

# 군수용 고내압을 가지는 마이크로 압력센서의 개발

심준환<sup>+</sup>·서창택<sup>++</sup>·이종현<sup>+++</sup>

## Development of a Micro-pressure Sensor with high-resisting Pressure for Military Applications

Joon-Hwan Shim<sup>+</sup>, Chang-Taeg Seo<sup>++</sup> and Jong-Hyun Lee<sup>+++</sup>

**Abstract** : A piezoresistive pressure sensor using a silicone rubber membrane has been fabricated on the selectively diffused (100)-oriented n/n+/n silicon substrates by a unique silicon micromachining technique using porous silicon etching. The width, length and thickness of the beam were 120 $\mu$ m, 600 $\mu$ m and 7 $\mu$ m, respectively and the thickness of the silicone rubber membrane was 40 $\mu$ m. By the fusion of silicon beam and silicone rubber membrane, the mechanical strength of the pressure sensor could be highly improved due to smaller shear stress. The effectiveness of the sensor was confirmed through an experiment and FEM simulation in which the pressure sensor was characterized.

**Key words** : 고내압, 실리콘 압력센서, 다공질실리콘 마이크로머시닝, KOH 에칭, MEMS

### 1. 서론

압력센서는 프로세스 또는 시스템에서 기본적인 물리량인 압력을 감지하여 신호처리하기 쉬운 전기신호로 변환하는 기능을 지닌 소자로서 정밀계측, 공정자동화, 생체공학용 의료기, 자동차, 환경제어와 산업체의 시스템제어 등에 폭넓게 사용되고 있다. 최근에는 반도체기술과 MEMS(micro-electro-mechanical-systems) 기술의 발전으로 보다 소형화되고 복합화된 다기능의 스마트 센서에 대한 관심이 커지고 있다. 또한, 시스템이 점차 복잡해지고 기능이 다양화되어 감에 따라 고기능, 고집적화에 대응할 수 있는 센서가 요구되고 이에 따라, 신뢰성, 재현성, 안정성 및 규격화가 가능한 반도체 다이아프램형 압력센서가 개발되고 있다<sup>[1]-[3]</sup>.

반도체 압력센서는 직선성이 우수하며 소형·경량으로 진동에도 매우 강한 것이 특징이다. 또한 기계식보

다 고감도, 고신뢰성이며 양산성이 우수하다. 반도체형 압력센서는 압력을 받아서 왜응력으로 변환하는 다이아프램과 다이아프램에서 발생하는 동력을 전기신호로 변환하는 요소로 구성되며, 주로 압저항형, 용량형으로 나눌 수가 있다. 여기서 압저항형 압력센서는 주로 다이아프램이 표면에 제작되기 때문에 압력이 가해지고, 변형이 생기면 응력차가 발생한다. 이러한 구조에서는 압력에 대한 실리콘 다이아프램의 변형이 미세하기 때문에 높은 감도를 나타낼 수 없으며, 급격한 외부의 압력 및 유동에도 쉽게 다이아프램이 파괴되는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 실리콘 고무(silicone rubber)를 이용하여 높은 감도를 가지면서도 다이아프램이 쉽게 파괴되지 않는 반도체 다이아프램형 고내압 압력센서를 설계하고 제작하였다. 실리콘 고무는 높은 신장도(elongation)와 낮은 영률(Young's modulus)의 특성을 보이며, 내열성, 내한성, 난연성, 내방사선, 무독성 그리고 혈액응고를 잘 유발하지 않는 등 생리적

+ 심준환(한국해양대학교 전파정보통신공학부), E-mail: jhsim@bada.hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4811

++ 서창택, 경북대학교 전자공학과

+++ 이종현, 경북대학교 전자공학과

으로 불활성 물질이다<sup>[4],[5]</sup>. 이러한 특성을 가진 실리콘 고무를 멤브레인으로 이용한 압력센서는 높은 감도를 보이면서도 쉽게 파괴되지 않으며, 열악한 환경 응용분야, 의료용, 군수용에 특별한 외부 조작없이 센서로 동작할 수 있는 장점을 가진다. 본 연구에서는 KE441K-T 실리콘 고무를 멤브레인으로 사용하여 세 가지 형태의 고내압 압력센서를 설계하고 제작하였다.

