

## n형 Bi-Te와 p형 Sb-Te 증착박막으로 구성된 in-plane 열전센서의 형성공정 및 감지특성

배재만 · 김민영 · 오태성<sup>†</sup>  
홍익대학교 공과대학 신소재공학과

### Fabrication Process and Sensing Characteristics of the In-plane Thermoelectric Sensor Consisting of the Evaporated p-type Sb-Te and n-type Bi-Te Thin Films

Jae-Man Bae, Min-Young Kim and Tae-Sung Oh<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, Sangsu-dong, Mapo-gu, Seoul 121-791, Korea  
(2012년 2월 6일 접수: 2012년 2월 23일 수정: 2012년 2월 24일 게재확정)

**초 록:** 유리기판에 n형 Bi-Te 열전박막과 p형 Sb-Te 열전박막을 진공증착하여 in-plane 열전센서를 형성한 후, 열전 센서의 감지특성을 분석하였다. 열전센서를 구성하는데 사용한 n형 Bi-Te 증착박막은  $-165 \mu\text{V/K}$ 의 Seebeck 계수와  $80 \times 10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ 의 출력인자를 나타내었으며, p형 Sb-Te 증착박막은  $142 \mu\text{V/K}$ 의 Seebeck 계수와  $51.7 \times 10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ 의 출력인자를 나타내었다. 이와 같은 n형 Bi-Te 및 p형 Sb-Te 박막 15쌍으로 구성된 열전센서는  $2.8 \text{ mV/K}$ 의 감지도를 나타내었다.

**Abstract:** An in-plane thermoelectric sensor was processed on a glass substrate by evaporation of the n-type Bi-Te and p-type Sb-Te thin films, and its sensing characteristics were evaluated. The n-type Bi-Te thin film used to fabricate the in-plane sensor exhibited a Seebeck coefficient of  $-165 \mu\text{V/K}$  and a power factor of  $80 \times 10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ . The p-type Sb-Te thin film used to fabricate the in-plane sensor exhibited a Seebeck coefficient of  $142 \mu\text{V/K}$  and a power factor of  $51.7 \times 10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ . The in-plane thermoelectric sensor consisting of 15 pairs of the n-type Bi-Te and the p-type Sb-Te evaporated thin films exhibited a sensitivity of  $2.8 \text{ mV/K}$ .

**Keywords:** thermoelectrics, thermopile, thin films, evaporation

## 1. 서 론

최근 초소형 고감도 센서와 마이크로 냉각소자의 필요성이 급격히 대두됨에 따라 열 에너지와 전기 에너지간의 직접변환이 가능한 열전박막과 이를 이용한 마이크로 열전소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1-5)</sup> 열전박막을 이용한 마이크로 열전센서는 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 열전변환에 의해 전기적 신호가 열신호로부터 스스로 생성되므로 외부전원을 필요로 하지 않는다. 둘째, 작은 온도변화에도 감도와 응답성이 높으며, 출력신호가 크다. 셋째, 고온에서도 안정된 출력신호를 얻을 수 있어 활용 가능한 온도범위가 넓다. 이와 같은 장점으로 인해 마이크로 열전센서는 적외선 센서, micro calorimeter, 습도계, RMS converter, EM-field 센서, 가속도계, 유량계 등과 같이 다양하게 응용되고 있다.<sup>6,7)</sup> 열전박막을 사용한 마이크로 열전발전소자에서는 열전 leg들의 미세화에 의해 작은 온도차에서도 큰 출력전압의 발생이 가능하여 출

력밀도를 현저히 향상시키는 것이 가능하다. 마이크로 열전냉각소자는 냉각능이 크고 크기가 mm 이하로 소형화가 가능하며 반응시간이 짧아, 전자부품의 소형화와 고집적화에 따른 발열 및 온도 안정성 등의 문제를 해결할 수 있다.<sup>8)</sup>

