

단결정 실리콘 써모파일을 이용한 접촉형 온도센서 개발

이영태¹ · 이유나² · 이왕훈^{2,+}

Development of a Contact Type Temperature Sensor Using Single Crystal Silicon Thermopile

Young-Tae Lee¹, You-Na Lee², and Wang-Hoon Lee^{2,+}

Abstract

In this paper, we developed contact type temperature sensor with single crystal silicon strip thermopile. This sensor consists of 15 p-type single crystal silicon strips, 17 n-types and contact electrodes on silicon dioxide silicon membrane. The result of electromotive force measuring showed very good characteristic as 15.18 mV/°C when temperature difference between the two ends of the thermopile occurs by applying thermal contact on the thermopile which was fabricated with silicon strip of 200 μm length, 20 μm width, 1 μm thickness.

Keywords : Temperature sensor, Single crystal silicon, Thermopile, SOI, XeF₂ gas

1. 서론

온도센서는 의료기기, 정보기기, 가전 및 환경 모니터링 시스템 등 폭 넓게 사용되고 있다. 온도 센서에는 p-n 접합형(p-n junction) [1], 금속 저항형(metal resistor type)[2] 및 써모파일(thermopile) 형[3] 등이 있다. p-n 접합 형 및 금속 저항 형에 비해 써모파일 형은 전원이 필요하지 않아서 소비 전력이 낮고, 감도도 높은 장점이 있다. 실리콘 써모파일의 제작에는 단결정 실리콘(single crystal silicon) 웨이퍼 상에 p형 또는 n 형 불순물을 주입하여 저항형 스트립을 형성하고 알루미늄과 같은 금속으로 직렬 연결하는 방법을 사용한다[4]. 다른 방법으로는 산화실리콘(silicon dioxide) 층 위에 다결정 실리콘(poly crystal silicon)을 증착하고, 에칭하여 아일랜드 형의 다결정 실리콘 스트립을 제작하여 써모파일을 형성한다[5].

써모파일의 출력전압은 다음 식으로 나타낼 수 있다[6].

$$V = N\alpha_s R_{th} P \quad (1)$$

이 식에서 N은 열전쌍(thermocouple) 수, 즉 스트립 모양의 저항체의 수이며, α_s 는 제벡 계수(seebeck coefficient), R_{th} 는 열저항, P는 열류를 나타낸다. 써모파일의 출력 감도를 향상시키기 위해서는, 열전쌍의 수의 증가, 제벡 계수가 높은 재료 적용, 열저항을 높게 설계하는 것이 필요하다. 여기에서 열전쌍의 수를 증가시키는 것은 소자의 사이즈가 관계가 있어서 설계 파라미터로 사용하는 것이 불가능하다. 따라서 제벡 계수가 높은 재료를 사용하고, 열저항을 높일 수 있는 설계가 필요하다. 본 연구실에서는 감도가 높은 써모파일을 개발하기 위하여 SOI (Silicon-On-Insulator)를 이용하여 써모파일을 개발하였다[6]. SOI의 최상층의 단결정 실리콘 층을 절연층인 산화 실리콘까지 에칭하여 아일랜드 형태의 단결정 실리콘 스트립을 제작하고 직렬 연결하는 방법으로 고감도의 써모파일을 개발하였다[6]. 본 논문에서는 이 써모파일을 응용하여 접촉형 온도센서를 개발한다. 접촉형 온도 센서는 SOI 웨이퍼를 사용하여 아일랜드 형태의 단결정 실리콘 스트립을 제조하고, hot junction에 금속의 스퍼터링(sputtering) 및 에칭(etching) 공정으로 금속 콘택 패턴(metal contact pattern)을 형성 하는 방법으로 개발한다. 본 접촉형 온도센서의 제작에는 SOI 웨이퍼를 사용하여 아일랜드화된 단결정 실리콘 스트립 제작에는 ICP-RIE (Inductive Coupled Plasma RIE) 공정[7]을 사용하고, 멤브레인(membrane)

