

## 표면 MEMS 기술을 이용한 고온 용량형 압력센서의 특성

### Characteristics of Surface Micromachined Capacitive Pressure Sensors for High Temperature Applications

서정환<sup>1,a</sup>, 노상수<sup>1</sup>, 김광호<sup>2</sup>  
(Jeong-Hwan Seo<sup>1,a</sup>, Sang-Soo Noh<sup>1</sup>, and Kwang-ho Kim<sup>2</sup>)

#### Abstract

This paper reports the fabrication and characterization of surface micromachined poly 3C-SiC capacitive pressure sensors on silicon wafer operable in touch mode and normal mode for high temperature applications. FEM(finite elements method) simulation has been performed to verify the analytical mode. The sensing capacitor of the capacitive pressure sensor is composed of the upper metal and the poly 3C-SiC layer. Measurements have been performed in a temperature range from 25°C to 500°C. Fabrication process of designed poly 3C-SiC touch mode capacitive pressure sensor was optimized and would be applicable to capacitive pressure sensors that are required high precision and sensitivity at high pressure and temperature.

**Key Words** : Poly 3C-SiC, Capacitive pressure sensors, Surface MEMS, FEM

#### 1. 서론

최근 압력센서는 프로세스 또는 시스템에서 압력을 측정하는 소자로서 공업계측, 자동제어, 의료, 자동차 엔진제어, 환경제어, 전기용품 등 그 용도가 다양하고 가장 폭넓게 사용되는 핵심 센서 중 하나이다. MEMS(micro electro mechanical system) 기술을 이용한 마이크로 압력센서는 산업과 바이오의학 등의 응용들을 위해 개발되어왔다. 실리콘을 기초한 압저항형과 용량형 압력센서는 압력을 감지하는 주된 센서였다. 다른 압력센서들과 비교해서 표면마이크로 MEMS 기술을 이용하는 용량형 압력소자들은 높은 감도, 낮은 드리프트, 저전력소비, 견고한 구조와 주변환경에 민감하지 않아 산업응용을 위해 수년 동안 개발되어왔다[1,2]. 그러나, 마이크로 용량형 압력센서의 용량출력은 일

반적으로 매우 적고( $fF \sim pF$ ) 기생효과에 매우 민감한 단점이 있다. 최근 적은 커패시턴스의 변화를 검출하기 위한 회로기술의 발달로 용량형 압력센서의 응용이 가능하게 되었고 동일칩상에 용량형 압력셀수를 병렬로 많은 수를 최대한 배열함으로써 출력에 대한 감도를 증가시킬 수 있다[3]. 용량형 압력센서는 접촉식과 비접촉식으로 구성할 수가 있다. 접촉식은 인위적으로 다이어프램이 기판에 닿는 범위에서 동작되도록 설계되었다. 용량의 변화는 주로 접촉된 영역에 의해 결정되고 인가된 압력에 비례한다. 접촉식 용량형 압력센서의 이점은 동작점 근처에서의 선형성, 압력범위에서의 큰 동작, 큰 부하에 보호가 가능하며, 열악한 산업 환경에 견딜 수 있는 구조로 비접촉식모드의 감도보다 10~100배 이상 커서 표유용량효과는 거의 무시될 수 있다[4-8].

용량형 압력센서의 상하부 전극으로 사용될 다결정 3C-SiC(silicon carbide)는 에너지 밴드갭이 크고 열팽창계수가 낮아 고온에서의 열적변화가 적고 우수한 전기적, 기계적 그리고 화학적 특성들 때문에 열악한 환경에서의 센서 적용에 적합하다.

1. 대양전기공업(주) 연구소  
(부산시 사하구 신평동 504)  
2. 부산대학교 재료공학부  
a. Corresponding Author : jhseo@daeyang.co.kr  
접수일자 : 2010. 2. 25  
심사완료 : 2010. 3. 18

현재 열악한 환경에서 응용을 위해 Si(silicon) MEMS 기술의 확장으로 SiC MEMS 개발에 대한 연구들이 활발히 진행되어 왔다[5,9]. 단결정 3C-SiC의 경우, Si과 SiC 두 물질간의 큰 열팽창 계수의 차이와 격자 부정합으로 인한 크랙, 뒤틀림 등의 스트레스가 크게 발생하지만, 다결정 3C-SiC를 사용할 경우는 이런 문제를 해결하여 누설 전류를 감소시키므로 고온에서의 소자 특성을 크게 개선시킬 수 있다[10].

