3C-SiC 마이크로 히터의 제작과 그 특성

정귀상[†] · 정재민

Fabrication of 3C-SiC micro heaters and its characteristics

Gwi-yang Chung[†] and Jae-Min Jeong

Abstract

This paper describes the characteristics of a poly 3C-SiC micro heater which was fabricated on AlN(0.1 μm)/3C-SiC(1.0 μm) suspended membranes by surface micro-machining technology. The 3C-SiC and AlN thin films which have wide energy band gap and very low lattice mismatch were used sensors for high temperature and voltage environments. The 3C-SiC thin film was used as micro heaters and temperature sensor materials simultaneously. The implemented 3C-SiC RTD(resistance of temperature detector) and the power consumption of micro heaters were measured and calculated. The TCR(thermal coefficient of the resistance) of 3C-SiC RTD is about $-5200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ within a temperature range from 25°C to 50°C and $-1040 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ at 500°C . The micro heater generates the heat about 500°C at 10.3 mW. Moreover, durability of 3C-SiC micro heaters in high voltages is better than Pt micro heaters. A thermal distribution measured and simulated by IR thermovision and COMSOL is uniform on the membrane surface.

Key Words : poly 3C-SiC, AlN, micro heater, RTD, TCR

1. 서 론

마이크로 히터는 가스센서, 유량센서, 열진공 센서, 열에 의해 동작하는 캔틸레버 형 팁을 이용한 데이터 저장 장치와 nano dip pen lithography, 열량측정기 등에 많은 연구가 지속적으로 이루어지고 있다^[1]. 지금까지 SOI, poly-Si, SiO₂ 또는 Si₃N₄와 같은 물질로 된 멤브레인 위에 마이크로 Pt 히터를 제작하고, 낮은 소비 전력으로 높은 온도를 발열시키는 것에 중점을 두었다. 그러나, 800°C 이상의 고온에서 안정적이고, 고전압에 대한 내구성이 우수한 히터의 연구는 활발히 이루어지지 않고 있다^[2].

다결정 3C-SiC는 에너지 밴드갭이 크고 열팽창계수가 낮아 고온에서도 변화가 거의 없으므로 고온에서 동작하는 센서에 다양하게 적용되고 있다. 또한, 비저항의 범위가 넓고, 기계적, 화학적 특성이 우수하여 고

전압에서 사용되는 센서에 적용이 가능하고, 반도체 공정 기술로 제작이 가능하기 때문에 다양한 분야에서 연구가 활발히 이루어지고 있다^[3].

또한, AlN은 녹는점이 높고 밴드갭이 커서 고온에서 발생할 수 있는 실리콘과 감지 물질 사이의 반응을 막아주고, 히터 물질에서 실리콘으로의 누설 전류를 막는 절연층 역할을 한다. 그리고, 다결정 3C-SiC와 격자부정합의 차이가 약 1 % 밖에 나지 않기 때문에 고온에서 발생 가능한 스트레스를 크게 줄일 수 있으며^[4], 마이크로머시닝기술을 위한 미소패턴 형성이 용이하여 마이크로 히터 구조 제작에 적합하다.

본 연구에서는 고온에서 안정적이고 고전압에서도 이상 없이 사용 가능한 다결정 3C-SiC와 AlN 박막을 사용하여 고온, 고전압용 SiC 마이크로 히터와 SiC 박막형 RTD(resistance of temperature detector)를 각각 설계 및 제작했으며 그 특성을 분석하였다.

2. 실험

Fig. 1(a)와 (b)는 제작된 SiC 마이크로 히터의 단면도와 표면의 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 500 μm

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

[†]Corresponding author : gschung@ulsan.ac.kr
(Received : May 11, 2009, Revised : July 1, 2009
Accepted : July 16, 2009)

Fig. 1. (a) Schematic cross section and (b) SEM image of the 3C-SiC micro heater.

