

HF 양극반응을 이용한 단결정 실리콘 미세구조의 제조

曹贊燮*, 沈俊煥*, 李錫洙*, 李鍾鉉**

Fabrication of Single-Crystal Silicon Microstructure by Anodic Reaction in HF Solution

Chan Seob Cho, Jun Hwan Sim, Seok Soo Lee, and Jong Hyun Lee

요 약

실리콘 기판을 HF용액 내에서 양극반응을 시켜 electropolishing법 또는 PSL 형성법으로 센서와 actuator에 유용한 다양한 모양의 실리콘 미세 기계구조를 제조하였다. 미세구조는 시편의 결정면에 관계없이 형성되었으며, 저농도 도핑된 단결정 실리콘이다. n^+/n 실리콘 시편을 HF용액(20-48%)내에서 양극반응시켜 n^+ 영역에 선택적으로 PSL을 형성하였으며, HF농도, 반응전압 및 반응시간에 따른 PSL 형성의 특성을 조사하였다. n^+ 영역에만 PSL이 형성되었으며 PSL의 다공도는 HF 농도의 증가에 따라 감소하였으며, 반응전압에는 무관하였다. $n/n^+/n$ 형 구조를 이용하여 미세구조를 제조한 경우, 식각된 실리콘 표면이 균일하고 cusp가 제거되었으며, 미세구조의 두께는 전 영역을 통하여 n-epi.층의 두께로 일정하였다. HF용액(5 wt%)에서의 양극반응과 planar기술을 이용하여 가속도센서를 제조하여 기존의 IC 공정기술과 함께 사용이 가능함을 확인하였다. 또 모터의 회전자, 기어 등의 미세 기계구조를 PSL 형성법으로 제조하고 SEM 사진으로 조사하였다.

Abstract

Some silicon micromechanical structures useful in sensors and actuators have been fabricated by electropolishing or porous silicon formation technique by anodic reaction in HF solution. The microstructures were lightly doped single crystal silicon and the formation was isotropic, independent of crystal directions. Porous silicon layer(PSL) was formed selectively in n^+ region of n^+/n silicon structure by anodic reaction in concentrated HF(20-48%) solution. Characteristics of the formed PSL were investigated along with change of the reaction voltage, HF concentration and the reaction time. PSL was formed only in n^+ region. The porosity of the PSL was decreased with the increase of HF concentration and independent of reaction voltage.

For the case of $n/n^+/n$ structures, the etched surface of silicon was fairly smooth and a cusp was not found. The thickness of the microstructures was the same as that of the epitaxial n-Si layer and good uniformity. We have fabricated acceleration sensors by anodic reaction in HF solution(5 wt%) and planar technology. The process was compatible with conventional IC fabrication technique. Various micromechanical structures, such as rotors of motor, gears and linear actuator, were also fabricated by the technique and examined by SEM photographs.

I. 서 론

압력이나 가속도를 측정하는 실리콘 마이크로 센

서는 diaphragm, bridge 또는 cantilever 등의 실리콘 미세구조를 이용하여 가해지는 힘을 저항의 변화^[1] 혹은 용량의 변화^[2]로 감지한다. 이러한 단결정 실리콘 미세구조를 이용한 센서는 단결정 실리콘의 기계적 성질이 매우 우수하고,^[3,4] 센서의 감지부와 신호처리를 위한 주변회로를 하나의 칩위에 집적하여 smart화 할 수 있는 장점이 있다.^[5] 또 실리콘 집적회로 제

* 慶北大學校 電子工學科
(Dept. of Electronics, Kyungpook Nat'l Univ.)
** 正會員: 慶北大學校 電子工學科
(Dept. of Electronics, Kyungpook' Nat'l Univ.)
<접수일자: 1992년 6월 30일>

조공정기술을 사용함으로써 센서를 소형, 경량화 할 수 있을 뿐만 아니라 감도, 재현성, 신뢰성 및 양산성에 있어 많은 장점이 있다.^[4-6]

Diaphragm, cantilever 등을 만드는 실리콘 미세가공기술(micromachining technique)은 실리콘 마이크로센서를 제조하는 가장 중요한 기술로 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 이 방법은 표면 미세가공(surface micromachining)법^[7]과 기판 미세가공(substrate micromachining)법^[8,9]이 있으며, 이중 기판 미세가공은 KOH,^[10] EPW(ethylenediamine-pyrocatechol-water),^[11] Hydrazine^[12] 등의 이방성 식각용액으로 실리콘 기판의 뒷면을 식각하여 단결정 실리콘 미세구조를 제조한다. 그러나 이방성 식각용액을 이용한 기판 미세가공법은 식각시간이 길고 식각면의 방향이 제한되는 단점이 있으며, 실리콘 뒷면을 식각하기 때문에 양면 mask 작업이 필요하고 이에 의한 정합 오차가 발생하여 미세구조의 소형화와 양산성에 기술적 어려움이 크다.

본 연구실에서는 다년간 FIPOS(full isolation by porous oxidized silicon) 기술^[13]에 대하여 연구하여 왔다.^[14-17] 이 FIPOS 기술은 양극반응에 의한 다공질 실리콘층(PSL: porous silicon layer)의 선택적 형성이 그 기본이 된다.^[18] 양극반응으로 형성된 PSL은 표면적이 bulk 실리콘 보다 수 백배나 크고, 표면 결합상태가 불안정하여 bulk 실리콘에 영향을 주지 않고 5 wt% NaOH 수용액에서 PSL만 쉽게 식각할 수 있다.^[14] 본 연구에서는 첫째로 n 실리콘 웨이퍼에 n⁺층을 형성하여 양극반응시켜 n⁺층의 PSL 형성특성을 조사하고, 둘째로 n/n⁺/n구조의 실리콘을 양극반응시켜, n⁻영역에 선택적으로 다공질 실리콘층의 형성, 또 electropolishing 방법으로 다양한 형태의 cantilever, bridge형의 미세구조를 제조하는 실리콘 식각기술에 대하여 연구하였다. 또 이 기술을 이용하여 힘센서에 응용되는 각종 미세구조와 motor, linear actuator 및 치차모형을 제작하고 임의 모양의 실리콘 미세기체구조가 쉽게 제조될 수 있음을 보였다.