따라서, 본 연구에서는 표면 MEMS 기술을 이용한 고온용 다결정 3C-SiC 용량형 압력센서 제작하기 위한 단위공정기술과 그에 대한 특성을 분석, 평가하였다. 또한, 최적 조건에서 제작된 용량형 압력센서의 고온 및 압력에 대한 출력특성과 장기 안정성 등을 분석, 평가하여 열악한 환경에서 사용 가능한 압력센서로 응용하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 센서 설계

정전용량형 압력센서는 서로 평행한 두개의 전극 사이에 유전체가 삽입된 형태의 콘덴서와 같은 구조를 가진다. 이러한 정전용량 압력센서의 정전용량은 두개의 전극의 면적과 그 전극사이의 거리 및 유전체의 유전율에 의해 결정되며, 전극 사이의 거리의 변화에 의해 변화하는 정전용량을 통하여 외부 압력의 변화를 감지한다. 용량형 압력센서는 지름이 다른 센싱 다이어프램 주위가 구속된 접촉식과 비접촉식으로 동작하는 응용사양의 압력범위에 따라 설계하였다. 센서의 동작모드는 성능을 미리 보기 위해 FEM에 의해 모델화 되었다. 그림 1은 용량형 압력센서의 비접촉식과 접촉식에서의 FEM 모의해석 결과를 나타낸 예이다. 비접촉식은 작은 휨변형으로 접촉식은 큰휨변형으로 동작된 다이어프램의 성능을 나타내었다. 센서 다이어프램은 영점압력용량 갭은 1.4~2.5  $\mu\text{m}$ 으로 다이어프램 설계는 50  $\mu\text{m}$ 의 반경과 두께 2.5  $\mu\text{m}$ 로 하였다. 이 모델링 된 결과들은 받아들일 수 있는 감도와 선형성은 선택된 압력범위를 얻을 수 있도록 나타내었다. 다이어프램 두께와 영점-압력 용량갭은 공정과정에 의해 고정되었다.

그림 2는 용량형 압력센서의 용량값-압력에 대한 그래프를 나타낸 것이다. 처음 비접촉식에서의 normal, 접촉식으로 변환되는 transition, 접촉식에서 선형구간인 linear, 감도가 떨어지는 구간인 saturation으로 나눌 수 있다. 멤브레인 구조는

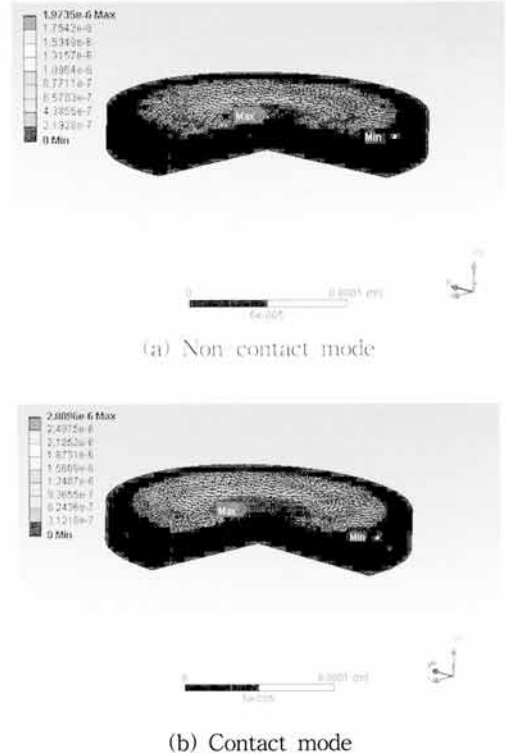


그림 1. 용량형 압력센서의 휨모드에 따른 FEM 해석 결과.

Fig. 1. FEM simulation results of capacitive pressure sensors according to deflection mode.

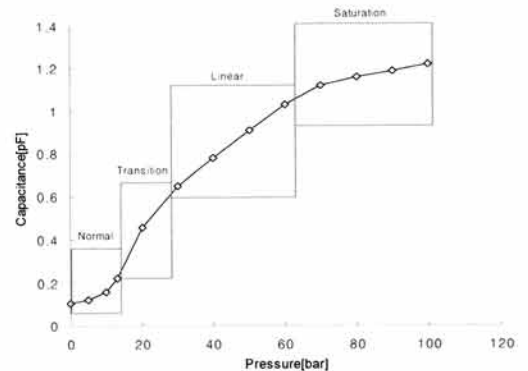


그림 2. 용량형 압력센서의 C-P 출력곡선.

