초고온용 다결정 3C-SiC 마이크로 압력센서의 제작

정 귀 상*

Fabrication of polycrystalline 3C-SiC micro pressure sensors for high temperature applications

Gwi-sang Chung[†]

Abstract

High temperature micro pressure sensors were fabricated by using polycrystalline 3C-SiC piezoresistors grown on oxidized SOI substrates by APCVD. These have been made by bulk micromachining under $1 \times 1 \text{ mm}^2$ diaphragm and Si membrane thickness of $20 \mu\text{m}$. The pressure sensitivity of implemented pressure sensors was $0.1 \text{ mV/V}\cdot\text{bar}$. The non-linearity and the hysteresis of sensors were $\pm 0.44 \% \text{ FS}$ and $0.61 \% \text{ FS}$. In the temperature range of $25^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ with 5 bar FS , TCS (temperature coefficient of sensitivity), TCR (temperature coefficient of resistance), and TCGF (temperature coefficient of gauge factor) of the sensor were $-1867 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, $-792 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, and $-1042 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, respectively.

Key Words : polycrystalline 3C-SiC, high temperature, pressure sensor

1. 서 론

최근 자동차, 우주항공, 산업자동제어, 핵발전소 등 300°C 이상의 고온에서도 동작이 가능한 극한 환경용 센서를 요구되고 있다. 특히, 엔진을 제어할 수 있는 연소 챔버, 디젤 엔진, 제트 터빈, 배기 압력, 연료 가스, 증기 압력뿐만 아니라 유체 모니터링, 핵 모니터링 등의 압력을 측정하기 위해서 초고온용 압력 센서가 필요하다^[1].

Si 압저항형 압력센서는 pn 접합부 누설전류로 인하여 120°C 이상의 온도에서는 사용이 불가능하며 또한, 이방성 식각기술에 의한 압력센서용 박막 멤브레인을 제작할 경우, 두께를 정확하게 제어하기가 어렵다^[2]. 한편, SOI와 pSOI(poly-Si on insulator)의 압력센서가 개발되어 $200^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C}$ 까지 견딜 수 있지만, 선형성 문제가 있다^[3].

SiC(silicon carbide)는 Si보다 큰 밴드갭($2.41 \text{ eV} \sim$

3.26 eV), 항복전압($2.2 \sim 2.4 \times 10^6 \text{ cm/s}$), 열전도율($3.0 \text{ W/cm}\cdot\text{K} \sim 3.8 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$), 전자이동도($2.0 \times 10^7 \text{ cm/sec}$)의 특성뿐만 아니라 우수한 생체 적합성과 높은 공진 주파수(600 MHz)를 가지고 있으며 또한, 고온에서도 매우 안정적이고 기계적 특성이 우수하며 화학적 안정성과 내부 식성 잇점을 가지고 있기 때문에 차세대 RF, Bio, 극한 환경용 MEMS로 크게 주목을 받고 있다^[4].

특히, 6H-SiC의 압력센서는 500°C 까지 안정하게 동작이 가능하지만, 기판의 크기 한계(2 인치)로 낮은 수율과 마이크로머시닝의 어려움으로 인해 아직 문제점이 있다^[5]. 한편, 단결정 3C-SiC/SOI 압력센서는 식각이 비교적 용이하고 300°C 의 고온용 MEMS로 적합하지만, 누설전류와 SiC와 Si간의 격자 부정합, 열팽창 계수가 존재한다. 이를 해결하기 위해 SDB법에 의한 SiCOI(SiC on insulator) 압력센서가 제작되어 400°C 의 고온에도 안정하지만, 기판의 낮은 수율과 고가격의 문제가 남아있다^[6]. 더구나, 단결정 3C-SiC의 용량형 압력센서가 개발되어 400°C 에서 동작이 가능하고 높은 감도를 가지지만, 낮은 수율과 제작 공정이 어렵고 압력 범위($0.5 \text{ bar} \sim 3 \text{ bar}$)가 좁은 것이 단점이다^[7].

따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 산화된 SOI 기판위에 성장이 가능한 다결정

울산대학교 전기전자정보시스템공학부(School of Electrical Eng., University of Ulsan)

[†]Corresponding author : gschung@ulsan.ac.kr

(Received : December 7, 2010, Revised : January 7, 2010

Accepted : January 8, 2010)

Fig. 1. Fabrication process sequences of a poly 3C-SiC micro pressure sensor.

3C-SiC을 압저항으로 사용하여 다결정 3C-SiC 마이크로 압력센서를 제작하여 특성을 분석 및 평가하였다.

2. 실험

Fig. 1은 다결정 3C-SiC 마이크로 압력센서의 제작 공정순서를 도식적으로 나타낸 것이다. 먼저, 20 μm SOI 기판에 0.8 μm 의 산화막을 증착한 다음 (a); TMAH 이방성 식각용액으로 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 크기의 멤브레인을 형성했다. (b); 산화막을 갖는 SOI 기판위에 다결정 3C-SiC를 APCVD로 0.5 μm 성장시켜 (c); 마그네트론 RIE로 다결정 3C-SiC 압저항을 형성하였다^[8]. 마지막으로 (d); 고온에서 열적으로 안정된 TiW 박막으로 전극을 형성했으며 리이드선용 pad 부분에 Au를 증착하였다.