II. n⁺/n 시편의 PSL 형성 특성

단결정 실리콘 기판을 HF용액(20-50 wt%)속에 넣고 백금전극을 통하여 전류를 흘리면서 양극반응시키면 기판 표면에 수십-수백 Å 정도의 미세기공

(pore)을 포함하는 PSL을 형성시킬 수 있다. PSL을 형성하기 위한 양극반응은 실리콘 표면에서의 정공의 공급에 의하여 제어되며^[19] HF 농도, 반응전압, 전류밀도 등의 반응조건 및 시편의 종류, 불순물 도핑 농도에 따라 PSL 형성특성이 변하게 된다. 저농도 불순물이 도핑된 n형 실리콘의 경우 인가된 전압에 의해 실리콘과 용액계면의 접촉 전위차는 높아지고 또한 반도체내의 정공은 거의 없어 양극반응에 필요한 정공이 공급되지 않아 반응이 일어나지 않는다.^[20] 그러나 불순물 도핑농도가 높아지면 반도체 계면에서의 공핍영역 폭은 좁아져 작은 전압을 인가해도 고전계가 형성된다. 이로 인하여 공핍영역에서 zener breakdown에 의해 전자-정공쌍(EHP)이 생성되고, 정공이 양극반응에 기여하게 되어, 저 전압 영역에서도 양극반응이 일어나 pore가 형성된다.^[21] 따라서 n 실리콘에서의 PSL 형성은 불순물 도핑농도에 의해 임계 반응전압이 결정되며, 불순물 도핑농도가 증가하면 임계 반응전압은 감소한다.

n(100), 저항률 1-20Ω·cm인 실리콘 기판위에 인을 950°C에서 10분간 선풍산시킨후 10:1 BHF(buffered HF) 용액에서 PSG(phosphosilicate glass)를 제거하였다. 1100°C에서 30분간 건조 산소 분위기로 후확산을 시킨후 1100°C에서 200분간 질소 분위기에서 열처리하여 3.5μm 정도의 n⁺ 영역을 형성하여 n⁺/n 구조를 형성하여 양극반응 시켰다.

그림 1은 PSL 제조에 사용된 양극반응 장치도이

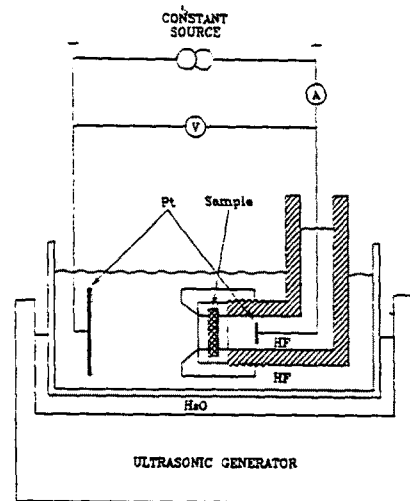


그림 1. 양극반응 장치도

Fig. 1. A schematic diagram of anodic reaction equipment.

다. 반응 장치는 화학적으로 안정한 테프론으로 제작되었으며, 두개의 백금전극을 통하여 정전류와 정전압을 공급하였다. 시편의 뒷면에 Al을 증착하여 전극으로 사용하는 방법도 있으나, 본 실험에서는 균일 전장을 얻기 위해 그림과 같이 HF용액 접촉방법을 이용하였다. 이는 공정이 간단하며 기관의 오염을 막을 수 있다는 장점이 있다. 또한 반응 과정 중에 발생하는 수소가스를 시편의 표면으로부터 제거하기 위해 초음파 발생기를 사용하였다.

그림 2는 약 3.5 μm 두께의 n⁺ 층을 가진 시편을 48% HF, 3.5와 5V의 반응전압에서 반응시간에 따른 PSL의 두께를 나타낸 그림이다. PSL 두께는 반응시간에 따라 증가하며, 반응전압이 3.5V에서 100초, 5V에서 40초 만에 반응이 완료되었음을 볼 수 있다. 이는 반응전압이 높은 경우 전류가 증가하여 양극반응에 필요한 정공의 공급이 많아져 반응이 빨리 일어난 결과이며, n⁺ 영역이 완전히 PSL화 되면 역방향 항복에 의한 정공의 공급은 중지되고 n형 영역은 반응이 일어나지 않는 자동정지(self-stop)^[22]가 일어나기 때문이다. 반응전압이 5V이하이면 n 실리콘층에는 PSL 형성이 되지 않으나 반응전압이 10V 정도로 높아지면 n 실리콘의 공핍층에서도 역방향 항복이 일어나 PSL이 형성된다.

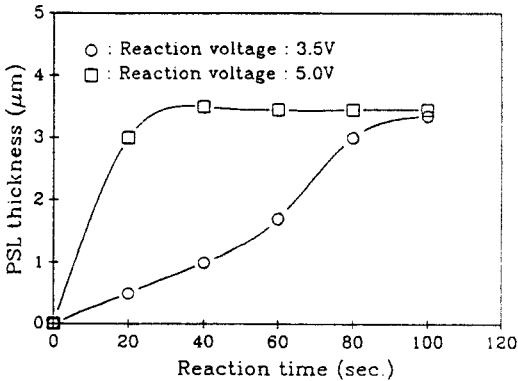


그림 2. n⁺/n형 시편의 반응시간에 따른 PSL의 두께변화

Fig. 2. PSL thickness vs. reaction time of n⁺/n sample.

그림 3은 n⁺의 농도가 10¹⁹cm⁻³ 범위의 시편을 48% HF 용액에서 양극반응시킨 시편의 다공도(porosity)^[17]를 나타낸 것이다. 다공도 P_p는 양극반응에 의해서 용해된 실리콘의 무게(ΔW₁₂)와 다공질 실리콘 영역의

반응전 무게(W_{sil})의 비이며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_p \equiv \frac{\Delta W_{12}}{W_{sil}} \equiv \frac{\Delta W_{12}}{W_{12} + (\Delta W_{23})}$$

여기서 ΔW₂₃은 양극반응으로 형성된 다공질 실리콘의 무게를 나타낸다. n⁺ 실리콘의 다공도는 반응전압에 따라 무관하며 약 30%를 나타낸다.

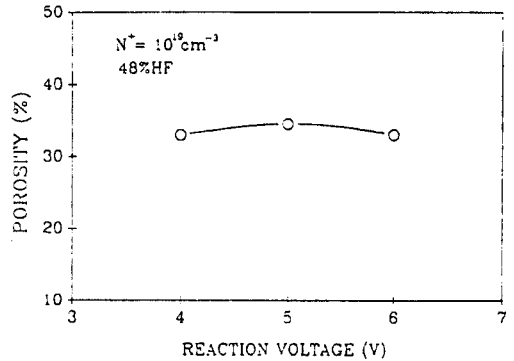


그림 3. n⁺/n형 시편의 반응전압에 따른 PSL의 다공도

Fig. 3. Porosity vs. reaction voltage of n⁺/n sample.

그림 4는 반응전압 3.5V에서 HF 용액의 농도에 따른 다공도의 변화를 나타낸 것이다. HF 농도가 증가함에 따라 다공도가 감소하였으며, 반응전류는 증가하였다.