두께를 갖는 Si(100) 기판위에 APCVD로 다결정 3C-SiC를 1.0 μm 성장한 후^[5], 3C-SiC 마이크로 히터의 누설 전류를 막기 위해 절연층으로 사용될 AlN을 RF 마그네트론 스퍼터링법으로 0.1 μm 를 증착하고, AlN의 특성 향상과 식각을 막기 위해 900 $^{\circ}\text{C}$ 에 Ar 분위기에서 열처리했다. Al을 식각 마스크로 사용하여 다결정 3C-SiC를 RIE로 식각하고 AlN/3C-SiC 멤브레인 패턴을 형성하였다^[6]. 또한, 3C-SiC 박막을 공정의 편리성과 정확한 온도 측정을 위해서 히팅 물질과 온도 센서를 같은 플랫폼 상에 APCVD로 증착하고, RIE 공정으로 패터닝했으며 마지막으로 산화막을 제거하여 브릿지 구조를 갖는 마이크로 히터를 제작하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 마이크로 히터에 내장된 3C-SiC 박막형 RTD의 온도에 따른 저항의 변화를 나타낸 것이다. 핫플레이트로 RTD에 열을 가해주면서 KEITHLEY 4200-SCS로 전류-전압 특성을 측정하고, 저항의 변화를 계산하였다. 3C-SiC는 제작공정시 도핑량이 증가함에 따라 온도저항계수 (TCR)의 변화량이 감소한다. 본 연구에서 제작된 3C-SiC 박막은 상온에서 6.2 k Ω 였으며 온도가 증가함에 따라 저항이 감소하여 500 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 3.15 k Ω 였다. 이는 기존의 3C-SiC RTD보다 TCR의 변화량이 적으므로 보다 넓은 온도 범위에서 온도 측정

Fig. 2. The resistance variations of fabricated 3C-SiC RTD with temperature.

Fig. 3. TCR variations of fabricated 3C-SiC RTD's with temperature.

이 가능하다. 온도에 따른 저항의 변화를 2차 퇴행 방정식을 이용하여 계산하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R(T) = A + B_1 T + B_2 T^2$$

$$A = (6306.55 \pm 43.52) \Omega$$

$$B_1 = (-13.937 \pm 0.062) \Omega/^{\circ}\text{C}$$

$$B_2 = (0.0147 \pm 0.000643) \Omega/^{\circ}\text{C}^2$$

여기서, T는 섭씨온도이고, NTC 근사식으로 표현했을 경우, 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$R(T) = R_{25^{\circ}\text{C}} \cdot \exp\left(B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{25}\right)\right)$$

$$B = (18.57 \pm 4.35)^{\circ}\text{C}$$

Fig. 3은 온도에 따라 제작된 3C-SiC 박막형 RTD의 (TCR) 변화를 나타낸 것이다. TCR은 식 (1)을 통해 계산할 수 있다.

Fig. 4. Heating temperature of 3C-SiC micro heater according to input voltage.

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \times \left(\frac{R - R_0}{T - T_0} \right) \quad (1)$$

여기서, T_0 는 25 °C이고 R_0 는 25 °C에서의 저항값이다. 상온에서 TCR은 약 -5200 ppm/°C로 나타났으며 온도가 증가함에 따라 TCR이 증가하여 500 °C에서는 -1040 ppm/°C임을 확인하였다. 결정 계면안의 dangling bonds와 결합에 의한 캐리어의 포획으로 인한 계면 계면에 있는 에너지 장벽의 변화로 TCR이 음의 값을 갖는다. 이 현상은 다결정 Si의 경우와 흡사하다^[7].

Fig. 4는 제작된 3C-SiC 마이크로 히터에 전압을 인가하여 발열되는 온도 변화를 나타낸 것이다. 마이크로 히터에 인가되는 전압을 증가시키면서 RTD의 저항을 KEITHLEY 4200-SCS로 측정하여 온도를 역으로 구하였다. 인가전압이 6 V일때, 제작된 RTD의 저항이 3.15 kΩ으로 발열온도는 500 °C였다.