Fig. 2는 제작된 다결정 3C-SiC 압저항과 Au/TiW 전극이 형성된 광학 및 SEM 이미지이다.

음의 특성을 위해 900 $^{\circ}\text{C}$, 45초 동안 RTA(rapid temperature annealing) 공정을 수행하였다^[9]. 제작된 센서와 패키지간의 열팽창 계수를 줄이기 위해 pyrex #7740 glass를 기판에 400 $^{\circ}\text{C}$, DC 800 V를 인가하여

Fig. 2. (a) Optical and (b) SEM images of Au/TiW electrodes and a close up view of a piezoresistor.

Fig. 3. Images of SiC micro pressure sensors: (a) before capping and (b) after capping.

Fig. 4. Output characteristics of fabricated poly 3C-SiC pressure sensors with applied pressure.

양극 접합하였다. Fig. 3은 캡핑 전과 후의 패키징 사진이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 상온에서 다결정 3C-SiC 압저항형 압력센서의 압력에 따른 출력특성을 나타낸 것이다. 압력센서

Fig. 5. Non-linearity of pressure sensitivity in the range of applied pressure.

Fig. 6. Hysteresis of fabricated pressure sensors in the range of applied pressure.

의 인가압력은 0 bar~8 bar의 범위에서 출력전압을 측정하였다. 기존 단결정 Si의 감도는 1.72 mV/V·bar, 다결정 Si의 감도는 0.9 mV/V·bar, 6H-SiC는 2.5 mV/V·bar, 단결정과 다결정 3C-SiC는 2.6 mV/V·bar, 0.3 mV/V·bar^[10,11]로 각각 보고되고 있다. 본 연구에서 사용된 SiC의 압저항 농도는 $10^{19}/\text{cm}^2$ 였으며 제작된 압력센서의 감도는 0.1 mV/V·bar로 단결정보다는 비교적 낮았다. 도핑 농도가 클수록 그래핀 크기는 줄어들게 되고 압저항 계수가 감소하기 때문에 감도가 낮은 것으로 사료된다^[7].

Fig. 5는 제작된 다결정 3C-SiC 마이크로 압력센서의 비선형 특성을 나타낸 것이다. 비선형성은 불순물 농도와 저항값과 관계가 있으며 또한, 다이어프램이 얇으면 응력으로 인해 비선형성이 증가하게 된다. 더구나, 비선형성은 온도에 의존하며 저온보다 고온에서 낮은 값

Fig. 7. Output characteristics of fabricated pressure sensors with temperature.

을 갖는다. 기존 단결정 Si의 비선형성은 $\pm 0.15\%$ FS, 다결정 Si는 $\pm 0.5\%$ FS, 6H-SiC는 -0.17% FS, 단결정과 다결정 3C-SiC는 4.1, 8.3 %FS^[10,11]로 각각 보고되고 있다. 본 연구에서 제작된 압력센서는 0 bar~8 bar까지 압력범위에서 비선형성 결과, $\pm 0.44\%$ FS로 우수한 특성을 나타내었다.

Fig. 6은 제작된 압력센서의 히스테리시스 특성을 나타낸 것으로 압력의 증가와 감소에 따른 출력전압 차이를 측정된 것이다. 단결정 Si의 히스테리시스는 $\pm 0.5\%$ FS, 다결정 Si는 $\pm 0.5\%$ FS, 6H-SiC는 0.17%FS, 단결정 3C-SiC는 $\pm 0.46\%$ FS^[10,11]로 각각 보고되고 있다. 본 연구에서 제작한 압력센서의 히스테리시스 특성은 0.61 %FS로 측정되었다.

Fig. 7은 인가 압력(0 bar~8 bar)에서 온도변화(25 °C~400 °C)에 따른 출력특성을 나타낸 것이다. 온도가 증가함에 따라 감도가 떨어지지만, 온도에 따른 출력이 비교적 선형적임을 알 수 있다. 단결정 Si의 TCS(temperature coefficient of sensitivity)는 $-1223 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ^[10], 다결정 Si는 $-644 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ^[11]로 낮게 측정되었지만, 온도 범위는 상온에서 150 °C까지만 가능하였다. 단결정 3C-SiC의 TCS는 $-1711 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 로 측정되었다^[10]. 제작된 압력센서의 감도 또한, 온도가 증가함에 따라 감소하는 특성을 나타내었으며 TCS는 $-1867 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 로 측정되어 단결정만큼 우수한 온도 특성을 나타냈다.