소자의 제작은 (100)면 n형 실리콘웨이퍼에 n<sup>+</sup> 영역이 선택적으로 확산된 n/n<sup>+</sup>/n 3층 구조의 웨이퍼를 사용하여 캔틸레버형 압력센서를 제조하였다. 이때, 3차원 구조의 캔틸레버를 형성하기 위하여 최근 많이 이용되고 있는 다공질 실리콘 마이크로머시닝 기술을 이용하였다<sup>[6]</sup>. 그리고 실리콘 다이아프램과 실리콘 고무 멤브레인에서의 스트레스 분포를 예측하기 위하여 유한요소법(finite element method:FEM)을 이용하여 시뮬레이션하였다<sup>[7]</sup>.

## 2. 소자의 설계

실리콘 빔의 형태와 실리콘 고무를 유무에 따른 스트레스의 분포를 확인하고, 정확한 압저항의 위치를 해석을 하기 위해서 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS로 시뮬레이션 하였다. 그림 1은 압력센서를 ANSYS로 시뮬레이션하기 위해 각각의 소자를 모델링한 것을 보여준다. 여기서, 소자의 구조는 사각형태(RET:Rectangular type), 원형형태(CIT:Circular type), 빗살형태(COT:Comb type)로 되어 있다. 소자의 단면도는 그림 2와 같고, 표 1은 이러한 각 소자들의 크기를 나타낸다.

그림 3은 세가지 형태의 멤브레인에 압력을 변화시키면서 인가했을 때의 최대 변위(그림 3(a))와 최대 스트레스(그림 3(b))를 나타낸 것이다. 세가지 구조의 특성을 비교해 보면, 최대 변위 및 최대 스트레스를 RET > CIT > COT 순으로 나타난다. 이것을 통해 볼때, 동일한 외부의 압력에 대하여 RET 구조가 가장 감도가 높은 것을 알 수 있다. 그러나 높은 압력에 대한 내압의 측면에서 보면, RET < CIT < COT 순으로 나타난다. 따라서, 감도와 내압을 모두 고려한다면, 중간정도의 특성을 나타낸 원형모양인 CIT 구조가 적

합할 것으로 판단된다. 또한, 소자의 변형된 스트레스 분포를 보면, 사각형의 경우 높은 압력을 인가했을 경우에 실리콘 캔틸레버의 모서리 부분에 스트레스가 집중되어 먼저 파괴될 수 있지만, 원형은 이러한 측면에서 더 안정적이라 할 수 있다. 그러나, 응용분야에 따라서는 RET 또는 COT가 선호될 수도 있을 것이다.

그림 4는 설계된 압력센서의 마스크 도면을 나타낸 것이다. 마스크는 멤브레인 패턴, 압저항 패턴, 전기적 접촉창 패턴, 금속화 패턴, 뒷면 KOH 에칭 패턴으로 총 5장으로 구성되어 있으며, 그림 4(f)는 원형모양의 압력센서의 전체 모양을 나타낸 것이다. 그림 4(b)에서 압저항 패턴은 고정저항과 가변저항이 각각 4k $\Omega$ 이 되도록 설계하였다. 그리고 캔틸레버가 되는 n형 에피층 밑의 n<sup>+</sup> 영역이 HF 용액속에서 원활한 양극반응이 되도록 캔틸레버의 폭을 120 $\mu$ m 하였고, 길이는 소자의 안정성을 높이기 위하여 400 $\mu$ m로 설계하였다.

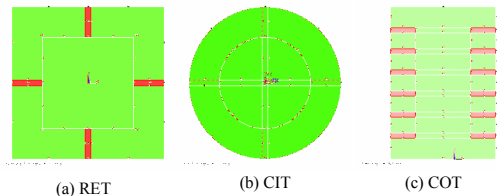


그림 1. 압력센서의 모델링 구조

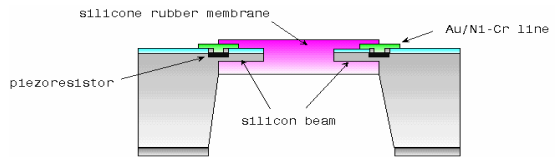
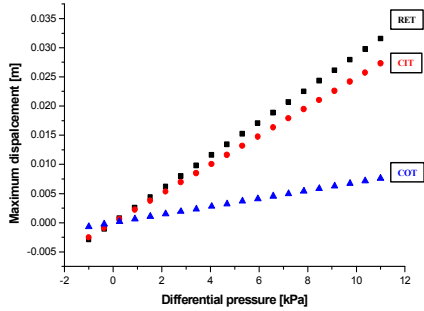