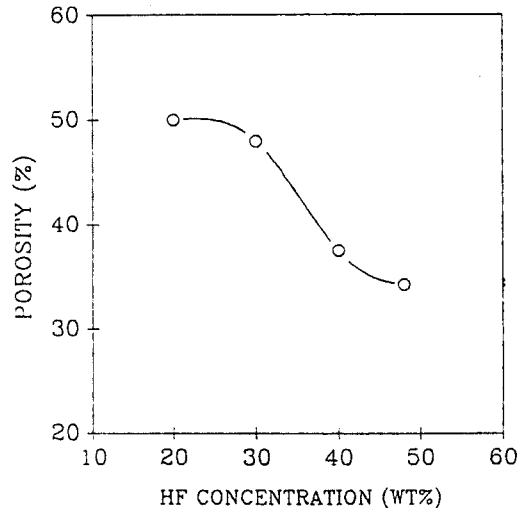


그림 4. n⁺/n형 시편의 HF 농도에 따른 PSL의 다공도

Fig. 4. Porosity vs. HF concentration of n⁺/n sample.

III. HF 양극반응을 이용한 미세구조의 제조

1. PSL 형성법을 이용한 미세구조 공정

$n/n^-/n$ 3층구조를 이용하여 PSL 형성법으로 미세구조를 제조하는 공정의 단면도를 그림 5에 나타내었다. 결정면이 (111)이고, 저항을 $5\Omega \cdot \text{cm}$ 인 n 형 실리콘기판에 인을 확산시켜 n^- 층을 확산하고, 저항율이 $10\Omega \cdot \text{cm}$ 인 실리콘 epi.층을 $5\mu\text{m}$ 성장시켜 $n/n^-/n$ 구조를 형성하였다. 이 때 제조된 시편의 분산저항 및 농도분포 측정 결과는 그림 6과 같다. 미세구조가 될 부분을 남겨 놓고 n 층을 실리콘 식각용액($\text{HNO}_3 : \text{HF} = 98 : 2$)을 사용하여 식각시켜 n^- 층을 노출시킨 후, 고농도 HF 용액(48 wt%), 반응전압 5V, 8분간 양극반응시켜 n^- 층에 PSL을 형성하였다. 마지막으로 PSL을 NaOH 수용액(5 wt%)에서 식각하여 미세구조를 형성하였다. 이의 상세한 공정조건을 표 1에 나타내었다.

표 1. PSL 형성법을 이용한 미세구조의 제조공정 조건

Table 1. Process conditions of microstructure fabrication by the PSL formation technique

| Process | Condition |
|------------------------|---|
| Substrate | n -type (111), $5\Omega \cdot \text{cm}$ |
| n^- diffusion | phosphorous, $X_j = 15\mu\text{m}$ |
| n epitaxy | $\rho = 10\Omega \cdot \text{cm}$, $t = 5\mu\text{m}$ |
| Wet oxidation | 1000°C , 30 min. |
| PR process | microstructure define |
| SiO_2 etching | 20°C , BHF($\text{HF} : \text{NH}_4\text{F} = 1 : 6$) |
| n etching | 98 $\text{HNO}_3 + 2\text{HF}$, 10 min. |
| PSL formation | 48% HF, $V = 5\text{V}$, 8 min. |
| PSL etching | 5 wt% NaOH, 1 min. |

그림 7은 (111)면, $n/n^-/n$ 3층 구조를 이용하여 PSL 형성법으로 제조한 여러가지 미세구조의 주사형 전자형미경 사진이다. 그림 7(a)는 두께 $4\mu\text{m}$, 폭 $50\mu\text{m}$, 길이 $50-500\mu\text{m}$ 인 cantilever의 SEM 사진이다. 식각된 실리콘 표면이 균일하고 cusp^[20]가 없으며 균일한 두께를 가지는 완전한 beam arrays가 형성되었음을 보이고 있다. 또한 미세구조의 두께는 n -epi.층의 두께와 일치한다. 이는 n^- 영역에만 PSL이 형성되

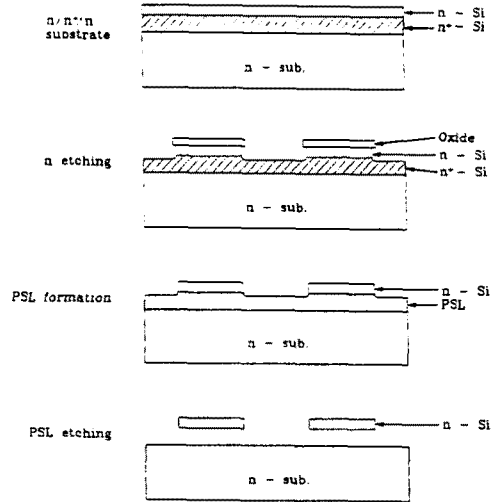


그림 5. PSL 형성법을 이용한 미세구조의 제조공정도

Fig. 5. Process of microstructure fabrication by the PSL technique.

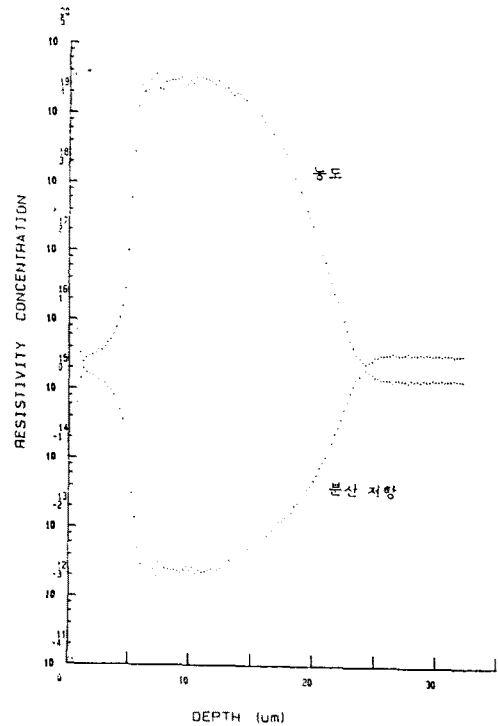
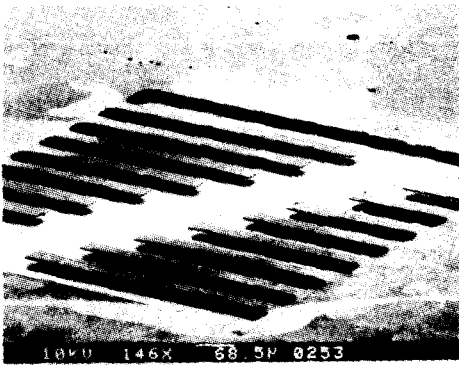
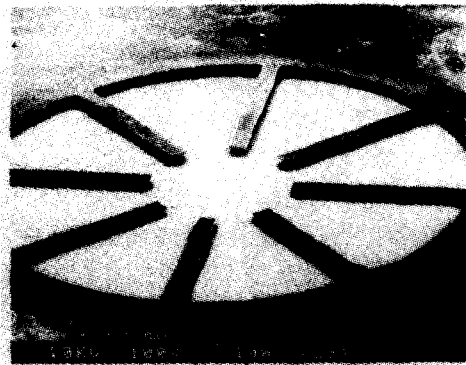


