

논문 97-6-01

실리콘 마이크로머시닝과 RIE를 이용한 가속도센서의 제조

김 동 진*, 김 우 정**, 최 시 영**

Fabrication of an acceleration sensor using silicon micromachining and reactive ion etching

Kim Dong Jin*, Kim Woo Jeong**, and Choi Sie Young**

요 약

SDB웨이퍼를 사용한 압저항 형태의 50 G용 가속도 센서를 실리콘 마이크로머시닝을 사용하여 제조하였다. 이 형태의 가속도 센서는 진동하는 사각형의 매스와 4개의 빔으로 구성되어 있다. 이 구조는 RIE를 이용한 건식식각과 KOH 용액을 이용한 습식식각을 이용하여 제조되었다. 정사각형의 보상구조가 매스 가장자리의 언더에칭에 기인하는 변형을 보상하기 위해 사용되었다. 제조된 센서는 인가된 가속도에 대하여 선형적인 출력전압특성을 보여주고 감도는 0에서 10 G까지 약 $88 \mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{g}$ 이었다.

Abstract

A piezoresistive acceleration sensor for 50 G has been fabricated by silicon micromachining method using SDB(silicon direct bonding) wafer. The structure of the piezoresistive acceleration sensor consists of a seismic square pillar type mass and four beams. This structure was fabricated by reactive ion etching and chemical etching using KOH-etchant. The rectangular square structure is used in order to compensate the deformation of the edges due to underetching. The fabricated sensor showed a linear output voltage-acceleration characteristics and its sensitivity was about $88 \mu\text{V}/\text{V} \cdot \text{g}$ from 0 to 10 G.

1. 서 론

실리콘 압저항형 가속도센서는 진동, 충격 및 가속도 등의 물리량을 감지하여 전기적 신호로 변환시키는 센서로서, 집적회로 기술로 제작되므로 정교하고 소형·경량이며, 규격화 및 양산화가 쉽고, 또한 가격이 낮은 장점이 있다. 실리콘 가속도센서는 자동차용 첨단 장비인 서스펜션 시스템(suspension system), 첨단제동

장치(advanced braking system), 조향장치(steering system) 및 각종 안전장치(safety system) 등에 사용된다.⁽¹⁾

이러한 실리콘 가속도센서는 크게 세가지 부분으로 나누어진다. 가속도를 힘으로 변환시켜 받아들이는 미세 기계구조부, 이 힘을 전기적 신호로 바꾸어 주는 변환 소자부 및 정격출력을 만들어 주는 신호 처리부의 세 부분으로 구성된다. 미세 기계구조부의 형태로는 캔틸레버(cantilever)형 구조, 브리지(bridge)형 구조 등이 있으며 캔틸레버 구조는 작은 면적을 차지하는 장

* 만도 기계 중앙연구소(Mando Central Laboratory)

** 경북대학교 전자·전기 공학부(School of Electronic & Electrical Eng., Kyungpook National Univ.)

<접수일자 : 1997년 5월 31일>

점이 있고, 브리지 구조는 구조 자체가 견실하다는 장점이 있다. 변환 소자부에서는 실리콘의 압저항(piezoresistive) 효과^(2,3)와 용량(capacitive)변화를 이용하는 방법 및 압전물질을 이용하는 방법 등이 있다. 용량변화를 이용하는 경우 출력이 비선형적이며 신호처리에 어려움이 있고, 압전물질을 이용하는 경우 제한된 동작온도 등이 문제가 된다. 반면 실리콘 압저항 효과를 이용한 가속도센서는 신호처리가 용이하다는 장점을 가지고 있다.