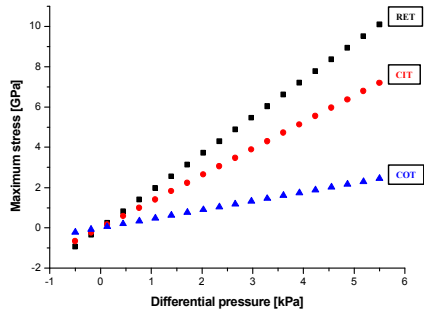
그림 2. 압력센서의 단면도

표 1. 각 구조에 따른 소자의 크기

구조 형태	면적	실리콘 빔길이	실리콘 빔폭	실리콘 빔두께	실리콘 고무 두께
RET	3mm×3mm	600 $\mu$ m	120 $\mu$ m	7 $\mu$ m	40 $\mu$ m
CIT	$\pi \times (1.5\text{mm})^2$				
COT	2.5mm×3.6mm				



(a) 차압에 따른 최대변위



(b) 차압에 따른 최대 스트레스

그림 3. 압력의 변화에 따른 최대 변위 및 최대 스트레스

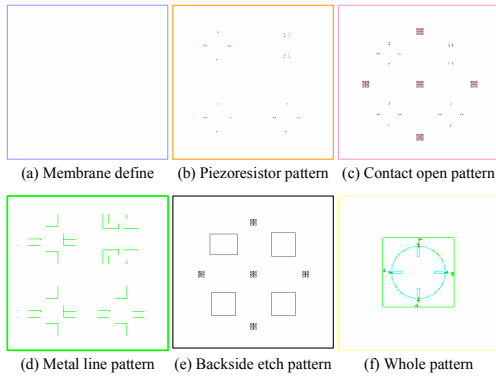


그림 4. 압력센서의 마스크 패턴

### 3. 소자의 제작

압력센서 제조공정은 크게  $n/n^+/n$  시편형성, 금속화 및 실리콘 고무 몰딩 공정으로 되어 있다. 사용한 웨이퍼는 결정면이 (100), 저항률이 3~6  $\Omega \cdot \text{cm}$ 인 n형 실리콘 기판을 사용하였다. 미세구조 제조를 위하여

n형 실리콘 기판 상에 간극이 형성될 부분을 선택적으로  $n^+$ 로 확산하여 미세구조가 정확하게 정의될 수 있는 선택확산법을 이용하였으며, 양극반응시 Au/Ni-Cr과 amorphous 실리콘을 마스크 물질로 사용하여 압저항과 n형 에피층 표면을 보호하였다. 압력센서의 전체 공정도를 그림 5에서 나타내었다.

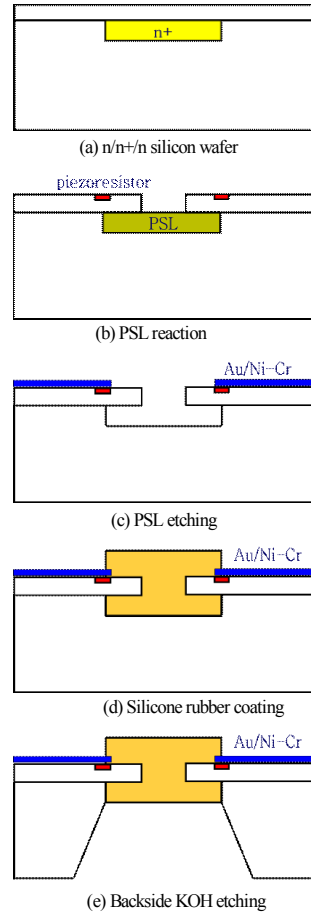
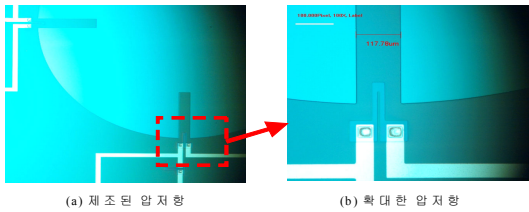