그림 6. $n/n^-/n$ (111) 실리콘의 깊이 따른 분산저항 및 농도분포

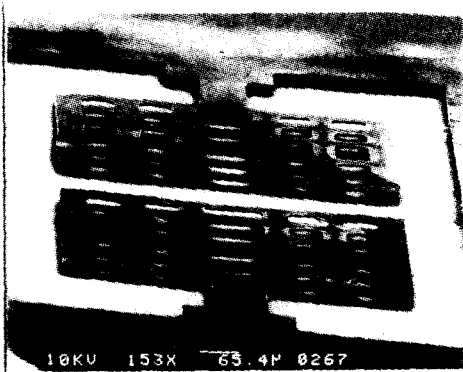
Fig. 6. Distribution of resistance and concentration according to the depth of $n/n^-/n$, (111) silicon sample.



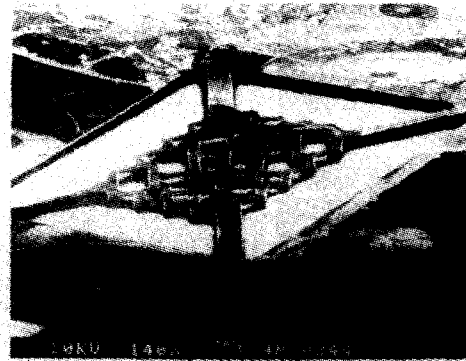
(a)



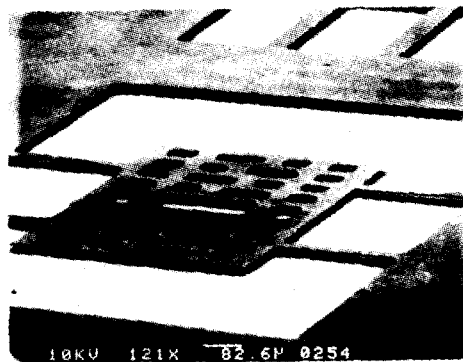
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

그림 7. PSL 형성법으로 제조된 미세구조의 SEM 사진
Fig. 7. SEM photograph of microstructures by PSL formation technique.

고, n^- 영역이 완전히 PSL화 되면 양극반응이 정지되는 자동정지가 일어났기 때문이다.

그림 7(b) 및 (c)는 폭 50 μm , 길이 500 μm 인 cantilever들을 원형으로 배열한 구조와 cantilever 끝부분에 임의의 질량이 있는 미세구조의 SEM 사진이다. Cantilever 끝부분에 질량이 있는 경우에도 완전한 형태를 보존하고 있으며, 원형으로 배열된 cantilever는 원의 형태를 그대로 유지하고 기관의 결정방향에 무관하여 임의 형상의 미세구조를 설계된 그대로 제조할 수 있다. 이것은 반응전압 5V에서의 PSL 형성시 저농도 도핑된 n 형 영역은 반응이 되지 않는 완전한 선택성을 가지며, 양극반응은 방향성에 무관한 등방성이기 때문이다. KOH, EPW 등의 이방성 식각용액을 사용하는 경우에는 미세구조를 설계할 때 미세구조의 방향이나 모서리에서의 식각에 따른 오차를 보정할 여분의 영역을 고려하여 설계 하여야 하며 구조의 제한성이 많다. 그러나 사진에서 보는 바와 같이 PSL 형성법을 이용한 미세가공은 미세구조의 방향이나 모서리에서의 식각에 따른 오차를 보정할 여분의 영역을 고려할 필요가 없으므로 미세구조의 설계가 용이하며, 구조나 방향의 제한성이 없는 특성이 있어 특히 여러방향의 미세구조를 한 칩상에 제조할 수 있는 장점이 있다.

그림 7(d)-(f)는 4개의 beam으로 임의의 질량을 지지하는 bridge 구조의 SEM 사진이다. 4개의 지지대에 연결된 mass는 설계된 모양대로 완전하게 유지되며, 식각된 실리콘 표면은 균일하고 미세구조의 두께가 전 영역을 통하여 약 4 μm 로 일정하다. KOH 등을 이용한 식각법에서는 미세구조의 두께를 조절하는 방법으로는, 식각시간에 의한 두께조절, p-n접합에 의한 전기화학적 식각에 의한 두께조절, 또는 미세구조를 $10^{20}/\text{cm}^3$ 이상으로 고농도 도핑시켜 두께를 조절하는 방법이 이용된다.^[23-25] 시간에 의한 두께조절은 식각용액의 온도, 조성비가 시편을 식각하는 동안 정확하게 유지되어야 하며, 전기화학적 방법은 측면방향 전위의 변화가 일어나지 않도록 전극을 설계하여야 하고, 도핑농도에 의한 방법은 미세구조가 고농도로 도핑되기 때문에 다른 소자의 제조가 어려운 단점이 있다. 그러나 양극반응에 의한 미세구조의 제조법은 식각시간이 수십분 이내로 짧고, 상온에서 식각하기 때문에 식각시 용액의 조성과 온도제어가 용이하다. 또한 고농도 도핑영역에서만 양극반응이 일어나기 때문에 n 실리콘 epi.층 두께를 조절하여

미세구조의 두께를 정확히 제어할 수 있으며, 저농도 도핑된 단결정 실리콘 미세구조를 제조할 수 있다.

2. Electropolishing법을 이용한 미세구조 공정

양극반응시 반응 전류밀도가 증가함에 따라 pore의 직경이 증가하게 되며, PSL 형성법의 한계 전류밀도 이상이 되면 실리콘에는 electropolishing이 일어나게 된다.^[26,27] 또한 electropolishing을 위한 임계 전류밀도는 HF농도가 감소함에 따라 작아지게 된다. 따라서 본 실험에서는 실리콘 표면보호를 위해 증착한 Si_3N_4 막의 식각이 일어나지 않도록 5 wt%의 저농도 HF용액에서 200 mA/cm^2 이상의 전류밀도로서 양극반응하여 n^+ 실리콘을 electropolishing 하였으며, 예비실험을 통하여 적정조건을 구하였다.