실리콘 가속도센서의 제작에 있어서 가장 핵심이 되는 기술은 실리콘 미세 기계구조부를 만드는 미세 가공기술이다. 미세 가공기술로는 KOH,⁽⁴⁾ EPW⁽⁵⁾ 및 Hydrazine⁽⁶⁾ 등의 이방성 식각용액을 이용한 실리콘 기판을 3차원적으로 식각하여 단결정 실리콘 미세구조를 제조하는 기판 미세가공(bulk micromachining)법⁽⁷⁾과 기판 산화층 위에 다결정 실리콘 등의 박막을 형성하고 이를 선택적으로 식각하는 표면 미세가공(surface micromachining)법이 있다. 그러나 표면 미세가공법은 단결정 실리콘의 미세 기계구조를 만들 수 없고, 공정이 복잡하다는 단점이 있다. 이와 반대로 이방성 식각용액을 이용한 기판 미세가공법은 단결정 실리콘의 미세 기계구조를 만들 수 있고, 압저항 효과가 우수하며, 또한 표면 미세가공법에 비해 제조공정이 간단하다. 그러나 실리콘 가속도센서의 제작 공정에서 이방성 식각에 긴 시간이 요구되므로 공정상의 많은 문제점이 발생될 뿐만 아니라, 앞면 식각과 전극형성 공정이 서로 상충되어 웨이퍼 단위의 가속도센서 제작이 힘들다.

본 연구에서는 에어백(air-bag)에 사용되는 50 G을 목표로 SOI(silicon on insulator)구조의 4 인치 SDB(silicon direct bonding) 웨이퍼를 이용하여 실리콘 압저항형 가속도센서를 실리콘 미세가공기술로 제조하였다. 제조된 가속도센서의 미세 기계 구조부(mass)를 사각 형태로 하였고, 이러한 입체구조물을 형성하기 위해서 KOH수용액을 이용한 이방성 식각을 행하였다. 이방성 식각 공정시 언더컷팅(undercutting)에 의하여 매스의 가장자리가 뭉개지는 것을 방지하기 위해서 정사각형의 보상구조를 사용하였다. SDB 웨이퍼를 이용하여 습식 식각을 행할 때 가운데 산화막을 식각중지(etch-stop)막으로 사용하였고, 실리콘 산화막(SiO₂)위에 실리콘 질화막(Si₃N₄)을 증착하여 KOH수용액에 대한 식각 마스크로 사용함으로써 공정상의 어려운 문제들을 해결하였다. 또한, 마지막 식각 공정을 건

식 식각(reactive ion etching)을 이용함으로써 공정을 간소화하였다. 모든 공정은 4 인치 웨이퍼 단위로 행하여졌다.

II. 실 험

1. 매스 형성을 위한 이방성 식각

실리콘 이방성 식각은 식각 부분의 뚜렷한 경계와 균일한 다이어프램(diaphragm)을 만들기 쉬울 뿐만 아니라, 식각율이 실리콘 결정면에 의존하여 특정방향으로의 식각이 가능하므로 다이어프램을 형성하기 위해서 등방성 식각보다는 이방성 식각을 많이 이용한다. 이방성 식각에 사용되는 용액은 KOH수용액, EDP수용액, N₂H₂수용액 및 ammoniumhydroxide (TMAH, (CH₃)₄NOH) 등이 있다.

KOH 수용액을 이용한 이방성 식각에서는 실리콘의 결정면에 따른 식각율이 크게 다르며 [100]방향이나 [111]방향보다 식각율이 최고 400배 이상이고, [110]방향보다는 200배 크다고 알려져 있다.^(6,8) 또한, 실리콘과 실리콘 산화막의 식각율은 거의 400:1 정도이므로 선택적 실리콘 식각을 위한 마스크로 사용할 수 있으며 실제 약 450 μm 실리콘 식각에 요구된 산화막의 두께는 약 2 μm이다. 그리고 실리콘 질화막은 KOH 수용액에 거의 식각되지 않은 것으로 되어 있다. 따라서 가속도센서 제작에 사용된 뒷면의 식각마스크로는 산화막 5,000 Å 과 질화막 1,500 Å을 사용하였다.

