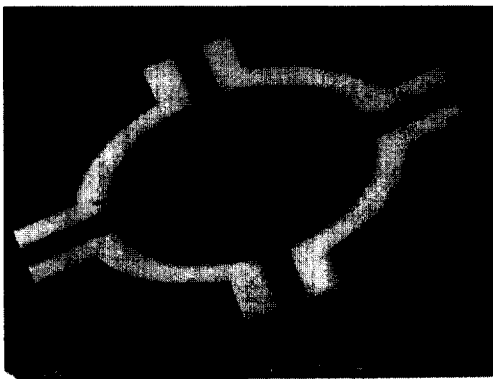


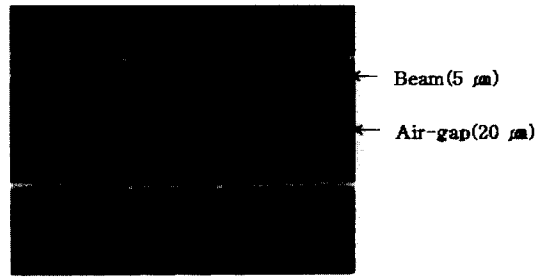
그림 6. 사인파형 가속도 측정장치도
Fig. 6. Schematic diagram of the sine wave acceleration measurement system.

III. 결과 및 고찰

그림 7은 p형의 압저항을 형성한 후, 양극반응으로 미세구조를 제조한 시편의 표면 및 단면 전자현미경 사진이다. 붕소를 확산한 p형 압저항 영역은 양극반응 시 역방향 전압이 인가되기 때문에 양극반응이 되지 않아 원래의 저항값을 그대로 가지고 있음을 확인하였다. 그림 (b)의 단면사진과 같이 20 μm 두께의 n⁺층만이 선택적으로 양극반응된 후 식각되어 깨끗한 공극이 형성되었으며, 또한 에피층은 원래의 두께인 5 μm 로 정확하게 브릿지형 미세 기계구조의 빔을 이루고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 7. 마이크로머시닝된 시편의 SEM 사진
(a) 표면 사진 (b) 단면 사진

Fig. 7. SEM photograph of the micromachined device.
(a) Surface photograph (b) Cross-sectional photograph.

그림 8은 Pb/Sn/Ag 솔더 페이스트를 디스펜싱하여 관성질량과 범프를 형성한 후, glass 기판 위에 범프 본딩된 소자의 전자현미경 사진으로 기판과 관성질량사이의 거리는 약 50 μm 정도로 나타났다. 이때, 제조된 소자의 관성질량은 1 mg, 압저항의 면저항은 240 Ω/\square 이었으며, 저항값은 3.35~3.45 k Ω 으로 약 \pm 3%의 오차를 가졌다.

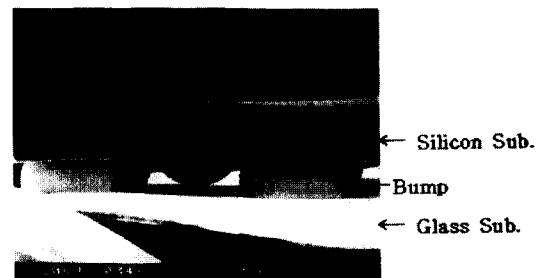


그림 8. Glass 기판 위에 범프 본딩된 소자의 SEM 사진

Fig. 8. SEM photograph of the bump bonded device on the glass substrate.

그림 9는 3 Hz, 1 g의 사인파형 가속도에 대하여 \pm 20 mV 범위에서의 소자 응답 특성을 나타낸 것이다. (a)는 제조된 가속도센서의 응답특성이며, (b)는 표준 압전센서(B&K 4366)의 응답을 나타낸 것이다. 출력 파형은 비교적 깨끗한 사인파형을 나타내었으며, 응답 시간의 지연은 거의 없음을 볼 수 있다. 그림 10은 가속도에 따른 선형특성을 보기 위하여 0 ~ 2.3 g의 가속도에 대한 응답특성을 나타낸 것이다. 측정된 감도는 743 $\mu\text{V/g}$ 이며, 비선형특성은 full scale 출력

에서 1% 이하로 좋은 특성을 나타냈다. 타측감도를 측정하기 위하여 소자표면의 측면방향(transverse direction)으로의 가속도에 대한 응답을 측정하였다. 측정된 타측감도는 약 5.2% 이하로 나타났다. 이는 센서의 관성질량이 소자의 매스패드에서 반구형으로 형성되어 무게중심이 소자의 표면에서 윗부분으로 올라가 있기 때문이다. 그림 11은 1g의 일정한 가속도를 인가하면서 10 ~ 3.2 kHz의 주파수 범위에서 측정된 센서의 주파수 응답 특성을 나타낸 것이다. 이때 측정된 공진주파수는 설계된 값보다 8% 높은 2.04 kHz이었다. 이것은 식각 공정 및 마이크로머시닝을 통하여 제조된 센서의 실제 값과 설계된 소자의 값의 에러가 주된 원인으로 생각된다.