그림 5. 압력센서의 제조공정도

양면 정렬기를 사용하여 사진식각법으로 전면에는 압저항 영역을 그리고 뒷면에는 KOH 에칭 패턴을 정의한 후, RIE(reactive ion etcher)로  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 를 식각하였다. 정의된 압저항 영역에 붕소를 스퍼코팅하여 20분간 질소분위기에서 열처리하여 압저항을 형성하였다. 이는 그림 6에 나타내었다. HF 양극반응시 보호층 역할을 하는 amorphous 실리콘을 7000Å 그리

고 Au/Ni-Cr을 3500 Å/1500 Å 증착하여 사진식각법으로 미세구조부 캔틸레버 패턴을 정의한 후, RIE로 amorphous 실리콘, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, 그리고 n 에피층을 식각하여 n<sup>+</sup>층을 노출시켰다. 다음으로 3:1 = H<sub>2</sub>O:HF 용액에서 0.43V의 정전압원으로 50분간 양극반응하여 n<sup>+</sup>층에 수용액에서 20분간 다공질 실리콘을 형성한 후, 4% NaOH 수용액에서 다공질 실리콘을 식각하여 미세구조를 형성하였다. 그림 7은 제작된 캔틸레버의 SEM 사진으로 n<sup>+</sup> 층이 완전히 식각되어 미세구조가 정확하게 형성된 것을 볼 수 있다.



(a) 제조된 압저항 (b) 확대한 압저항

그림 6. 제조된 압저항의 현미경 사진

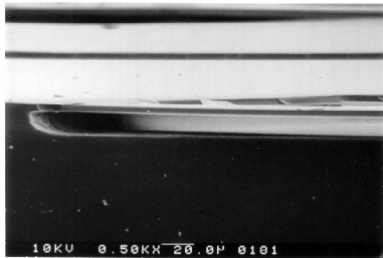


그림 7. 제조된 캔틸레버의 현미경 사진

다음으로 압저항 접촉부를 정의하기 위해 산화막을 성장시켰다. 전극을 형성하기 위하여 Au/Ni-Cr을 진공열증착법으로 증착하였다. 그리고, 실질적으로 압력을 받는 다이아프램을 형성하기 위하여 실리콘 고무 몰딩 방법을 사용하면 소자의 안정성을 배가할 수 있지만, 몰딩 후에 실리콘 고무의 표면장력으로 인해서 균일한 막을 형성하기 어렵고 또한 실리콘 고무막을 얇게 형성할 수 없다. 이러한 문제들은 실리콘 고무를 스핀코팅 함으로써 해결할 수 있다. 그림 8은 실리콘 고무를 코팅한 샘플들의 스핀속도에 따른 두께의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 스핀코팅 속도를 높여서 실리콘 고무막을 얇게 함으로써

감도를 개선할 수는 있지만, 이로 인해서 파괴압력, 즉 내압은 더 낮아 질 수 있다. 또한 현재로서는 실리콘 고무를 정확히 패터닝 할 수 없기 때문에 공정상의 많은 문제를 야기 할 수 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서 물성치가 다른 다양한 실리콘 고무에 대한 연구가 필요하다. 실리콘 고무를 스핀코팅하여 다이아프램을 형성한 후 실온에서 24시간 굳혔다. 마지막으로 뒷면 식각시 마스크를 위한 물질로 Au/Ni-Cr을 진공열증착법으로 증착한 후, 86.5°C KOH 수용액에서 4시간동안 식각을 했다.