Fig. 2. Capacitance-pressure output curve of capacitive pressure sensors.

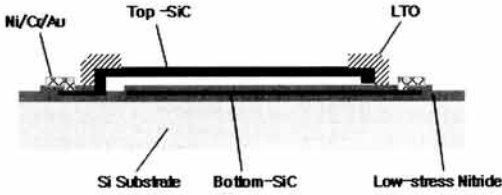


그림 3. 용량형 압력센서의 구조측면도.  
Fig. 3. Schematic cross-section of capacitive pressure sensors.

poly 3C-SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/poly 3C-SiC으로 구성되었으며 캐비티는 거의 진공에 가까운 절대압 압력센서이다. 멤브레인 아래 실리콘 기판상의 다결정 3C-SiC층과 상부전극인 기판상의 다결정 3C-SiC층은 병렬판 센싱커패시터로 구성되었다. 외부에서 인가되는 압력에 대한 원형 다이어프램의 휨의 대한 해석은 연구되어져 왔다. 커패시턴스의 변화값은 식 (1)과 같이 수식에서 쉽게 얻어질 수 있다[7].

$$C = \iint \frac{\epsilon_0 \epsilon_i \epsilon_a \cdot 2\pi \cdot r}{\epsilon_a t + \epsilon_i (g - \omega(r))} dr d\theta \quad (1)$$

$\epsilon_0$ ,  $\epsilon_i$ ,  $\epsilon_a$ 는 각각 진공에서의 유전율, 중간유전체의 유전상수와 공기의 유전상수를 나타내며,  $g$ 는 커패시턴스 판사이의 간격이고  $a$ 는 다이어프램 반경,  $t$ 는 유전체 두께를 나타낸다.

전 영역에서 밀폐된 다이어프램은  $w(r)$

$$\omega(r) = \frac{Pa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \quad (2)$$

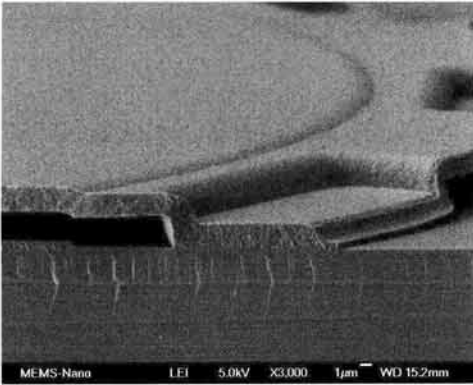
$D = Eh^3 / 12(1 - \nu^2)$ 은 휨강도(flexural rigidity),  $E$ 영율,  $\nu$  포아송비,  $h$ 는 다이어프램 두께,  $P$ 은 인가압력이다.

### 3. 결과 및 고찰

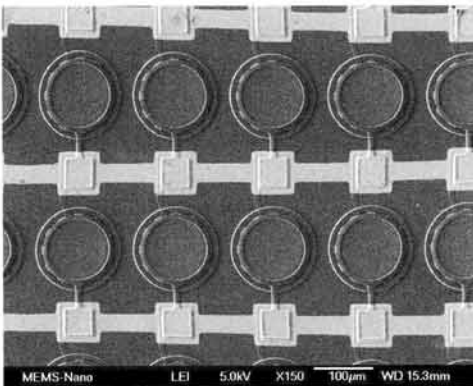
그림 3은 용량형 압력센서의 구조측면도를 나타낸 것이다. 기판으로는 4인치 P형 Si 웨이퍼 <100>을 사용하였다. 각 공정마다 RCA 세정공정을 추가하였다. 실리콘 기판상에 절연을 위한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>박막은 LPCVD(low pressure chemical vapor