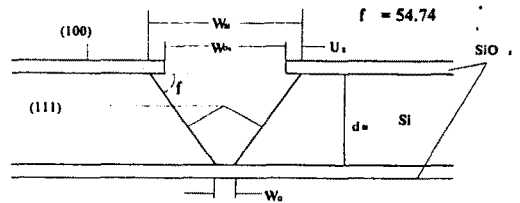


그림 1. 식각된 (100)면의 실리콘 단면도

Fig. 1. Cross sectional view of etched silicon.

이방성 식각에서의 또 다른 문제점은 실리콘 산화막 아래로의 언더컷팅(undercutting)이다. 그림 1은 이방성 식각을 행한 실리콘의 단면도를 나타낸 것인데, 그림 1에 나타낸 것처럼 실리콘 산화막 마스크 아래로 언더컷팅이 나타난다. (100)면과 (111)면이 이루는 각도가

54.74°이고, (100)면이 빠른 속도로 식각되기 때문에 측면보다 밑면으로 빨리 식각된다.⁽⁹⁾ 실리콘 산화막 아래로 식각된 측면 길이는 $U_E = R_{\text{cut}}t/\sin(54.74)$ 이다. 여기서 R_{cut} 은 (111)면의 식각율을 나타내고 t 는 식각시간을 나타낸다. 450 μm 두께의 실리콘을 식각할 때 식각면 한번의 길이는 $W_0 = W_{\text{Si}} - (\sqrt{2} \times 450)$ 이다.

직각모양의 불록한 실리콘 매스를 식각할 때, 언더컷팅에 의해 가장자리가 뭉개어지는 현상이 나타난다. 이 현상은 완전한 직각모양의 불록한 가장자리가 요구되는 미세가공과 관련이 있다. 이러한 직각모양의 가장자리를 보상하기 위하여 그림 2에 나타난 정사각형의 보상구조를⁽¹⁰⁾ 이용하여 가속도센서의 매스를 보상하였다. 실험에 사용된 보상구조의 길이 C 는 식각 깊이인 450 μm 이고 보상구조의 중심은 식각된 면위의 사각 꼭지점이다. 결국 한번이 900 μm 인 정사각형이 보상구조로 사용된다.

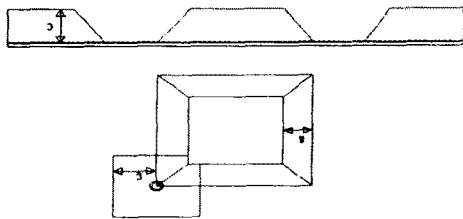


그림 2. 보상구조

Fig. 2. Compensation structure.

2. RIE를 이용한 실리콘 식각

실리콘 이방성 식각 방법으로는 이방성 식각 수용액을 이용한 습식 방법과 플라즈마에 기초를 둔 건식 식각 방법 등이 있다. 플라즈마를 이용한 식각 방법은 금속 전극에 대한 선택성을 가지고 있어서 전극 형성후에 실리콘 식각이 가능하다. RIE는 방향성을 지닌 식각과 정의되어진 형태를 그대로 신뢰성 있게 형성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 건식 식각공정은 SF₆를 이용하여 반응압 150 mtorr, RF power 50 W에서 25 분간 행해졌다. 이때 실리콘의 식각율은 약 4,000 Å/min이다. 앞면으로 10 μm 의 실리콘을 식각한후 다시 뒷면으로 10 μm 의 실리콘을 관통 이방성 식각하였다. 뒷면 식각시에는 관통식각을 행하기 위하여 RF전력 및 DC전압을 높여 사용하였다. 표 1은 RIE 조건을 나타낸다.

표 1. RIE 조건

Table 1. Conditions for reactive ion etching.