¹안동대학교 정보전자공학교육과(Department of IT & Electronics Education, Andong National University)
1375 Gyeongdong-ro, Andong-si, Gyeongsangbuk-do 760-749, Korea
²구미전자정보기술원(IT Convergence Technology Research Team, Gumi Electronics and Information Technology Research Institute)
Cheomdangjeop 1-ro 17, Sandong-myeon, Gumi, Gyeongsangbuk-do 730-853, Korea

⁺Corresponding author : whlee@geri.re.kr

(Received : Aug. 5, 2013, Revised : Sep. 11, 2013, Accepted : Sep. 11, 2013)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

제작을 위하여 등방성 드라이 에칭 공정인 XeF₂ 가스 에칭(xenon difluoride gas etching) 공정을 적용하였다. 본 논문에서 개발한 접촉형 온도센서는 의료용(체온 모니터링 등 의료기기), 칼로리미터, 공업용(특정 부의 온도를 모니터링), 농축산업용(가축 건강 모니터링, 식물의 생육 모니터링) 등 다양한 분야에 사용이 가능할 것으로 판단된다.

2. 센서 구조 및 제작 공정

2.1 센서의 구조

SOI를 사용한 접촉형 온도 센서의 구조를 Fig.1에 나타냈다. Fig. 1에서 p형 단결정 실리콘 스트립과 n형 단결정 실리콘 스트립을 직렬 연결하고 hot junction 쪽의 금속을 연장하여 피 측정 물체와 접촉이 가능하게 설계하였다. 그리고 hot junction 부근에 멤브레인(membrane)을 형성하기 위하여 hot junction 사이에 에칭용 창(etching window)을 형성하고, 이곳을 통하여 XeF₂ 가스를 이용한 실리콘 등방성 에칭(etching) 공정을 실시하였다. 접촉 전극(contact electrode)에 피 측정 물체가 접촉되면 금속(알루미늄)을 통하여 열이 hot junction에 전달되면 p형 또는 n형 실리콘 스트립의 다수 캐리어가 cold junction 쪽으로 모여 실리콘 스트립 양단에 기전력(electromotive force)이 발생한다. 직렬 연결된 각 실리콘 스트립에 발생한 기전력이 모두 합쳐져서 출력 전압 전극에 나타난다. 출력 전압은 접촉된 피 측정 물체의 온도에 비례해서 나타난다. 단결정 실리콘 스트립의 사이즈는 200×10×1 μm² 이며 각 실리콘

스트립 사이의 간격은 10 μm 이다. 실리콘 스트립의 수는 p-n형 열전쌍(thermocouple) 15쌍(실리콘 스트립 30개)을 배치하고, 직렬로 연결하였다.

XeF₂ 가스를 이용한 실리콘 등방성 에칭을 위하여 hot junction 사이에 70×40 μm²의 에칭 창을 형성하였다. 에칭 창(etching window)은 표면의 실리콘 산화막을 에칭하여 실리콘 층을 노출시키는 방법으로 형성한다. Fig. 1에서 hot junction 쪽의 스트립 간 연결에 사용한 금속 막을 연장하여 열 접촉 전극으로 사용하는 설계 방법은 본 연구실 고유의 기술로 hot junction에 열을 전달하기 위한 효과적인 방법이다[6].

2.2 제작 공정

Fig. 2에 단결정 실리콘 써모파일을 이용한 접촉형 온도센서의 공정도를 나타냈다. 센서 제작에는 SOI (Si(1.5 μm)//SiO₂(1.5 μm)//Si-sub) 기판을 사용하였다. 초기 산화 후에 단결정 실리콘 스트립 형성을 위하여 ICP-RIE (Inductive Coupled Plasma-RIE) 공정으로 실리콘 에칭(etching)을 실시했다(Fig. 2(b)). P형 및 n형 실리콘 스트립을 형성하기 위하여 붕소(B)와 인(P)을 각각 이온 주입 공정으로 도핑(doping)했다. 이온 주입 조건은 p형 실리콘 스트립 형성에는 BF₃를 사용하고, 가속전압 50 ekeV, 도즈(dose)량은 4.0×10¹⁵ cm⁻² 이었다(Fig. 2(c)). N형 실리콘 스트립 형성에는 PF₃를 사용하고, 가속전압 60 keV, 도즈(dose)량은 4.0×10¹⁵ cm⁻² 의 이온 주입 조건을 사용했다(Fig. 2(c)).