deposition)를 이용하여 low stress로 두께 0.3 um로 증착하였다. 그 다음 하부전극으로 다결정 3C-SiC은 LPCVD를 이용해 Si와 C의 공급원으로 SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> (100%, 35 sccm)과 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>(5% H<sub>2</sub>, 180 sccm)을, 도핑가스로는 NH<sub>4</sub>(5%, 64 sccm)을 사용하였다. 증착 된 다결정 3C-SiC은 건식식각 장비인 ICP(inductively coupled plasma) 식각기를 이용하여 용량센서의 하부전극패턴을 형성하였다. 용량형 압력센서의 접촉식 구조를 위해 다음은 하부전극위에 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>박막을 LPCVD를 이용하여 low stress로 두께 0.4 um로 증착하였다. 실리콘질화막은 접촉식에서 전극간의 전기적 절연을 위해 사용되었으며 하부전극부는 포토작업을 통해 contact open하였다. 표면마이크로머시닝 공정을 통한 희생층으로 사용될 물질인 LTO(low temperature oxide)박막은 두께 1.4 um로 증착하였으며, 지지층을 위해 패턴공정을 행하였다. 그 다음 공정으로 상부전극으로 사용 될 다결정 3C-SiC박막은 LPCVD를 이용하여 두께 2.5 um로 증착하여 하부전극과 동일하게 건식식각장비를 통해 패턴을 형성하였다. 상부전극의 구조는 그림 4와 같이 희생층으로 사용되는 LTO 박막을 제거할 수 있게 anchor구조로 설계하였으며, 희생층은 BOE 에칭액을 사용하여 anchor 구조의 다이어프램 주위의 채널들을 통해 제거하였다. 다음은 열여진 다이어프램 공간을 밀폐하기 위해 2.5 um 두께의 LTO박막을 증착하여 링모양의 패턴형성을 하였다. 이런 구조를 통해 내부 용량값은 진공중에 밀폐되는 안정적인 용량값을 얻을 수 있게 된다. 다이어프램 주위에 형성된 LTO박막의 링은 강도를 높이기 위해 1000℃에서 열처리를 행하였다. 금속화공정은 Ni(300 nm)/Cr(100 nm)/Au(500 nm)를 증착하여 패턴공정을 행하였다. 고온에서 장시간 안정하고 낮은 접촉저항을 갖는 ohmic 접촉의 형성을 위해 다결정 3C-SiC박막과의 접촉물질로 니켈 박막을 사용하였다. 마지막으로 최종 전극작업 공정 후 RTA에 의해 750℃에서 금속열처리를 행하였다. 그림 4의 (b)는 금속화공정을 행한 후 SEM(scanning electron microscope)사진을 나타낸 것이다. 제작 된 용량형 압력센서의 기본성능측정 및 고온특성측정을 위해 고온에서 측정 가능한 세라믹 패키징을 하여 센서출력을 분석하였다.

그림 5는 제작 된 용량형 압력센서 칩을 패키징한 후 사진이다. 고온용 세라믹 페이스트를 사용하여 칩을 TO-5 다이위에 고정시킨 후 칩분딩을 행하였다.



(a) After sacrificial layer removal



(b) After metalization

그림 4. 용량형 압력센서의 공정 후 SEM 사진.  
Fig. 4. SEM images of capacitive pressure sensors after process.

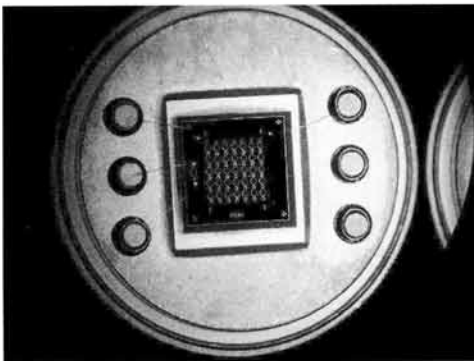


그림 5. 패키징 된 용량형 압력센서의 사진.  
Fig. 5. Photograph of packaged capacitive pressure sensor.

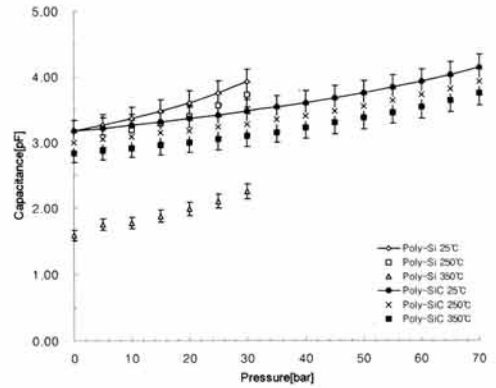


그림 6. 용량형 압력센서의 압력다이아프램 물질에 따른 출력특성.  
(비접촉식, 반경=50 µm, 셀 수=117).