그림 8은 electropolishing법으로 미세구조를 제조하는 공정단면도를 나타낸 것이다. 결정면이 (100), (111)인 $n/n^+/n$ 3층구조의 실리콘 웨이퍼를 사용하였으며, 양극 반응시 표면실리콘의 보호를 위해 LP-CVD(low pressure chemical vapor deposition)법으로 약 1000Å 정도의 Si_3N_4 막을 증착하였다. 미세구조를 정의한 mask를 사용하여 positive PR(photo resistor)을 이용하여 PR 작업을 한 후 플라즈마 식각장치에서 Si_3N_4 막을 식각하였다. 노출된 n 실리콘 영역을 습식 식각으로 약 6 μm 정도 식각하여 n^+ 층을 노출시켜 저농도 HF용액에서 25 mA의 전류를 흘려 15분간 양극반응시켜 미세구조를 형성하였다. 이의 제조공정 조건을 표 2에 나타내었다.

표 2. Electropolishing법에 의한 미세구조의 제조공정 조건

Table 2. process conditions of microstructure fabrication by the electropolishing technique

| Process | Condition |
|------------------------------------|---|
| Substrate | n-type (111), $5\Omega \cdot \text{cm}$ n-type (100), $5\Omega \cdot \text{cm}$ |
| n^+ diffusion | phosphorous, $X_1=5 \mu\text{m}$ |
| n epitaxy | $\rho=10\Omega \cdot \text{cm}$, $t=5 \mu\text{m}$ |
| Si_3N_4 deposition | LPCVD, 800°C , $t=1000\text{A}$ |
| PR process | microstructure define |
| Si_3N_4 etching | RF power 50 Watt, $\text{CF}_4/\text{O}_2(10\%)$, 500 mTorr, 4 min. |
| n etching | 98 $\text{HNO}_3 + 2\text{HF}$, 6KOH(6N)+1 Isopro- 22°C, 10 min. phanol, 60°C , 17 min. |
| Electropolishing | 5 wt% HF, $I=25 \text{mA}$, 15 min. |

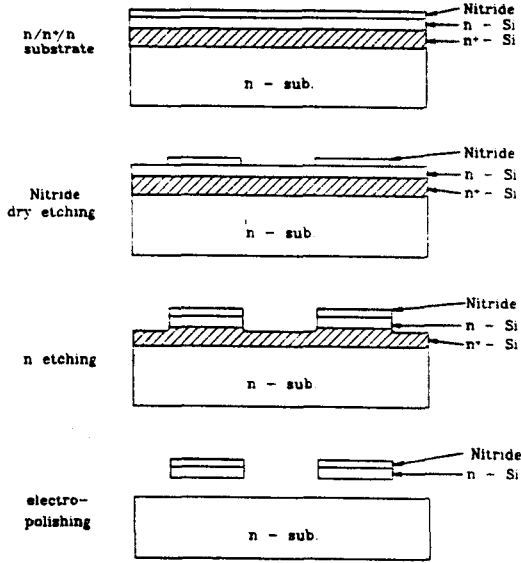
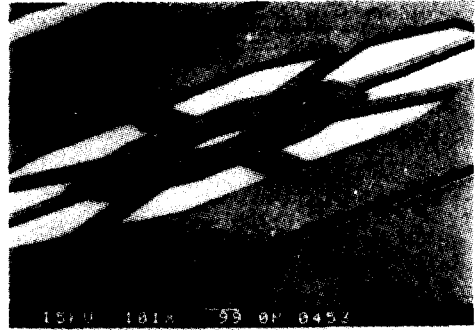


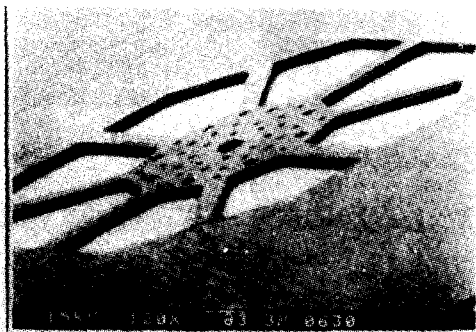
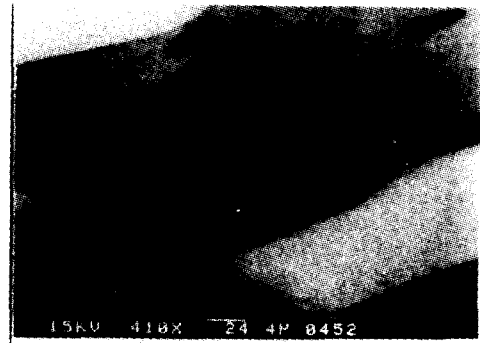
그림 8. Electropolishing에 의한 미세구조의 제조 공정도

Fig. 8. Process of microstructure fabrication by the electropolishing technique.

그림 9는 (111)면 및 (100)면의 n^+/n 3층구조의 시편을 electropolishing하여 제조한 미세구조의 SEM 사진이다. 제조된 미세구조는 PSL 형성법과 마찬가지로 완전한 형태를 유지하고 있으며, Si_3N_4 막은 양극반응 후에도 남아 있었음을 확인하였다. 또한 (100)면, n^+/n 3층구조의 시편도 (111)면의 경우와 같이 미세구조의 두께는 일정하였으며, KOH 수용액에 의한 모서리 부분의 식각은 일어났으나 electropolishing중에 n-epl.층은 식각이 되지 않고 완전한 형태를 유지하였다. 그리고 n^+ 영역에만 electropolishing이 되고 n형 영역에는 반응이 일어나지 않는 자동정지가 일어나 미세구조의 두께는 약 $4 \mu m$ 로서 PSL 형성법으로 제조된 것과 동일하였다. 따라서 이 electropolishing에 의한 미세구조의 제조는 기존의 식각법보다 가속도센서 등에 응용되는 미세구조의 형태를 더 정확히 결정할 수 있으며, 시편의 불순물 도핑농도에 따른 우수한 선택적 식각, 상온공정 그리고 식각시간이 짧기 때문에 wafer scale 식각법으로 유망한 기술이라 생각된다. 또한 저농도 HF 용액에서 미세구조의 제조가 이루어지기 때문에 이미 소자공정이 끝난 시편을 Si_3N_4 막으로 표면을 보호하여 미세구조의 제조가 가능할 것으로 생각되며 이에 대한 지속적인 연구가 진행되어야 할 것으로 여겨진다.



(a) (111)면 실리콘

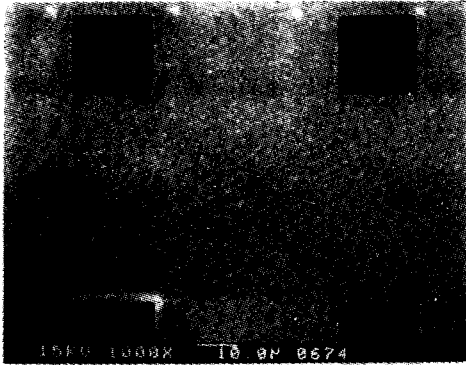


(b) (100)면 실리콘

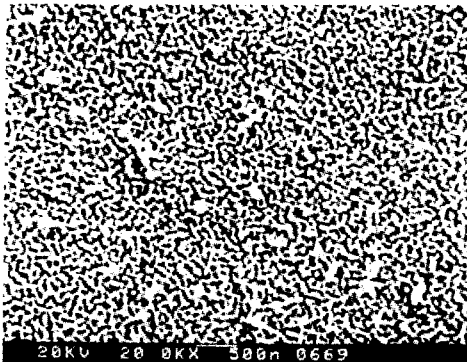
그림 9. electropolishing법으로 제조된 미세구조의 SEM 사진

Fig. 9. SEM photograph of microstructures by the electropolishing technique.