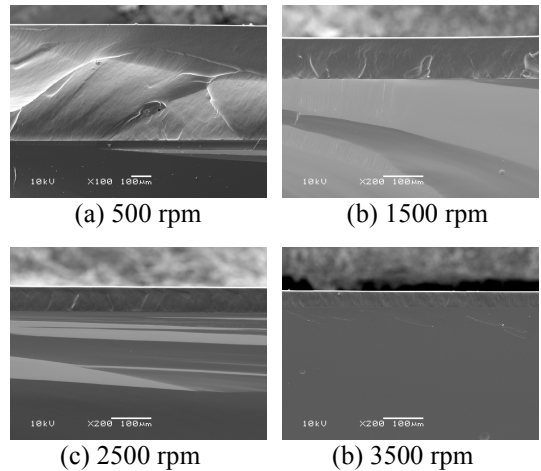


그림 8. 스핀속도에 따른 실리콘 고무 멤브레인의 두께 변화

#### 4. 측정 및 결과

제조된 압력센서의 특성을 분석하기 위하여 측정장치를 구성하였다. 출력전압의 증폭을 위해서 자체 개발한 2단 연산증폭기 MOD-7을 사용하였다. 그리고 측정회로에서 출력 증폭도를 가변할 수 있도록 최대 10 kΩ의 가변저항(T93YA)을 사용하였다. 전체적인 측정 시스템은 그림 9에 나타내었다. 최대 300mmHg 범위의 혈압계로 소자에 압력을 가하고, 이때의 출력전압을 측정회로를 통해서 증폭한 다음 analyzing recorder에 출력된 파형을 분석하였다.

그림 10은 인가압력에 대한 RET 소자의 출력전압이다. 소자의 전면에 압력을 인가하고, 뒷면을 대기에 노출시킨 상태에서 출력전압을 측정한다. 측정된 소

자의 감도는 17.5mV/kPa이고, 비선형성은 1.05%FSO로 대체적으로 선형적인 응답특성을 나타내었다. 그림 11은 인가압력에 대한 COT 소자의 출력전압이다. 측정된 소자의 감도는 4.75mV/kPa이고, 비선형성은 1.8%FSO를 나타내었다.

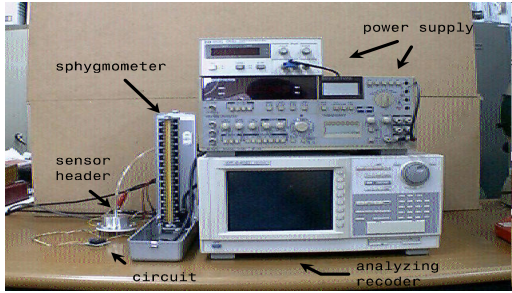


그림 9. 센서의 출력을 얻기 위한 측정시스템

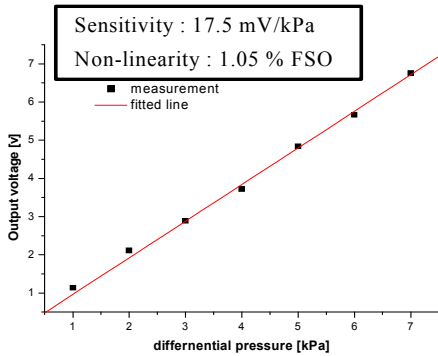


그림 10. 인가압력에 대한 RET 압력센서의 출력전압

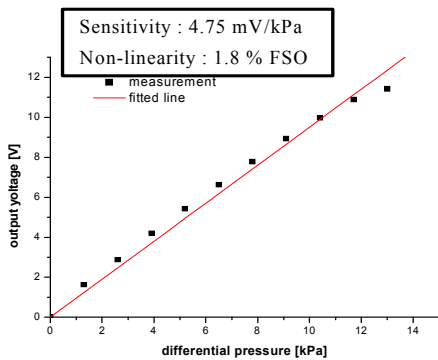


그림 11. 인가압력에 대한 COT 압력센서의 출력전압

그림에서와 같이 측정된 결과가 시뮬레이션 결과에서 예측한 것처럼 COT 소자의 감도가 가장 작게 나타났다. 그러나, COT 소자는 여러개의 캔틸레버로 구성되어 있기 때문에 각 캔틸레버에 있는 압저항에 있는 출력전압을 합산회로를 통하여 최종출력을 얻으면, 그 출력전압은 세가지 구조에서 가장 큰 값으로 나타날 것이다. 따라서, 가장 큰 내압을 가지면서, 가장 큰 출력값을 얻을 수 있는 구조는 COT 소자로 판단된다. 제조된 압력센서의 온도 특성을 측정하기 위하여 항온조를 이용하여 0~80℃까지 온도를 가변하여 소자의 출력을 조사하였다. 각 온도 스텝별 소자의 안정화를 위하여 10분간의 간격을 두고 측정하였다. 그림 12에 제조된 압력센서의 온도특성을 온도별 소자의 감도로 나타내었다. 그림에서와 같이 온도특성은 0℃에서 80℃까지의 범위에서 상온(25℃)을 기준으로 최대 0.003%의 오차를 보이며 대체적으로 일정함을 알 수 있다. 현재 CIT 구조의 압력센서는 특성분석을 위해서 실험 중에 있다. 향후 제작된 압력센서를 군수용, 특수산업용, Bio 분야에 적용하기 위해서 제작공정의 개선과 실리콘 고무 재료에 대한 깊이 있는 조사가 필요하고, 실리콘 고무와 실리콘 캔틸레버의 결합에 따른 기계적인 특성에 대한 연구도 체계적으로 할 예정이다.