Fig. 6. Output characteristics of capacitive pressure sensors according to material of pressure diaphragms.  
(Non-contact mode, Radius=50 µm, cell no.=117)

그림 6은 용량형 압력센서의 상하부전극으로 사용되는 압력 다이어프램 물질이 다결정 Si와 다결정 3C-SiC로 제작된 샘플의 비접촉식에서 온도에 따른 출력특성을 비교한 그래프이다. 동일한 구조로 다이어프램 반경 50 µm, 상하부전극 겹 2.5 µm로 제작한 용량형 압력센서의 출력은 다결정 3C-SiC 박막을 사용한 경우가 측정 압력 영역은 넓었으며 감도는 다결정 Si보다 적은 것을 확인하였다. 온도에 따른 출력특성을 비교하니 압력값이 10 bar 기준일 때 다결정 Si인 경우 온도가 250°C에서는 출력값에 대한 온도계수가 0.023 %/°C였으나 온도가 350°C로 증가하면서 온도계수가 0.144 %/°C로 그 값이 현저하게 커짐을 알 수 있었다. 이는 다결정 Si으로 제작한 용량형 압력센서는 250°C까지는 사용가능하나 그 이상의 온도에서는 그 영향이 커서 사용하기 힘들 것으로 사료된다. 다결정 3C-SiC로 제작한 용량형 압력센서는 350°C에서 출력값에 대한 온도계수가 0.032 %/°C정도로 고온에서 일정한 온도특성곡선을 나타내며 안정적인 특성을 보였다.

그림 7은 제작된 다결정 3C-SiC 용량형 압력센서의 전 영역에서 온도별 압력에 따른 출력특성을 보여준다. 용량형 압력센서 다이어프램 반경은 50 µm이고 전극간 겹은 1.4 µm이며 칩상에 병렬로

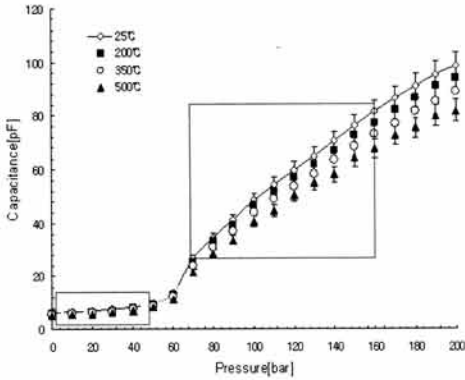


그림 7. 다결정 3C-SiC 용량형 압력센서의 온도에 따른 출력특성.  
(갭=1.4 um, 반경=50 um, 셀 수=117).  
Fig. 7. Output characteristics of poly 3C-SiC capacitive pressure sensors according to temperature.  
(Gap=1.4 um, Radius=50 um, cell no.=117)

배열된 셀의 개수는 117개 이다. 첫 번째 구간인 1 bar에서 70 bar까지는 비접촉식을 나타낸 것이고 70~100 bar구간은 비접촉식에서 접촉식으로 변하는 구간이고, 100 bar에서 160 bar구간은 가장 선형적으로 변화는 구간으로 비선형성이 약 0.7% 이내이고 감도는 0.55 pF/bar 였다. 그 이상에서는 포화되는 것을 볼 수 있다. 온도가 증가할수록 출력용량값은 감소하였으며, 500°C에서는 비선형성이 1.6%로 증가하였으며 감도는 0.49 pF/bar로 감소하였다. 500°C일 때 압력 100 bar에서 출력값에 대한 온도계수는 0.034 %/°C 였다. 전체적인 고온에서의 온도특성은 일정한 비율로 안정적인 추세를 보였다.

그림 8은 제작된 다결정 3C-SiC 용량형 압력센서를 고온 환경에서 60일간 노출시켜, 주기별로 0 bar일 때 측정된 센서의 용량값 변화를 나타낸 것이다. 고온 환경 노출에서 센서의 내구성이 불안한 경우는 패턴으로 구성된 상하부전극막의 열적 반응으로 인한 비저항 변화 또는 산화로 인한 저항증가, 그리고 패턴상의 박이 일어나는 박리 등을 예상할 수 있다. 제작된 센서의 경우 초기 용량값은 6.7 pF였으며, 용량변화값은 ±0.03 pF으로 0.045%이내의 Drift 특성이 나왔다. 제작된 용량형 압력센서의 경우 내부 재료의 열적 안정성 및 내구성이 높아 고온 환경에서도 아주 안정적인 출력값을 얻을 수 있었다.

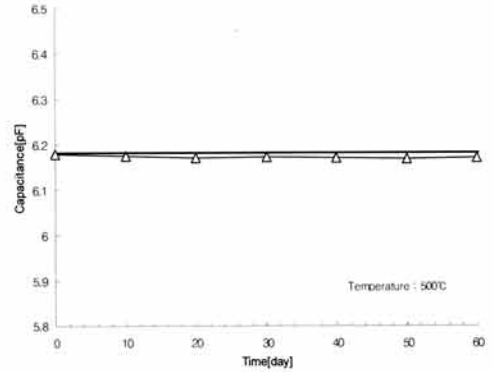


그림 8. 용량형 압력센서의 장기신뢰성.  
(60일, 500°C).  
Fig. 8. Long-term stability of poly 3C-SiC capacitive pressure sensors.  
(500°C for 60 days).