그림 10은 (100)면, $n/n^2/n$ 3층구조를 이용하여 제조된 미세구조의 식각면을 1,000배 및 20,000배로 확대한 SEM 사진이다. 미세구조의 식각면은 KOH, EDP 등의 이방성 식각용액을 사용했을 경우 나타나는 etch pit, hillock 등이 없이 식각면이 균일함을 볼 수 있다.



(a) 1,000배



(b) 20,000배

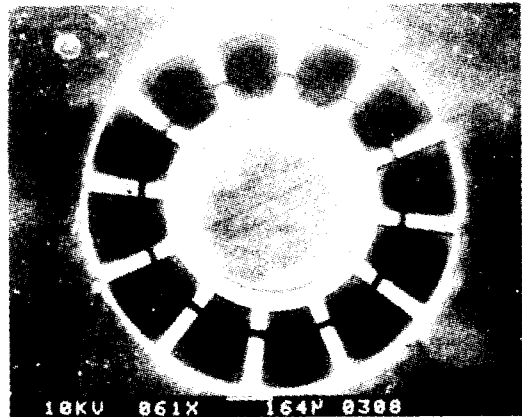
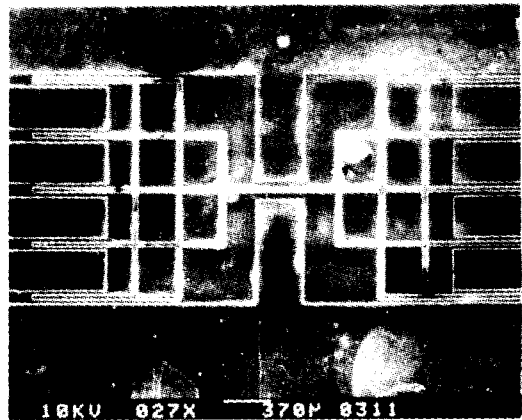
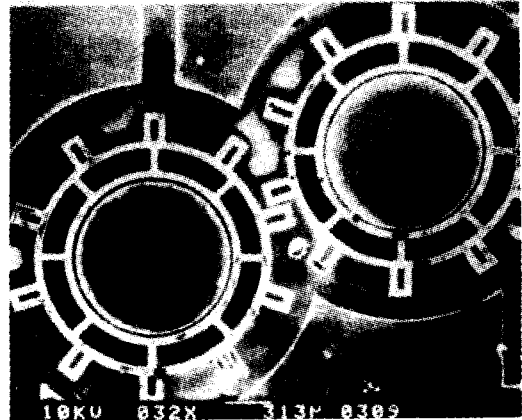
그림 10. 미세구조의 식각된 표면의 SEM 사진
Fig. 10. SEM photograph of etched surface of microstructure.

IV. 양극반응에 의한 미세구조 제조법의 응용

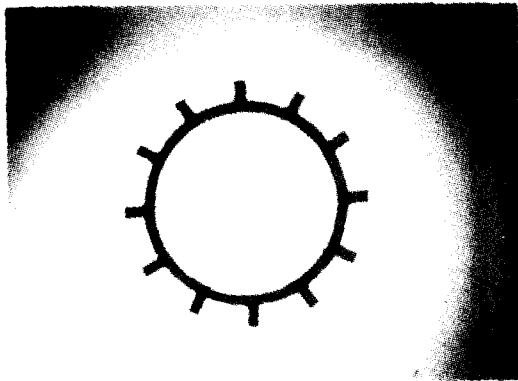
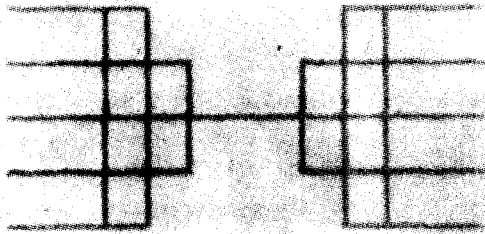
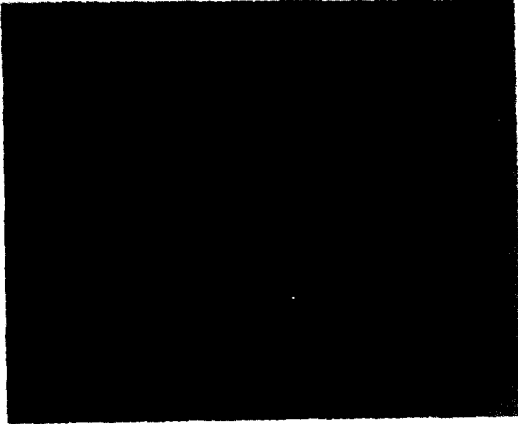
1. 실리콘 micromachining 기술에의 응용

PSL을 형성하여 식각하는 방법으로 cantilever와 bridge 같은 beam 구조 외에 정전모터의 회전자, 기어와 linear actuator 같은 움직일 수 있는 구조의 제조도 가능하다. 그림 11은 PSL 형성법을 이용하여 제조된 motor의 회전축, linear actuator의 미세 기계구조의 모

양이다. 그림 11 (a)는 PSL을 형성한 뒤 SEM 사진이고 그림 11 (b)는 (a)를 NaOH 수용액에 식각하여 actuator의 moving part를 떼어낸 모양이다. 두께 4 μm , 폭 50 μm , 최대 길이 4mm의 미세 기계구조가 휘어지거나



(a)



(b)

그림 11. PSL 형성법에 의해 제조된 미세 기계구조
(a) PSL 형성후의 표면 SEM 사진
(b) 분리된 moving part

Fig. 11. Micro-mechanical structures fabricated by the PSL technique.
(a) PSL photograph of surface after PSL formation.
(b) separated moving part.