	1st front etching	2nd back etching
SF ₆ : Ar	15 sccm : 72 sccm	22 sccm : 80 sccm
Working Pressure	150 mtorr	150 mtorr
RF Power	53 W	73 W
DC Voltage	50 V	100 V
Etch Rate	4,000 Å/min	4000 Å/min

3. 가속도센서의 설계 및 제조

설계된 가속도센서는 4개의 방향에서 지지하는 브릿지형 가속도센서이다. 이 형태는 캔틸레버형보다 나은 선형응답 특성을 가지고 뒤틀림 및 전단 응력의 영향을 감소시키는 장점을 가지고 있다.⁽¹¹⁾ 그리고 가속도센서는 에어백(air-bag)에 사용되는 50 G용을 목표로 설계되었고 아래쪽 매스의 크기는 다음의 식 (1)에 의해 결정되었다.

$$M \geq 2C + \left(2 \times \frac{d_{\text{Si}}}{\tan 54.74} \right) \tag{1}$$

M 은 아래쪽 매스 한번의 길이, C 는 매스의 보상구조 길이, d_{Si} 는 식각깊이이다. 표 2는 가속도센서의 파라미터들이다.

표 2. 설계한 가속도 센서의 파라미터

Table 2. Parameters of the designed acceleration sensor

Parameter	Value
Mass	1.92 mg
Beam length	560 μm
Beam width	200 μm
Beam thickness	10 μm
Compensation structure C	450 μm

그림 3은 가속도센서의 제조공정을 나타낸 것이다. 매스를 형성하기 위하여 웨이퍼 뒷면 450 μm 두께의 실리콘을 이방성 식각하는데 요구되는 열산화막(SiO_2)의 두께는 2 μm 정도이다. 그러나 앞면의 경우 산화막이 2 μm 이상이 되면 산화막 성장과정 뿐만 아니라 사진 식각 공정에도 많은 문제가 발생한다. 또한, 앞면과 뒷면 산화막의 두께를 달리하는 경우 양면의 산화막 두께차로 인하여 산화막 식각이 어렵게 된다. 따라서 이러한 공정상의 문제점을 해결하기 위하여 저압기상증착법(LPCVD)을 이용하여 실리콘 질화막(Si_3N_4)을 뒷면에만 증착한다. 실리콘 질화막은 KOH 수용액에 식각이 되지 않으므로 먼저 SDB 웨이퍼의 양면에 열산화막을 5,000 Å 정도 성장시킨 후 뒷면에만 저압기상증착법(LPCVD)으로 1,500 Å 두께의 실리콘 질화막을 증착하였다. 양면 사진식각 공정을 행하여 앞면과 뒷면에 각각 저항 및 매스 등의 패턴을 형성하였다. 뒷면의 질화막은 건식 식각을 이용하여 식각한 후 BHF를 이용하여 양면 실리콘 산화막을 식각한다. 앞면에는 저항이 형성될 부분의 실리콘 산화막을 제거한후 이온주입법을 이용하여 저항을 형성하는데, 이는 웨이퍼 전면에 대해 균일한 저항을 형성시키고 또한 정확한 불순물량을 주입할 수 있다. 이때 형성된 면저항은 100 Ω/\square 정도이고 저항 형성이 끝나면 앞면에 저압기상증착법에 의한 1,500 Å 정도의 실리콘 질화막을 증착시켰다. 이 실리콘 질화막은 뒷면 식각 공정시 앞면의 식각을 막기 위해 사용된다. 매스를 형성하기 위해 450 μm 두께의

뒷면 실리콘 식각공정을 83 °C에서 20 %의 KOH 수용액으로 4 시간에 걸쳐 행하였다. 이때 SOI구조의 SDB 웨이퍼 중앙에 있는 1 μm 산화막을 KOH 수용액의 식각에 대한 식각중지막으로 사용하여 빔 두께의 정확하게 조절할 수 있었다. 사진식각법을 이용하여 전극 접촉부의 실리콘 산화막을 제거하고 알루미늄 박막을 진공증착하여 전극을 형성하였다. 그리고 빔을 제외한 나머지 앞면 다이아프램 20 μm 를 제거하기 위한 건식식각 공정에 대한 식각 마스크로 양각 감광액을 사용하였다.