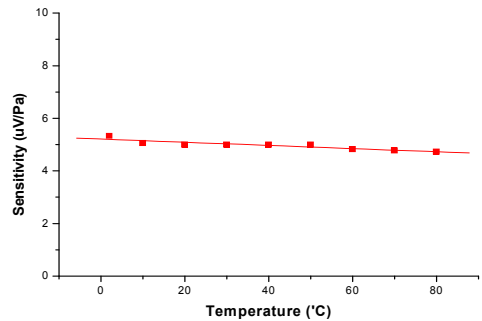


그림 12. 압력센서의 온도에 따른 감도의 변화

## 5. 결론

본 논문에서는 기존의 실리콘 다이아프램형 압력센서가 가지는 낮은 감도를 개선하고 소자의 기계적인

안정도 증가를 위해 실리콘 고무를 멤브레인으로 이용한 캔틸레버형 고내압 압력센서의 제조 방법을 제시하였다. 캔틸레버형 실리콘 압력센서를 제조하기 위해서 (100)방향의  $n/n^+$  3층 구조의 실리콘 기판을 사용하여 다공질 실리콘 마이크로머시닝기술, 압저항 형성, 실리콘 고무 스펀코팅, 그리고 KOH를 이용한 벌크 마이크로머시닝법을 이용하여 소자를 제조하였다.

소자의 제조에 앞서 실리콘 빔의 형태와 실리콘 고무의 유무에 따른 스트레스의 분포를 확인하기 위해 유한요소해석법을 이용하여 시뮬레이션 하였고, 그 결과를 바탕으로 소자를 설계하였다. 본 논문에서 제안한 캔틸레버형 실리콘 압력센서는 낮은 영률과 높은 신장도를 가지고 내열성, 내한성, 난연성 그리고 무독성의 우수한 성질을 가지는 실리콘 고무 멤브레인을 이용하기 때문에 높은 감도와 고내압 특성을 가진다. 또한, 실리콘 고무 멤브레인과 실리콘 캔틸레버가 결합하기 때문에 MEMS 구조물에 대한 특수한 패키징 기술이 필요없어 공정경비가 매우 낮아지는 장점이 있다. 그리고 사용환경이 열악하더라도 특별한 외부조작 없이 측정 가능하기 때문에, 군수용, 특수 산업용 및 Bio 기술분야에 적용 가능할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] K. M. Mahmoud, R. P. Van Kampen, M. J. Rutka, and R. F. Wolfenbuttel, "A silicon integrated smart pressure sensor", *Transducers '93*, (1993) pp. 271-220.
- [2] T. Watanabe, S. Fukuhara, H. Tsukamoto, T. Kudo, and K. Ikeda, "Differential pressure sensor with micromachined overrange protectors", *Transducers '95, Eurosensors IX*, 1995.
- [3] O. Akar, T. Akin, and K. Najafi, "A wireless batch sealed absolute capacitive pressure sensor", *Sensors and Actuators A*, pp. 29-38, 2001.
- [4] C. Vieider, O. Hman, and H. Elderstig, "A pneumatically actuated micro-valve with a silicone rubber membrane for integration with fluid-handling systems", *Transducers '95, Eurosensors IX*, 303-B7 (1995) pp. 284-286.
- [5] X. Yang, C. Grosjean, Y. C. Tai, and C. M. Ho, "A mems thermopneumatic silicone membrane valve", *IEEE* 1997, pp. 114-118.
- [6] J. H. Sim, S. H. Hahm, J. Hee Lee, J. Hyun Lee, I. S. Yu, and J. S. Kim, "Eight-beam piezoresistive accelerometer fabricated by using a selective porous silicon etching method", *Transducers '97*, 4B2.03 (1997) pp. 1193-1196.
- [7] M. I. J. Beale, J. D. Benjamin, M. J. Uren, N. G. Chew, and A. G. Cullis, "An experimental and theoretical study of the formation and microstructure of posous silicon", *J. of Crystal Growth*, vol. 73, pp. 622-636, 1985.