마이크로 열전소자의 형태는 열과 전기의 이동 방향에 따라 in-plane형 소자와 cross-plane형 소자로 대별된다. 열과 전기가 기판에 수평한 방향으로 이동하는 in-plane형 열전소자는 써모파일형 열전센서로 주로 사용되며 다양한 센서 디자인이 가능하다는 장점이 있으며, 작은 온도차에 의해서도 비교적 큰 전압을 얻을 수 있고 몇  $\mu\text{m}$  두께의 얇은 열전박막 leg의 형성에 필요한 박막공정시간이 짧다는 장점이 있다. 반면에 기판을 통한 기생 열전달에 의해 효율이 낮으며, leg 단면적이 작아 내부 저항이 크다는 단점이 있다. 열과 전기가 기판에 수직인 방향으로 이동하는 cross-plane형 열전소자는 마이크로 열전냉각소자와 열전발전소자로 주로 사용되며 고온단과 저온

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: ohts@hongik.ac.kr

단 사이의 작은 온도차에 의해서도 비교적 큰 출력을 얻을 수 있으며, 효율이 높고 기판을 통한 기생 열전도가 없으며, 열전 leg의 내부저항이 작다는 장점이 있다. 그러나 수십  $\mu\text{m}$  두께의 열전소자 leg를 형성하는데 장시간의 박막형성공정이 요구되며 상층부의 전기적 접속을 형성하기 어려운 문제점이 있으며, 고온단과 저온단 사이에 온도 기울기가 커서 큰 열응력이 인가되는 문제점이 있다.

마이크로 열전소자를 구성하기 위한 열전박막으로는 상온 부근에서 열전특성이 우수한 n형  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 와 p형  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 가 주로 사용되고 있다.<sup>4,5)</sup> 마이크로 열전소자의 성능은 이를 구성하는 열전박막의 열전특성에 의존하기 때문에, MOCVD(metal organic chemical vapor deposition), MBE(molecular beam epitaxy), co-sputtering, 진공증착, 전기도금, 마이크로 jet 프린팅 등과 같은 다양한 열전박막 공정기술이 연구되고 있다.<sup>1,2,3,9-14)</sup> 이 중에서 진공증착법은 MOCVD, MBE, 스퍼터링 공정보다 공정단가가 낮으며 박막 형성속도가 빠르다는 장점이 있다. 전기도금공정에 비해서는 전기도금 씨앗층이 불필요하여 n형과 p형으로 이루어진 박막소자를 형성하기 용이하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 n형 Bi-Te 박막과 p형 Sb-Te 박막을 진공증착하여 in-plane 열전센서를 형성하고, 이와 같은 열전센서에 박막히터를 사용하여 고온단과 저온단 사이에 온도차를 가하며 감지 특성을 분석하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서 제작하고자 하는 in-plane 열전센서는 Fig. 1에 나타난 설계도와 같이, 모두 15개의 n-p 열전박막 쌍이 방사형으로 배열되어 있는 열전박막 모듈 및 열전박막 모듈의 중앙부와 주변부에 원하는 크기의 온도차를 인가하기 위한 목적으로 열전박막 모듈의 중앙부에 형성한 박막히터로 구성되어 있다. 박막히터에 전류를 인가하면 박막히터의 발열에 의해 열전센서의 중앙부와 주변부에 온도차가 발생하게 되며, 이와 같은 온도차에 의해 n-p 열전박막으로 구성된 열전센서에서 Seebeck 전압이 발생하게 된다. 본 실험에서 열전센서의 특성분석을 위한 열원으로 일반적으로 사용하는 적외선 광원 대신에 박막히터를 사용한 이유는 적외선 광원에 비해 박막히터를 사용시 열전박막 모듈의 고온단 온도를 더욱 용이하게 조절하는 것이 가능하기 때문이다.