#### 4. 결론

본 연구에서는 표면 MEMS 기술을 이용하여 다결정 3C-SiC 용량형 압력센서를 제작하기 위한 공정과 고온 환경에도 사용가능한 출력에 대한 특성을 분석, 평가하였다. 표면 MEMS 기술을 기초로 하여 다결정 3C-SiC 용량형 압력센서는 각 공정별 최적화된 설계를 통해 제작되었다. 제작된 다결정 3C-SiC 용량형 압력센서는 다이아프램 반경이 50 um이고 다이아프램간 갭은 1.4 um이며 칩상에 병렬로 배열된 셀의 개수는 117 개 이다. 출력을 분석한 결과 1 bar에서 70 bar까지는 작은 휨인 비접촉식으로 나타났고, 70~100 bar구간은 비접촉식에서 접촉식으로 변하는 구간이고, 큰 휨 구간인 100 bar에서 160 bar구간은 가장 선형적으로 변화는 구간으로 비선형성이 약 0.7%이내이고 감도는 0.55 pF/bar 였다. 그 이상에서는 포화되는 것을 볼 수 있었다. 온도가 증가할수록 출력 용량값은 감소하였으며, 500°C에서는 비선형성이 1.6%로 증가하였으며 감도는 0.49 pF/bar로 감소하였다. 500°C일 때 압력 100 bar에서 출력값에 대한 온도계수는 0.034 %/°C 였으며, 전체적인 압력구간에서 고온특성은 일정한 비율로 양호한 특성이 나타났다. 그리고, 고온에서의 장기간 안정성도 우수함을 보였다. 따라서, 표면 MEMS 기술을 이용하여 제작된 다결정 3C-SiC 용량형 압력센서는 고온에서 우수한 특성을 나타내는 극한환경용 센서로서 유용하게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고 문헌

- [1] Y. Lee and K. Wise, "A batch-fabricated silicon capacitive pressure transducer with low temperature sensitivity", *IEEE Trans. Electron Devices* ED-29, p. 42, 1982.
- [2] J. Summinto, G. Yeh, T. Spera, and W. Ko, "Silicon diaphragm capacitive sensor for pressure, flow, acceleration, altitude measurements", *Proc. 5th Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators*, 1987.
- [3] S. Guo, J. Guo, and W. H. Ko, "A monolithically integrated surface micromachined touch mode capacitive pressure sensor", *Sensors and Actuators A*, Vol. 80, p. 224, 2000.
- [4] M.-X. Zhou, Q.-A. Huang, and M. Qin, "Modeling, design and fabrication of a triple-layered capacitive pressure sensor", *Sensors and Actuators A*, Vol. 117, p. 71, 2005.
- [5] K. Kasten, J. Amelung, and W. Mokwa, "CMOS-compatible capacitive high temperature pressure sensors", *Sensors and Actuators A*, Vol. 85, p. 147, 2000.
- [6] T. Schary, M. Meiners, W. Lang, and W. Benecke, "Surface micromachined capacitive absolute pressure sensors on fused silica substrates operable in touch-mode", *Sensors IEEE*, p. 4, 2005.
- [7] V. Tsouti, G. Bikakis, S. Chatzandroulis, D. Goustouridis, P. Normand, and D. Tsoukalas, "Impact of structural parameters on the performance of silicon micromachined capacitive pressure sensors", *Sensors and Actuators A*, Vol. 137, p. 20, 2007.
- [8] Q. Wang and W. H. Ko, "Modeling of touch mode capacitive sensors and diaphragms", *Sensors and Actuators A*, Vol. 75, p. 230, 1999.
- [9] M. Mehregany, C. A. Zorman, N. Rajan, and C. H. Wu, "Silicon carbide MEMS for harsh environments", *Proceeding of the IEEE*, Vol. 8, p. 1594, 1998.
- [10] C. H. Wu, C. A. Zorman, and M. Mehregany, "Fabrication and testing of bulk micro-machined silicon carbide piezoresistive pressure sensors for high temperature applications", *IEEE Sensors J.*, Vol. 6, No. 2, p. 316, 2006.