과피되지 않고 정확하게 제조되었으며, 양극반응은 결정면에 무관하기 때문에 다른 습식 식각법과는 달리 원형의 구조도 완전한 형태를 유지한다. 따라서 이 PSL 형성법에 의한 미세 기계구조 제조기술은 여러가지 단결정 실리콘 미세 기계구조를 만드는 micromachining 기술에 사용될 수 있으며, 특히 원형 구조물을 제조하는데 적합한 방법이라 생각되며 앞으로 더 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

2. 가속도센서 제조에의 응용

양극반응에 의한 미세구조의 제조법이 가속도센서의 제조공정에 사용될 수 있는지를 확인하기 위하여 압저항형 가속도센서를 시험제조 하였으며 그 제조공정 단면도를 그림 12에 나타내었다. (100)방향의 n/n⁺/n⁺ 3층구조의 실리콘 기판에 Si₃N₄막을 1000Å 성장시켰다. 사진식각법 및 플라즈마 식각으로 p 확산층을 열고 PBF (poly boron film) 불순물원을 사용하여 900°C, 30분간 선확산 한 후 1000°C, 60분간 후확산하여 압저항 영역을

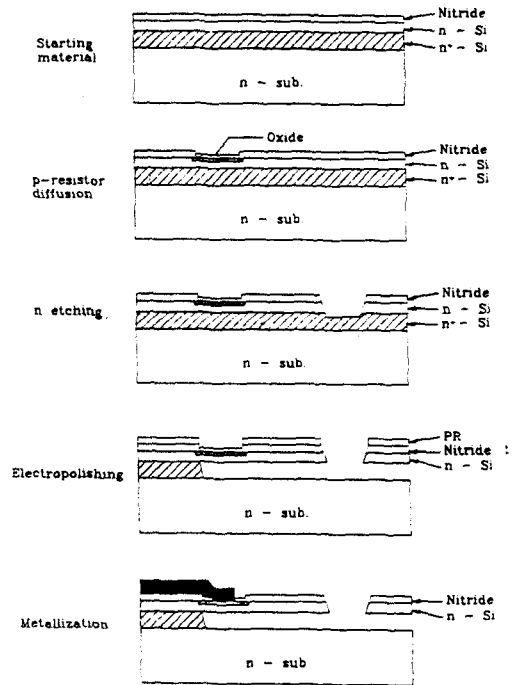


그림 12. 압저항형 가속도센서의 제조공정 단면도
Fig. 12. Process of piezoresistive acceleration sensor.

형성하였다. 미세구조를 정의한 mask를 사용하여 PR 작업을 한 후 플라즈마 식각으로 n 실리콘 식각부를 정의하고, 6N KOH 수용액으로 n 실리콘층을 약 6 μm 식각하여 n^+ 영역을 노출시켰다. 양극반응시 표면보호를 위해 Shipley Microposit positive PR을 사용하여 미세구조의 표면을 보호한 뒤, 5 wt% HF 용액에서 15 mA의 전류를 흘리면서 15분간 양극반응시켜 n^+ 영역을 식각하였다. 사진식각법으로 콘택부의 산화막을 제거한 뒤, Al을 진공증착하여 전극을 형성하였다.

그림 13은 제조된 가속도센서의 SEM 사진이다. 미세구조가 정확히 형성되었고 봉소를 확산한 p형 저항 영역은 p-n 역방향 바이어스에 의해 p형 쪽으로 전류가 흐르지 않아 양극반응이 일어나지 않았으며, Si_3N_4 막이 남아 있음을 볼 수 있다. 또한 미세구조의 중심부에

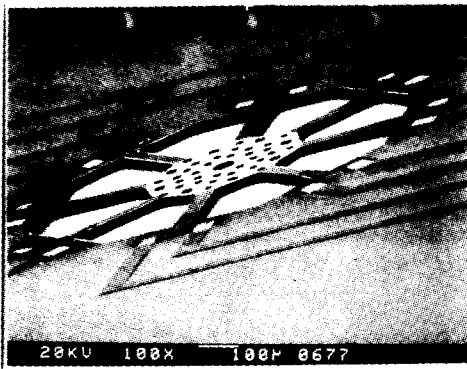
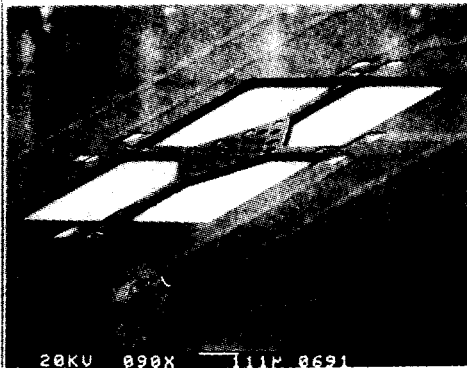


그림 13. Electropolishing법으로 제조된 가속도센서의 SEM 사진

Fig. 13. SEM photograph of acceleration sensor by electropolishing technique.

micro probe로 응력을 가하여 저항변화를 확인하였다. 이 방법은 기존의 실리콘 집적회로 공정기술과 함께 사용이 가능함을 확인할 수 있으며 가속도센서 등의 힘센서에 사용되는 미세구조의 제조에 유망한 공정법이라 생각된다.

V. 결 론

n/n^+ 실리콘 기판을 HF용액 내에서 양극반응을 시켜 electropolishing 또는 PSL 형성후 NaOH 수용액에서 식각하는 방법으로 cantilever 등의 미세구조를 제조하였다. 미세구조는 시편의 결정면에 관계없이 형성되었고, n^+ 영역만 양극반응되고 n형 영역은 반응이 일어나지 않는 자동정지가 일어나 cusp가 제거되었다. 또한 식각된 실리콘 표면은 불완전한 식각현상이 없이 매끈한 표면을 가졌다. 제조된 cantilever는 폭 50 μm , 길이 100~500 μm 의 크기로서 약 4 μm 의 균일한 두께를 가지며 n-epi.층의 두께와 일치하였다. 또 cantilever의 끝부분에 임의의 질량이 있는 경우에도 휘거나 부러지지 않았으며, 미세구조의 배치 방향 및 결정면에 따른 식각실험을 하여본 결과 방향 및 결정면에 전혀 무관함을 확인할 수 있었다.

집적회로 공정기술 및 HF 양극반응을 이용하여 가속도센서를 시험제조 하여 그 가능성을 확인하였으며, n/n^+ 형 실리콘 구조를 이용하여 모터, 기어 및 linear actuator와 같은 미세 기계구조들을 정교하게 제조할 수 있었다. 두께 4 μm , 폭 50 μm , 최대 길이 4mm의 미세 기계구조가 휘어지거나 파괴되지 않고 재현성 있게 정확하게 제조되었으며, 다른 습식 식각법과는 달리 원형의 구조도 완전한 형태를 유지하였다.