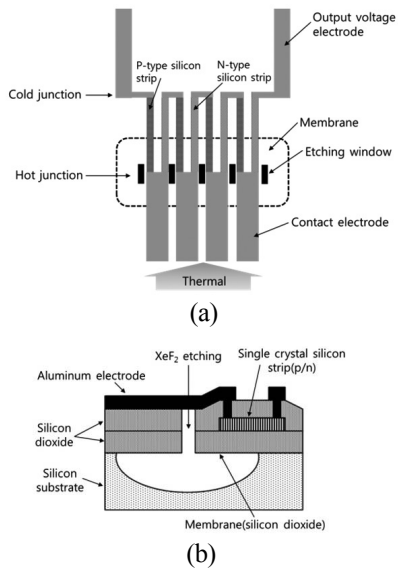


Fig. 1. Structure of contact type temperature sensor using single crystal silicon thermopile, (a) floor plan and (b) cross-section.

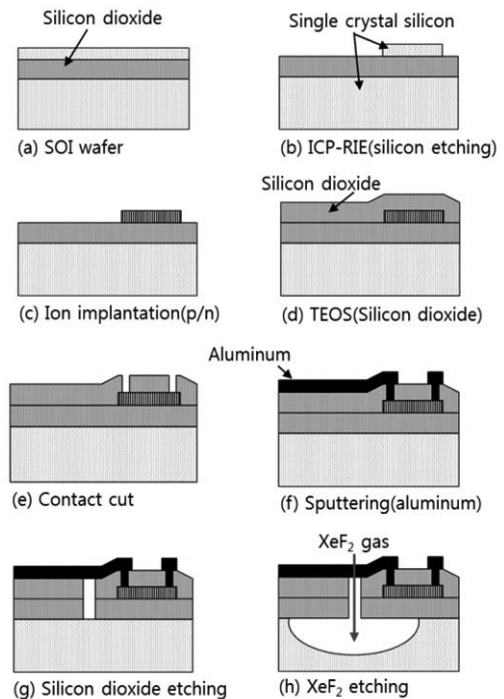


Fig. 2. Fabrication process.

실리콘 스트립을 보호하기 위하여 LPCVD를 이용한 TEOS 공정으로 약 500 nm의 실리콘 산화 막을 형성하고(Fig. 2(d)), contact cut 을 위하여 RIE (Reactive Ion Etching) 공정으로 실리콘 산화막을 에칭했다(Fig. 2(e)). 스퍼터링(sputtering) 공정 및 금속 에칭 공정으로 알루미늄 전극을 형성했다(Fig. 2(f)). XeF₂ 가스를 이용하여 등방성 실리콘 에칭 공정을 실시한다. 열전쌍(thermocouple) 사이에 70×40 μm² 크기의 에칭용 창을 형성했다. 에칭용 창의 형성에는 RIE를 이용하여 실리콘 산화막을 에칭하는 방법을 사용했다(Fig. 2(g)). 실리콘 산화막 멤브레인을 형성하기 위하여, 실리콘 표면이 드러난 에칭용 창에 XeF₂ 가스를 주입하여 실리콘의 등방성 에칭을 실시했다(Fig. 2(h)). XeF₂ 에칭 공정에서 에칭 마스크로 실리콘 산화막과 포토레지스트를 이중으로 사용했다. Fig. 3에 제작된 접촉형 온도센서의 사진을 나타냈다. Fig. 3(a)의 전체 센서 칩에서 특정 물체가 접촉되어 열을 써모파일의 hot junction에 전달하기 위한 접촉 전극, 써모파일 그리고 hot junction과 cold junction 사이의 온도 차에 의하여 발생하는 기전력(electromotive force)을 출력하기 위한 출력 전극 등을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)에 센서 칩의 써모파일만을 확대한 사진을 나타냈다. XeF₂ 가스를 이용한 등방성 에칭 공정으로 제작된 멤브레인(membrane)의 두께가 총 2 μm 로 매우 얇고, 실리콘과 실리콘 산화막의 열팽창계수 차에 의한 잔류응력(residual stress)이 비교적 크기 때문에 다소의 변형이 발생할 것으로 판단된다.