Fig. 5은 제작된 3C-SiC 마이크로 히터의 소비전력에 따른 온도의 변화를 나타낸 것이다. 마이크로 히터에 인가된 전압과 디지털 멀티미터로 측정된 전류를 이용하여 소비전력을 구하였다. 마이크로 브릿지 구조로 제작하여 Si 기판으로의 전도에 의한 열손실을 최소화하여 비교적 낮은 소비전력에도 높은 온도를 발생시키는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 제작된 마이크로 히터는 500 °C의 온도에서 10.3 mW의 소비전력을 나타내었다. 일반적으로 널리 사용되고 있는 Pt 히터보다 적은 소비전력에도 비슷한 온도를 발열하는 특성을 얻을 수 있었다^[8].

Fig. 6은 Pt 및 3C-SiC 마이크로 히터의 고전압 특성 측정을 위해 전압 변화에 따른 저항의 변화를 나타낸 것이다. Pt의 경우, 약 15 V까지는 정상적으로 동작하

Fig. 5. The heating temperature variation according to input power of 3C-SiC micro heater.

Fig. 6. The comparison of durability in high voltage of Pt, 3C-SiC micro heater.

다가 그 이상에서는 고전류로 인해 발화되어 디바이스가 깨지는 현상이 나타났다^[7]. 그러나, 3C-SiC 마이크로 히터는 약 30 V까지 정상적으로 작동하였다. 이를 통해 3C-SiC 마이크로 히터가 Pt 마이크로 히터에 비해 고전압에서 내구성이 우수함을 확인하였다.

Fig. 7(a)와 (b)는 제작된 3C-SiC 마이크로 히터에 약 10 mW의 전력을 인가하였을 경우, 온도 분포와 발열 온도에 관한 시뮬레이션과 적외선 열화상 카메라로 측정한 온도 분포를 각각 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과, 10 mW 소비전력에서 최대, 최소 온도 값이 564.113 °C, 563.779 °C로 실제 제작된 마이크로 히터 결과보다 0.3 mW 낮은 소비전력에서 약 60 °C 이상 높게 발열하였다. 이는 시뮬레이션의 경우, 멤브레인을 지탱하는 브릿지 구조, 패드와 틱간의 접촉저항 등을 무시했기 때문이다. 본 시뮬레이션 결과와 적외선 열화상 카메라를 통해 멤브레인 영역에서 온도분포가 매우

Fig. 7. (a) Simulated and (b) measured temperature distributions by IR thermovision of 3C-SiC micro heaters.

균일함을 확인할 수 있었고, 제작된 3C-SiC 마이크로 히터의 전체적인 온도 분포를 확인할 수 있었다. 적외선 열화상 이미지 결과, 같은 소비전력에서 RTD로 측정된 경우보다 낮은 온도가 측정되었는데, 이는 멤브레인 전체 영역의 평균적인 온도를 감지하였기 때문에 온도가 비교적 낮게 측정됨을 알 수 있다^[9]. AlN/3C-SiC 멤브레인 위에 제작된 마이크로 히터는 NON과 산화막 구조보다도 열전도도가 커서 전력소모는 비교적 크나, 저항패턴에서 발생하는 온도 분포가 매우 균일함을 확인할 수 있다^[10].

4. 결 론

본 연구에서는 균일한 온도 분포를 갖는 AlN/3C-SiC 멤브레인 위에 히터 물질과 RTD로 사용될 다결정 3C-SiC를 APCVD로 증착하여 마이크로 히터와 RTD를 각각 제작하여 TCR, 히터의 발열특성, 소비전력,

고전압에서의 내구성 그리고 온도 분포 특성 등을 분석하였다.