HF 양극반응을 이용한 식각법은 KOH, EPW, Hydrazine 등을 이용한 습식 식각법에 비해 식각시간은 수십분 이내로 매우 빠르고, 상온에서 식각을 행하기 때문에 용액의 조성과 온도제어가 용이하다. 또한 미세구조는 저농도 도핑된 단결정 실리콘이며, 양극반응시 자동정지가 일어나기 때문에 미세구조의 두께조절이 용이하다. 그리고 양극반응은 방향에 무관한 특성을 지니고 있어, 미세구조의 방향이나 모서리에서의 식각에 따른 오차를 보정할 여분의 영역을 고려할 필요가 없으므로 미세구조의 설계가 용이하며 구조의 제한성이 없는 장점이 있다. 따라서 이 식각법은 가속도센서 등의 힘센서에 사용되는 미세구조를 제조하는

실리콘 식각기술 및 여러가지 단결정 실리콘 미세 기계구조를 만드는 실리콘 micromachining 기술에 사용될 수 있으며 특히 원형 등 임의형상의 구조물을 제조하는데 적합한 방법이라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] A. Taroni, M. Prudenziati, and Gianni Zanarini, "Semiconductor Sensor : II-Piezoresistive Device," *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, vol. IECI-17, no.6, pp.415-421, 1970.
- [2] W.H. Ko, B.-X. Shao, C.D. Fung, W.-J. Shen, and G.-J. Yeh, "Capacitive pressure transducers with integrated circuits," *Sensors and Actuators*, vol.4, pp.403-411, 1983.
- [3] J.C. Greenwood, "Silicon in mechanical sensors," *J. Phys. E;SCI Instrum.*, vol.10, pp.239-248, 1986.
- [4] K.E. Petersen, "Silicon as a mechanical material," *Proc. IEEE*, vol.70, no.5, pp.420-457, 1988.
- [5] J.M. Giachino, "Smart sensors," *Sensors and Actuators*, vol.10, pp.239-248, 1986.
- [6] S. Middelhoek and A.C. Hoogerwerf, "Smart sensors : When and where?," *Sensors and Actuators*, vol.8, pp.39-48, 1985.
- [7] R.T. Howe, "Surface micromachining for microsensors and microactuators," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol.6, no.6, pp.1809-1813, 1988.
- [8] K.E. Bean, "Anisotropic etching of silicon," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol.ED-25, no.10, pp.1185-1193, 1978.
- [9] 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.
- [10] E.D. Palik, V.M. Bermudez, and O.J. Glembocki, "Ellipsometric 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.
- [11] 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.
- [12] M. Mehregany and S.D. Senturia, "Anisotropic etching of silicon in hydrazine," *Sensors and Actuators*, vol.13, pp.375-390, 1988.
- [13] K. Imai, "A new dielectric isolation method using porous silicon," *Solid State Electronics*, vol.24, pp.159-164, 1981.
- [14] 최광돈, 이종현, 손병기, 신종욱, "FIPOS 기술을 이용한 SOI 구조의 실온제조" 대한전자공학회 논문지, 제25권, 제11호, pp.31-41, 1988.
- [15] 양천순, 이종현, "N/P+/P 구조를 이용한 FIPOS-SOI의 제조," 대한전자공학회 논문지, 제26권, 제12호, pp.115-120, 1989.
- [16] 양천순, 박정룡, 이종현, "다공질 실리콘(Porous Silicon)의 열산화" 대한전자공학회 논문지, 제27권, 제10호, pp.106-112, 1990.
- [17] 신종욱, 최광돈, 이종현, 손병기, "HF농도, 전류 밀도, 반응시간 및 초기 표면상태가 porous silicon에 미치는 영향," 대한전자공학회 추계 종합 학술대회 논문집, 제10권, 제1호, pp.436-439, 1987.
- [18] Y. Watanabe, Y. Arita, T. Yokosyma, and Y. Igarashi, "Formation and properties of porous silicon and its application," *J. Electrochem. Soc.*, vol.122, no.10, pp.1351-1355, 1975.
- [19] T. Unagami, "Formation mechanism of porous silicon layer by anodization in HF solution," *J. Electrochem. soc.*, vol.127, no.2, pp.476-483, 1980.
- [20] M.I.J. Beal, J.D. Benjamin, M.J. Uren, N.G. Chew, and A.G. Cullis, "An experimental and theoretical study of the formation and microstructure of porous silicon," *J. of Crystal Growth*, vol.73, pp.622-636, 1985.
- [21] M.J.J. Theunissen, "Etch channel formation during anodic dissolution of n-type silicon in aqueous hydrofluoric acid," *J. Electrochem. Soc.*, vol.19, no.3, pp.351-360, 1972.
- [22] R.P. Holmstrom and J.Y. Chi, "Complete dielectric isolation by highly selective and self-stopping formation of oxidized porous silicon," *Appl.Phys.*

Lett., vol.42, no.2, pp.386-388, 1983.

[23] M. Hirata, K. Suzuki, and H. Tanaqawa, "Silicon diaphragm pressure sensor fabricated by anodic oxidation etch-stop," *Sensors and Actuators*, vol.13, pp.63-70, 1988.

[24] E.D. Palik, V.M. bermudez, and O.J. Glembocki, "Ellipsometric study of the etch-stop mechanism in heavily doped silicon," *J. Electrochem. Soc. : Solid State Science and Technology*, vol.132, no.1, pp.135-141, 1985.

[25] Y. Linden, L. Tenerz, J. Tiren, and B. Hok, "Fabrication of three-dimensional silicon structure by means of doping-selective etching(DSE)," *Sensors and Actuators*, vol.16, pp.67-82, 1989.

[26] P.C. Searson and X.G. Zhang, "The anodic dissolution of silicon in HF solution," *J. Electrochem. Soc.*, vol.137, no.8, pp.2539-2546, 1990.

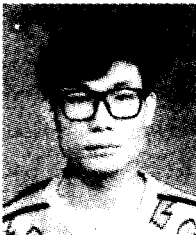
[27] X.G. Zhang, "Mechanism of pore formation on n-type silicon," *J. Electrochem. Soc.*, vol.138, no.12, pp.3750-3756, 1991.

著 者 紹 介



曹 贊 燮

1965년 6월 10일생. 1987년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 1990년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업. 1990년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 공학 석사학위 취득. 1990년 3월~현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심분야는 반도체공정기술, 실리콘 Micromachining 기술, SOI 기술, 센서응용기술 등임.



李 錫 洙

1967년 12월 9일생. 1991년 2월 경북대 전자공학과 졸업. 1992년 8월 현재 경북대학교 전자공학과 석사과정 재학중. 주관심분야는 실리콘마이크로머시닝, SOI기술 등임.



沈 俊 煥

1966년 2월 27일생. 1991년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 1992년 8월 현재 경북대학교 전자공학과 석사과정 재학중. 주관심분야는 실리콘 유량센서, SOI기술 등임.



李 鍾 玄

1949년 6월 26일생. 1972년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 1976년 8월 경북대학교 대학원 전자공학과 공학석사학위 취득. 1981년 11월 프랑스 그레노블 국립공과대학 전기전자과 공학박사학위 취득. 현재 경북대학교 전자공학과 교수. 주관심분야는 반도체공정기술, SOI기술, 실리콘 Micromachining 기술, 센서응용기술 등임.