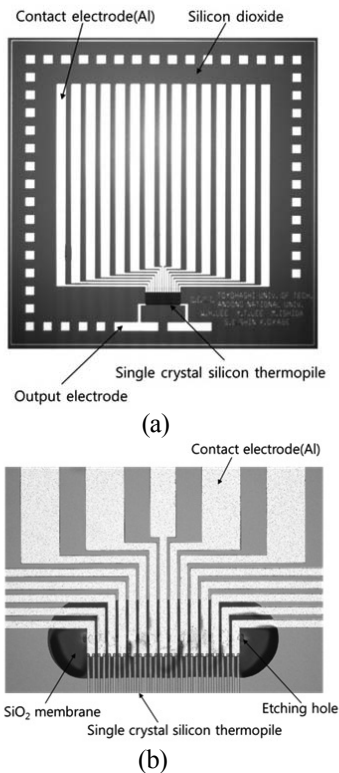
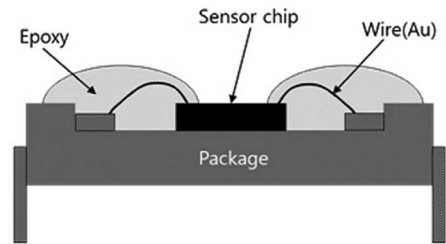


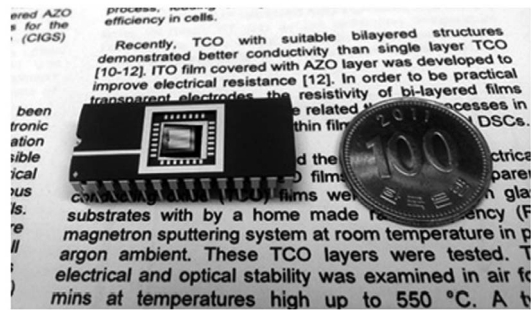
Fig. 3. (a-b) Photograph of the fabricated sensor.

3. 결과 및 고찰

제작된 접촉형 온도센서의 평가를 위하여 센서 칩을 패키지(package) 했다. 센서의 패키지에는 세라믹스 패키지(ceramics package)를 사용했다. 측정 시 와이어본딩(wire bonding)된 금 와이어(gold wire)의 보호를 위해 센서 칩 이의 부분은 에폭시(epoxy)를 코팅했다. 패키징된 센서 구조 및 센서 사진을 Fig. 4에 나타냈다. 제작된 접촉형 온도 센서의 특성을 분석하기 위하여 접촉



(a)



(b)

Fig. 4. Sensor package; (a) Structure and (b) photograph.

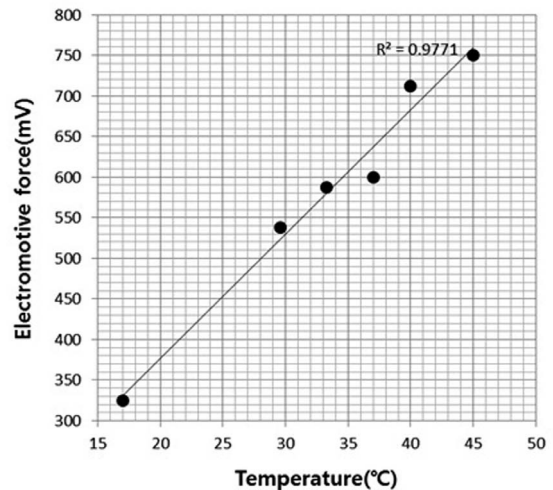


Fig. 5. Measured result of the electromotive force as a function of temperature.