III. 측정 및 결과

1. 미세구조의 형성

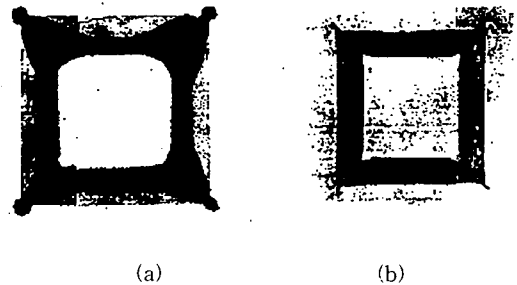


그림 4. 매스의 형태들
Fig. 4. Mass configurations.

본 실험에서는 정사각형 보상구조를 이용하여 정사각형의 매스를 형성하였다. 실험을 통하여 보상구조는 식각용액, 식각온도, 식각깊이 및 식각시간 등에 따라 달라져야 함을 알 수 있었다. 보상구조는 일정한 크기로 하였고 식각온도와 KOH 식각 수용액의 농도를 변화시켜 보상에 적절한 식각 조건을 조사하였다. 동일한 보상구조를 이용하였지만 그림 4(a)에서는 가장자리가 제대로 보상되지 않음을 보여주고 그림 4(b)는 적절한 조건하에서 보상이 제대로 이루어진 경우이다.

2. 측정

그림 5는 측정에 사용된 출력전압 증폭 회로도를 나타내었다. 실리콘 압저항형 가속도센서의 빔위에 형성되어 있는 각각의 저항은 1.1 k Ω 정도의 값을 가진다. 브릿지형태의 저항에 전압을 인가하였을때 동일한 저항값에 의해 브릿지에서의 출력 전압은 0이 되어야 한

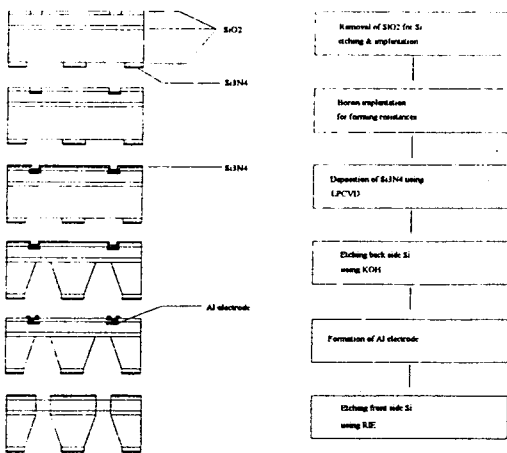


그림 3. 실리콘 가속도센서의 제조 공정도
Fig. 3. Process sequence for the fabrication of Si accelerometry sensor.

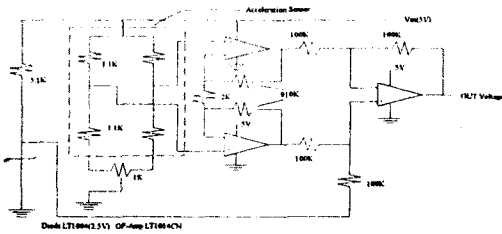


그림 5. 출력전압 증폭 회로도
Fig. 5. Output voltage amplification circuit.

다. 그러나 실제 만들어진 소자에서 각 범위의 저항값에 작은 차이가 있으므로 오프셋 전압을 0으로 하기 위하여 가변저항을 첨가하였다. 증폭 회로는 브릿지 저항에서의 출력전압을 120배정도로 증폭한다.

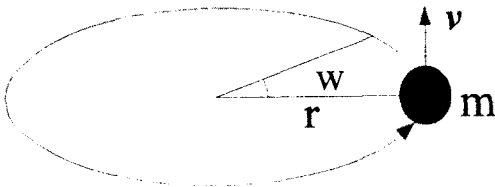


그림 6. 원운동하는 질량 m에 작용하는 구심력
Fig. 6. Centripetal force acting on mass m in circular motion.