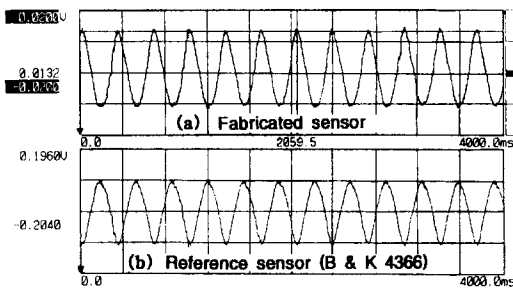


그림 9. 3 Hz, 1.1g의 사인파형 가속도에 대한 소자의 응답특성
 Fig. 9. Output signal to a sine excitation with an amplitude of 1.1g at 3 Hz.

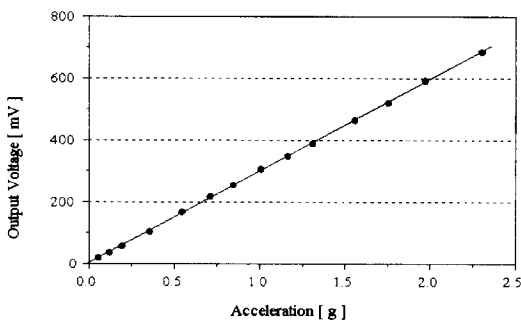


그림 10. 가속도에 따른 출력전압의 변화
 Fig. 10. Output voltage variation with acceleration.

그림 12는 열 충격에 대한 소자의 압저항값을 측정 한 것으로 base 저항값인 3.61 kΩ에 대하여 ±1Ω 변화를 나타내었다. 따라서 저항변화는 약 0.014% 정도로 나타나 가속도센서의 출력 특성에서 범프 본딩으로 인한 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 이때 사용된

Soda-lime glass기판의 열팽창 계수는 $8.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 실리콘의 열팽창 계수는 약 $2.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 이다.

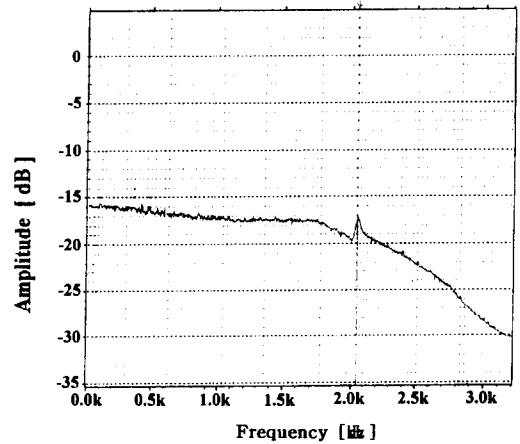


그림 11. 1g 일정한 가속도에서 인가 주파수에 따른 센서의 출력응답
 Fig. 11. Output response as a function of the excitation frequency as measured at a constant excitation of 1 g.

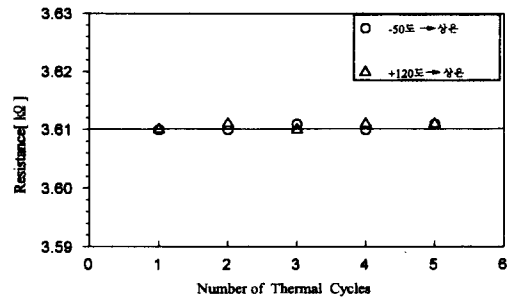


그림 12. 온도에 따른 압저항값의 변화
 Fig. 12. Resistance variation with a number of thermal cycle.

IV. 결 론

(11)면 n/n+/n 3층 구조의 실리콘 웨이퍼를 이용하여 p형 압저항 영역을 형성한 후, 12 wt% HF 용액에서 양극반응시켜 n+층에 다공질 실리콘을 형성하고, 이를 5% NaOH 용액에서 식각하여 브릿지형의 미세구조를 정확히 형성하였다. 그리고 매스 패드와 범프 패드에 Pb/Sn/Ag 솔더 페이스트를 디스펜싱하여 관성질량과 범프를 형성하고 glass 기판에 범프본딩하여 범프 본딩된 4빔형 압저항 가속도센서를 제조하였다. 이때, 제조된 가속도센서의 감도는 743 $\mu\text{V/g}$,

타측감도는 5.2% 이하로 조금 크게 나타났으며 비선형성은 1% 이하로 좋은 특성을 나타내었다. 또한 공진주파수는 설계치 보다 8% 높은 2.04 MHz이었다. 그리고 센서출력에 대한 범프 본딩의 영향을 알아보기 위해 열 충격에 따른 압저항값의 변화를 측정하였다. 이때 base 저항값인 3.61 kΩ에 대하여 약 0.014%의 변화를 나타내어 범프 본딩으로 인한 영향은 거의 없음을 알 수 있었다.