전극 부에 라텍스 튜브를 접촉시키고, 온도가 제어된 물을 튜브 내부로 순환시키는 방법을 사용했다.

써모파일을 상온(24℃)에 노출한 상태로 센서의 특성을 평가했다. 측정 결과를 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5에서 x축은 hot junction에 인가된 온도를 나타내고, y축은 출력되는 기전력(electromotive force)을 나타내고 있다. 출력 감도는 약 15.18 mV/℃로 비교적 높은 값을 나타내고 있으며, 결정 계수는 R²=0.9771로 우수한 결과를 나타냈다.

SOI (Si/SiO₂/Si-sub) 웨이퍼의 최상층 단결정 실리콘을 ICP-RIE 공정으로 실리콘 산화층까지 에칭하는 방법으로 아일랜드화된 단결정 실리콘 스트립을 형성하고, 실리콘 스트립을 직렬 연결하여 써모파일을 제작하였다. 식(1)에 나타낸 것과 같이 써모파일의 출력 기전력의 세기는 제배 계수와 열 저항에 비례한다. 따라서 기존의 확산 저항 형 써모파일 또는 아일랜드화된 다결정 실리콘 형 써모파일에 비해 높은 기전력 발생을 알 수 있다[6]. 본 논문에서는 단결정 실리콘 써모파일을 이용하여 접촉형 온도 센서를 제작하였다. 써모파일은 전원이 필요하지 않기 때문에 전기 저항 형 온도센서에 비해 소비전력이 낮고, 감도가 높은 것이 특징이다. 또한 MEMS 기술을 이용하여 소형으로 제작 가능하기 때문에 소형의 시스템에 장착하여 온도를 모니터링 하는 것이 가능하다.

제작된 단결정 실리콘 써모파일 형 접촉 온도 센서의 사진(Fig.3)에서 얇은 실리콘 산화막(1.5 μm) 위에 실리콘 스트립 및 보호용 실리콘 산화막의 구조로 열팽창계수로 인한 변형이 발생할 수 있을 것으로 예측할 수 있다. 이 변형은 잔류응력(residual stress)이 원인으로, 이 잔류응력 때문에 소자의 파괴가 발생할 수 있을 뿐 아니라 센서 출력 값에 영향을 줄 수 있다. 또한 열팽창계수 차에 의해 발생하는 잔류응력은 온도 의존성을 나타내는 문제점이 있다. 하지만 Fig. 5의 온도-기전력 특성 그래프에서 온도-변형에 따른 출력 기전력의 영향을 확인할 수 없었다. 일반적으로 실리콘 저항이 온도 변화에 따른 변형이 발생하면, 압저항 효과(piezoresistive effect)에 의한 저항 변화가 발생할 수 있다. 압저항 효과에 의한 저항 변화는 다음 식으로 나타낼 수 있다[7].

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi\sigma_T \tag{2}$$

이 식에서 R은 전기 저항 값, π는 압저항 계수(piezoresistive coefficient), σ_T는 재료 간의 열팽창 계수 차에 의한 잔류응력을 나타내고 있다. 잔류 응력은 변형의 방향에 따라 압축응력(compressive stress) 또는 인장응력(tensile stress)으로 구분할 수 있으며, 압축 응력은 음(negative)의 저항 변화를 인장응력은 양(positive)의 저항 변화를 나타낸다. 써모파일을 구성하는 단결정 실리콘 스트립에는 Fig. 6와 같은 변형 발생이 예측되어, 실리콘 스트립 표면에 인장응력과 압축응력이 동시에 발생한다. 멤브레인 중심부에 위치한 실리콘 스트립 표면에 인장응력이 멤브레인 가장 자리에 위치한

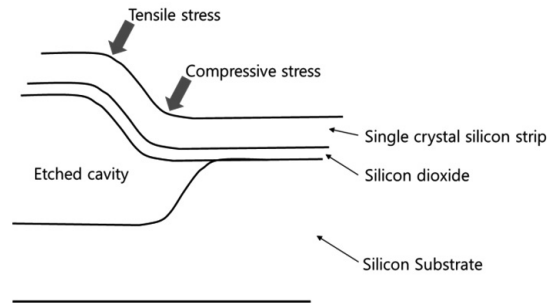


Fig. 6. Stress distribution on single crystal silicon strip.