다결정 3C-SiC 박막형 RTD의 TCR은 상온에서 약 $-5200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 였으며 온도가 증가함에 따라 증가하여 500°C 에서는 $-1040 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 이었고, 3C-SiC 마이크로 히터는 500°C 발열하는데 10.3 mW 의 전력을 소모하였다. Pt 마이크로 히터의 경우는 15 V 이상에서 발화되는 현상이 나타난 반면, 3C-SiC 마이크로 히터는 30 V 까지 정상적으로 작동하는 것을 보아 3C-SiC 히터가 Pt 히터에 비해 고전압에 대한 내구성이 우수함을 확인했다. 또한, 제작된 3C-SiC 마이크로 히터는 멤브레인 물질의 열전도도가 커서 매우 균일한 온도 분포를 가짐을 시뮬레이션과 적외선 열화상 카메라를 통해 확인할 수 있었다.

따라서, 다결정 3C-SiC 마이크로 히터는 소비전력이 적고 온도 분포가 균일하며 고전압에서도 사용 가능하여 자동차, 조선, 항공기 엔진 분야와 같은 극한 환경에 사용되는 가스센서, 유량센서 등과 같은 마이크로 센서와 마이크로 액추에이터, 고온용 전자부품 등 넓은 응용분야에 적용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 주관하는 산학협력실 지원사업으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] J. C. Lee, T. Beechem, T. L. Wright, B. A. Nelson, S. Graham, and W. P. King, "Electrical, thermal, and mechanical characterization of silicon micro-cantilever heaters", *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 15, no. 6, pp. 1644-1655, 2006.
- [2] G. Wiche, A. Berns, H. Steffes, and E. Obermeier, "Thermal analysis of silicon carbide based micro hotplates for metal oxide gas sensors", *Sens. Actu. A*, vol. 123, pp. 12-17, 2005.
- [3] G. B. Han and G. S. Chung, "Mechanical characteristics of polycrystalline 3C-SiC thin films using Ar carrier gas by APCVD", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 16, no. 4, pp. 319-323, 2007.
- [4] G. S. Chung, K. S. Kim, and J. H. Lee, "Characteristics of polycrystalline 3C-SiC thin films grown on AlN buffer layer for M/NEMS applications", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 16, no. 6, pp. 457-461, 2007.
- [5] G. S. Chung and J. H. Ahn, "Fabrication and characteristics of polycrystalline 3C-SiC schottky diodes

- for high temperature chemical sensors”, *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 17, no. 6, pp. 414-417, 2008.
- [6] 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.
- [7] J. Zhang, C. Carraro, R. T. Howe, and R. Maboudian, “Electrical, mechanical and metal contact properties of polycrystalline 3C-SiC films for MEMS in harsh environments”, *Surf. Coat. Tech.*, vol. 201, pp. 8893-8898, 2007.
- [8] F. Solzbacher, C. Imawan, H. Steffes, E. Obermeier, and H. Moller, “A modular system of SiC-based microhotplates for the application in metal oxide gas sensors”, *Sen. Actu. B*, vol. 64, pp. 95-101, 2000.
- [9] J. Courbat, D. Briand, and N. F. De Rooij, “Reliability improvement of suspended platinum-based micro-heating elements”, *Sen. Actu. A*, vol. 142, pp. 284-291, 2008.
- [10] Zs. Vizvary, P. Furjes, and I. Barspony, “Thermomechanical analysis of hotplates by FEM”, *J. Microelectronics*, vol. 32, pp. 833-837, 2001.

정귀상

- 1992년 3월 TUT(공학박사)
- 2004년 2월 UC Berkeley 연구교수
- 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
- 주관심 분야: Sensor nodes & Energy harvesting based on M/NEMS

정재민

- 2007년 8월 울산대학교 전기전자정보시스템공학부(공학사)
- 현재 울산대학교 대학원 전기전자정보시스템공학부 석사과정
- 주관심 분야: SiC-M/NEMS