가속도센서의 가속도에 대한 응답특성은 회전가속도를 이용하여 측정할 수 있다. 그림 6에서 나타난 것처럼 가속도센서를 회전시키는 경우, 회전 운동하는 물체가 받는 힘과 가속도는 다음의 식들로 표현된다. 회전가속도에 의한 출력전압 변화를 조사함으로써 센서의 감도를 조사하였다. 여기서, m은 매스의 질량, r은 회전 반경, ω는 각속도, rpm은 분당 회전수를 나타낸다.

$$F = ma = mr\omega^2 \quad (2)$$

$$a = r\omega^2 \quad (3)$$

$$a = r \left(\frac{2\pi(\text{rpm})}{60} \right)^2 \quad (4)$$

$$g = r \frac{\left(\frac{2\pi(\text{rpm})}{60} \right)^2}{9.8} \quad (5)$$

3. 가속도센서의 특성

가속도센서의 특성을 조사하기 위하여 먼저 브리지를 구성하고 있는 각각의 저항을 HP4145B를 이용하여 측정하였다. 브리지를 구성하고 있는 2개의 종저항과 2개의 횡저항은 각각 1.1kΩ으로 측정되었고 오차는 ±5%였다.

설계된 가속도센서의 매스 질량은 1.92 mg이었으나 실제 제작된 매스의 질량은 미세질량 저울을 이용하여 측정한 결과 약 1.70 mg으로 나타났다. 가속도에 대한 센서의 감도는 다음 방법으로 측정하였다. 가속도센서를 수평으로 놓았을 때의 출력을 offset 전압으로 하고 수직으로 세웠을 때의 출력 전압을 측정하여 중력 가속도(1 G)에 대한 센서의 감도를 조사하였다. 증폭도는 약 120 배이고 감도는 88μV/V · G로 나타났다. 가속도센서의 파라미터를 표 3에 나타내었다. 그림 7은 회전체 위에 가속도센서를 고정시키고 회전가속도를 이용하여 1 G에서 10 G까지의 가속도에 대한 가속도센서의 응답특성을 나타내고 있다. 비록 50 G로 설계했으나 측정장비의 한계로 10 G이상에서는 장비의 흔들림 때문에 측정할 수가 없었다.

표 3. 가속도센서의 파라미터들
Table 3. Parameters of acceleration sensor.

구 분	측 정 값
매 스	1.70 mg
면저항	92 Ω/□
횡저항	1.1 kΩ ± 5 %
종저항	1.1 kΩ ± 5 %

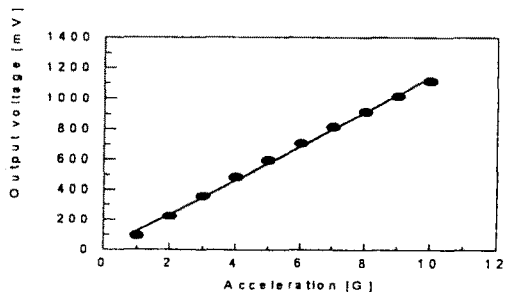


그림 7. 가속도에 대한 출력전압 특성
Fig. 7. Output voltage-acceleration characteristics from 1 G to 10 G.

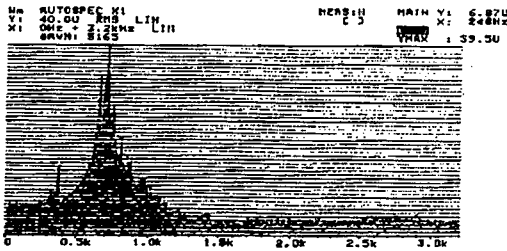


그림 8. 가속도센서의 주파수에 대한 출력 전압 특성
Fig. 8. Output voltage-frequency characteristics of the acceleration sensor.

그림 8은 10 Hz에서 2 kHz까지의 주파수 범위에서 측정된 가속도 센서의 출력전압을 나타낸 것이다. 여기서 공진은 약 700 Hz부근에서 일어남을 알 수 있다.