설계한 압저항 한 개의 저항값은 7.5 k Ω 이었으나, 상온에서 측정된 저항값은 약 6 k Ω 이었고 전체 저항은 24 k Ω 이었다. 온도가 증가함에 따라 압저항의 저항값은 감소하는 특성을 보였다. Fig. 8은 온도에 따른 TCR(temperature coefficient of resistance)와 TCGF

Fig. 8. Variations of TCR and TCGF of fabricated SiC pressure sensors with temperature.

(temperature coefficient of gauge factor)의 변화를 나타낸 것이다. 압력을 가하지 않은 단결정 Si의 TCR (25 °C~150 °C) 값은 +1150 ppm/°C^[10]로 나타났고, 다결정 Si는 +750 ppm/°C^[11]로 낮게 측정되었지만, 사용 온도 범위는 매우 좁다. 단결정 3C-SiC의 TCR (30 °C~400 °C) 값은 -2050 ppm/°C^[7]인 반면에 다결정 3C-SiC의 TCR(25 °C~400 °C) 값은 -792 ppm/°C로 낮게 측정되었다. Si과 단결정 3C-SiC보다 온도에 대한 저항변화가 작고 고온까지 일정한 특성을 유지하였다. 압력 5 bar일때의 TCGF(25 °C~400 °C) 값은 -1042 ppm/°C로 증가하지만, 온도에 따른 특성 또한 일정하였다.

4. 결 론

본 연구는 초고온 다결정 3C-SiC 마이크로 압저항형 압력센서에 관한 것으로 인가 압력에 따른 출력 전압을 측정한 결과, 압력감도는 0.1 mV/V·bar이었다. 감도는 낮지만 비선형성은 $\pm 0.44\%$ FS로 매우 우수하였다. 또한, 히스테리시스 특성은 0.61 %FS로 측정되었다. 더구나, 25 °C~400 °C에서의 온도특성을 분석한 결과, 감도와 선형성은 온도가 증가할수록 감소 특성을 나타냈으며, TCS는 -1867 ppm/°C, TCR은 -792 ppm/°C, TCGF은 -1042 ppm/°C로 각각 측정되었다.

따라서, 다결정 3C-SiC 마이크로 압력센서는 400 °C의 극한환경에서도 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 산학협동재단의 지원을 받아 수행한 결과입니다.

참고 문헌

- [1] G. Krotz, H. Moller, M. Eickhoff, S. Zappe, R. Ziremann, and E. Obermeire, "Heteroepitaxial growth of 3C-SiC on SOI for sensor applications", *Materials Sci. & Eng.* vol. 61-62, pp. 516-521, 1999.
- [2] J. M. Borkey and K. D. Wise, "Integrated signal conditioning for silicon pressure sensors", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-26, pp. 1906-1910, 1979.
- [3] G. S. Chung, "Thin SOI structures for sensing and integrated circuit applications", *Sen. & Actu. A*, vol. 39, pp.241-251, 1993.
- [4] C. A. Zorman and M. Mehregany, "Silicon carbide for MEMS and NEMS an overview", *Proc. of the IEEE*, vol. 2, pp. 1109-1114, 2002.
- [5] R. Okojie, A. Ned, and A. Kurtz, "Operation of 6H-SiC pressure sensor at 500 °C", *Sen. & Actu. A*, vol. 16-19, pp. 1411-1414, 1997.
- [6] C. H. Wu, C. A. Zorman, and M. Mehregany, "Fabrication and testing of bulk micromachined silicon carbide piezoresistive pressure sensors for high temperature applications", *IEEE Sensors J.*, vol. 6, no. 2, pp. 316-324, 2006.
- [7] D. J. Young, J. Du, C. A. Zorman, and W. H. Ko, "High-temperature single-crystal 3C-SiC capacitive pressure sensor", *IEEE Sensors J.*, vol. 4, no. 4, pp. 464-470, 2004.
- [8] G. S. Chung, C. M. Ohn, and C. W. Nam, "A study on polycrystalline 3C-SiC etching with magnetron applied reactive ion etching for M/NEMS applications", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 16, no. 3, pp. 197-201, 2007.
- [9] G. S. Chung and C. M. Ohn, "Titanium tungsten ohmic contacts to n-type poly-crystalline 3C-SiC films improved by surface-treatments for harsh-environment micro-electromechanical system applications", *J. Kor. Phys. Soc.* vol. 51, pp. 1344-1349, 2007.
- [10] S. K. Park and S. J. Park, "A fabrication of polycrystalline silicon pressure sensors for linearity at high temperature range", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 9, no. 2, pp. 1380-1386, 1996.
- [11] G. S. Chung and K. S. Kim, "Characteristics of polycrystalline 3C-SiC films grown for extreme environment micro/nano electromechanical systems by using a single-source precursor of hexamethyldisilane", *Sen. & Actu. A*, vol. 155, pp. 125-130, 2009.

정 귀 상

- 1992년 3월 TUT(공학박사)
- 2004년 2월 UC Berkeley 연구교수
- 2009년 8월 Stanford Univ. 방문교수
- 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
- 주관심분야: Wireless Sensor Nodes & Energy harvesting based on M/NEMS