실리콘 스트립 표면에는 압축응력이 발생하여, 동일 실리콘 스트립 내에 양의 저항 변화와 음의 저항 변화가 동시에 발생하여, 전체적으로 저항 변화가 없는 것으로 나타난다. 따라서 멤브레인의 변형이 실리콘 스트립의 출력 기전력에 영향을 주지 않은 것으로 판단할 수 있다.

단결정 실리콘 스트립 써모파일을 이용한 접촉형 온도 센서는 다양한 분야에 응용이 가능할 것으로 판단된다. 본 논문의 실험에서 알 수 있는 것과 같이 튜브 등과 같은 유체 부품을 설치하고, 유체 부품 내부를 흐르는 액체 또는 기체의 칼로리 측정, 물체의 특정 부위의 온도 측정, 인체의 체온 측정 등 다양한 응용이 가능할 것으로 판단된다. 열원에 부착하는 방법으로 에너지 수확 소자로도 응용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 접촉 전극에 적외선 흡수 층을 코팅하면 적외선 센서로의 개발도 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

SOI (Silicon-On-Insulator)를 응용하여 제작된 단결정 실리콘 스트립 써모파일(thermopile)을 적용하여 접촉형 온도 센서를 개발했다. 써모파일을 응용한 온도 센서는 전원이 필요하지 않기 때문에 저항형 온도 센서에 비해 소비전력이 낮은 것이 특징이다. 단결정 실리콘 써모파일을 이용한 접촉형 온도 센서 제작에는 두꺼운 실리콘 에칭을 위하여 ICP-RIE를 사용하였으며, 멤브레인 제작을 위하여 실리콘 등방성 에칭용 가스인 XeF₂를 사용한 드라이 에칭 공정(dry etching)을 사용했다. 센서 칩 표면에 제작된 에칭용 구멍을 통하여 드라이 에칭을 실시하였다. 제작된 접촉형 온도 센서의 특성 평가 결과 감도가 약 15.18 mV/℃, 결정 계수는 R²=0.9771로 우수한 결과를 나타냈으며 실리콘 스트립의 변형에 따른 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다.

단결정 실리콘 써모파일을 응용한 접촉형 온도센서는 유체의 칼로리 측정, 특정 물체의 온도 모니터링, 인체의 체온 모니터링 시스템 등에 응용이 가능하며, 에너지 수확 소자, 적외선 센서로의 개발도 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 안동대학교 학술연구조성사업(연구교수)에 의하여 연구되었음

REFERENCES

- [1] A. G. McNamara, "Semiconductor diode and transistors as electrical thermometers", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 33, pp. 330-333, 1962.
- [2] S. Middelhoek and S. A. Audet, *Silicon Sensors*, Academic Press, p. 174, 1989.
- [3] T. Berlicki, S. Osadnik and E. Prociow, "Thermal thin-film sensors for r.m.s. value measurements", *Sens. Actuator A-Phys.*, Vol. 27, pp. 629-632, 1991.
- [4] A. W. van Herwaarden and P. M. Sarro, "Thermal sensors based on the seebeck effect", *Sens. Actuator A-Phys.*, Vol. 10, pp. 321-346, 1986.
- [5] D. D. L. Wijngaards, S. H. Kong, M. Bartek, and R. F. Wolffenbuttel, "Thermal stabilization of integrated silicon platforms using polysilicon and SiGe peltier element", *Proceedings Transducers '99*, Sandai, Japan, pp. 310-313, 1999.
- [6] Y. T. Lee, H. Takao, and M. Ishida, "Fabrication of the thermopile using SOI structure", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-8, 2002.
- [7] Y. T. Lee, H. Takao, and M. Ishida, "Fabrication of a silicon pressure sensor of measuring low pressure using ICP-RIE", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 16, No. 2, pp. 126-131, 2007.