IV. 결 론

지금까지 많은 방법으로 실리콘 가속도센서가 제조되었으나 제조 공정 자체가 어렵고 복잡하였을 뿐만 아니라 소자특성의 재현성이 문제가 되었다. 본 연구에서는 SDB 웨이퍼를 이용하여 4빔 브리지 압저항형 가속도센서를 제조하여, 보다 재현성 있고 간소화된 웨이퍼 단위의 제조 공정 방법을 제시하였고 제조된 가속도센서의 특성을 조사하였다.

KOH 식각 수용액을 이용한 이방성 식각과 정사각형 보상 구조의 정량화된 매스를 제조하였고, 식각 마스크 물질로 실리콘 질화막 및 RIE 식각을 이용하여 가속도센서의 공정을 간소화시킴으로써 복잡한 제조 공정을 통하여 일어날 수 있는 센서의 특성저하를 최소화시켰다.

본 연구에서 제조한 가속도센서의 특성은 가속도에 의한 저항변화로 검출되는 출력전압을 측정하여 가속도에 대한 응답특성, 감도 및 주파수특성 등을 조사하였다. 센서의 감도는 0~10 G 범위의 가속도에 대하여 $88 \mu V/V \cdot g$ 로 나타났고 출력전압 특성도 거의 선형적으로 나타났다. 주파수에 관한 특성은 약 700 Hz에서 공진이 일어났으며, 본 연구에서 제조한 센서는 300 Hz까지 사용 가능한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] G. A. Macdonald, "A Review of Low Cost Accelerometers for Vehicle Dynamics", *Sensors and Actuators*, vol. 21-23, pp. 303-307, 1990.
- [2] K. Suzuki, H. Hasegawa and Y. Kanda, "Origin of the Linear and Nonlinear Piezoresistance Effects in p-Type Silicon," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 26, no. 7, pp. 1031-1033, 1987.
- [3] Y. Kanda, "A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-29, no. 1, pp. 64-70, 1982.
- [4] E.D. Palik, V.M. Bermudez and O.J. Glembocki, "Ellipsometry study of orientation-dependent etching of silicon in aqueous KOH," *J. Electrochem Soc.: Solid-State Science and Technology*, vol. 132, no. 4, pp. 871-884, 1985.
- [5] X.P. Wu, Q.H. Wu and W.H. Ko, "A study on deep etching of silicon using ethylene-diamine-pyrocatechol-water," *Sensors and Actuators*, vol. 9, pp. 333-343, 1986.
- [6] M. Mehregany et al., "Anisotropic etching of silicon in hydrazine," *Sensors and Actuators*, vol. 13, pp. 375-390, 1986.
- [7] 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.
- [8] K. E. Peterson, "Silicon as a mechanical material", *IEEE Proc.*, vol. 70, no. 5, pp. 420-457, 1982
- [9] 조삼재, "KOH수용액을 이용한 실리콘 다이아프램의 제작", 경북대 석사학위논문, pp. 15-16, 1987.
- [10] 손병복, 최시영, "실리콘 압저항형 가속도센서를 위한 사각뿔 형태의 Mass 보상", *센서학회지*, 제 4권, 제1호, pp. 155-158, 1993.
- [11] 조찬섭, "다공질 실리콘을 이용한 마이크로머시닝과 가속도센서의 제조", 경북대 박사학위논문, 1994.

著 者 紹 介

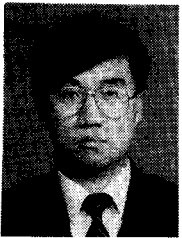


김 동 진

1971년생. 1994년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1996년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업. 1996년 ~ 현재 만도기계 중앙연구소 연구개발 1실 근무 중. 주관심 분야 : 가속도 센서.

최 시 영

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



김 우 정

1966년생. 1990년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1992년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업. 1992 ~ 1997년 만도기계 중앙연구소 근무. 1997 ~ 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주관심

분야 : 압력센서, 가속도센서.