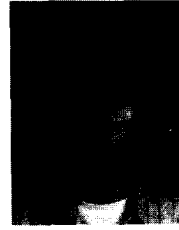
현재까지의 연구 결과를 통하여 다공질 실리콘 마이크로머시닝은 가속도센서와 같은 역학센서에 충분히 적용될 수 있음을 확인하였고, 향후 신뢰성 있는 센서의 개발을 위해서는 센서소자 제조공정과 집적회로 공정기술과의 호환성에 대하여 보다 체계적인 공정검증을 통하여 재현성과 양산성 있는 공정개발에 대한 연구가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] J. C. Greenwood, "Silicon in mechanical sensors," J. Phys. E: Sci. Instrum., vol. 21, pp. 1114-1128, 1988.
- [2] K. E. Petersen, "Silicon as a mechanical material," Proc. IEEE, vol. 70, no. 5, pp. 420-457, 1982.
- [3] J. M. Giachino, "Smart sensors," Sensors and Actuators, vol. 10, pp. 239-248, 1986.
- [4] L. M. Roylance and J. B. Angell, "A batch-fabricated silicon accelerometer," IEEE Trans. Elec. Devices, vol. ED-26, no. 12, pp. 1911-1917, 1979.
- [5] J. T. Suminto, "A simple, high performance piezoresistive accelerometer," Transducers'91, pp. 104-107, 1991.
- [6] K. Yamada, K. Higuchi, and H. Tanigawa, "A novel silicon accelerometer with a surrounding mass structure," Sensors and Actuators, vol. A21-A23, pp. 308-311, 1990.
- [7] H. Seidel, H. Riedel, et al., "Capacitive silicon accelerometer with highly symmetrical design," Sensors and Actuators, vol. A21-A23, pp. 312-315, 1990.
- [8] P. L. Chen and R.S. Muller, "Integrated silicon microbeam PI-FET Accelerometer," IEEE Trans. Elec. Devices, vol. ED-29, no. 1, pp. 27-33, 1982.
- [9] K. E. Bean, "Anisotropic etching of silicon," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-25, no. 10, pp. 1185-1193, 1978.
- [10] 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. 1178-1184, 1978.
- [11] 조찬섭, 심준환, 이종현, "다공질 실리콘 식각법을 이용한 실리콘 미세가공기술," 대한전자공학회 논문지, 제 31 권, A편, 11호, pp. 116-123, 1994
- [12] H. Yamada, Y. Kondoh, and M. Saito, "A fine pitch and high aspect ratio bump array for flip-chip interconnection," Proc. IEEE International Electronic Manufacturing Technology Symposium, pp. 288-292, September. 1992.
- [13] Ray P. Prasad, "Surface Mount Technology Principles and Practice", VNR (VAN NOSTRAND REINHOLD), New York, 1989.
- [14] John H. Lau, "SOLDER JOINT RELIABILITY Theory and Applications", VNR, 1991.
- [15] N. Peteron, "A solder paste dispenser for SMD Assembly," Proceedings of NEPCON /Sest '86, pp. 619-621, Feb. 1986.
- [16] S. S. Manson, "Thermal stress and low cycle fatigue," McGraw-Hill, New York, 1966.
- [17] H. D. Solomon, "Fatigue of 60/40 solder," IEEE Trans. Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, pp. 423-432, Dec. 1986.

저 자 소 개

沈 俊 煥(正會員) 第 31券 A編 11號 參照
 현재 경북대학교 대학원 전자전기공
 학부 박사과정



李 相 昊(正會員)
 1972年 3月 1日生. 1994년 경북대학
 교 전자공학과 졸업(공학사). 1996年
 2月 경북대학교 대학원 전자전기공
 학부 졸업(공학석사). 1996年 3月 ~
 현재 (주)삼성전관 근무. 주관심분야
 는 반도체센서, 회로설계 등임.

李 鍾 玄(正會員) 第 27券 10號 參照
 현재 경북대학교 전자전기공학부 교
 수.