Fig. 1과 같은 in-plane 열전센서를 제작하기 위한 기판으로는 열전도율이 낮은 유리기판을 사용하였다. 유리기판을 아세톤, 알콜, 증류수의 순서로 세척하고 건조 후, 유리기판의 중앙부에 Fig. 2와 같은 Ti/Cu/Ti 다층구조로 이루어진 박막히터를 lift-off 방식으로 스퍼터 증착하여 형성하였다. 이를 위해 AZ P4620 양각 포토레지스트를 유리기판에 스핀코팅하고 대류식 건조로에 장입하여 소프트 베이킹한 후, Fig. 2와 같은 포토레지스트 마스크를 사용하여 노광시켜 포토레지스트 패턴을 형성하였다. 포

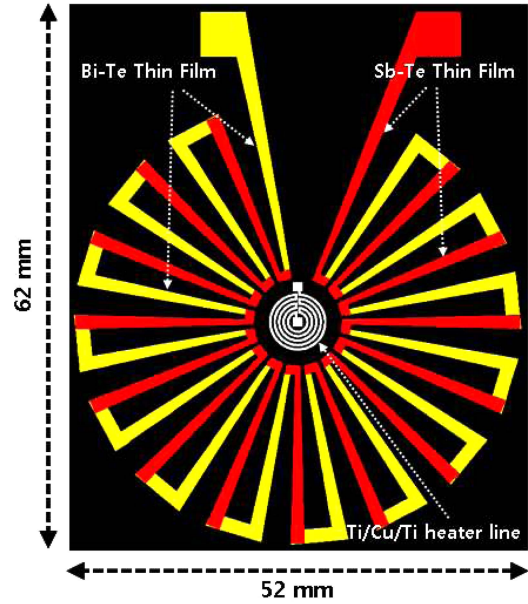


Fig. 1. Design pattern of the in-plane thermoelectric sensor consisting of n-type and p-type thermoelectric thin films and a thin film heater.

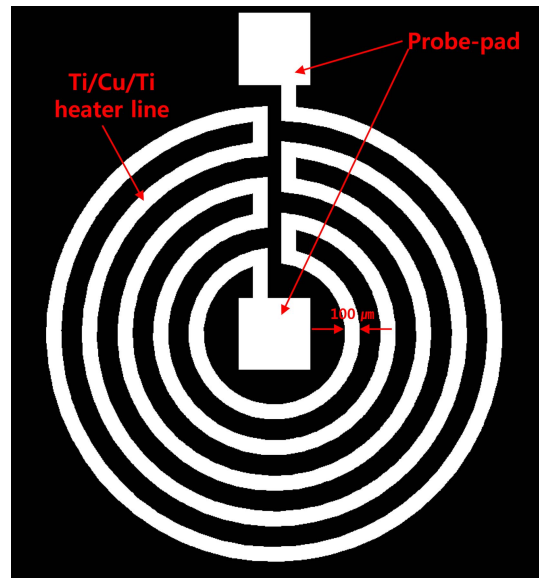


Fig. 2. Mask pattern of the Ti/Cu/Ti thin film heater.

토레지스트 패턴을 형성한 유리기판을 스퍼터 챔버 내에 장입시켜  $1 \mu\text{m}$  Ti,  $11.5 \mu\text{m}$  Cu와  $1 \mu\text{m}$  Ti를 순차적으로 스퍼터링한 후, 포토레지스트를 제거하여 Ti/Cu/Ti 다층구조로 이루어진 박막히터를 형성하였다. 이와 같은 Ti/Cu/Ti 다층구조에서 맨 아래의 Ti 층은 유리기판에 대한 접착층의 용도로 형성하였으며, 가운데 Cu 층은 히터의 용도이며, 맨 위의 Ti 층은 산화방지막의 용도로 형성하였다.

중앙부에 박막히터를 형성한 유리기판에 Fig. 3(a)와 같은 형상의 n형 Bi-Te 박막 레그(leg) 형성용 메탈 마스크를 올려놓은 후, 이들을 진공증착 챔버에 장입하고  $1 \times 10^{-5}$  torr

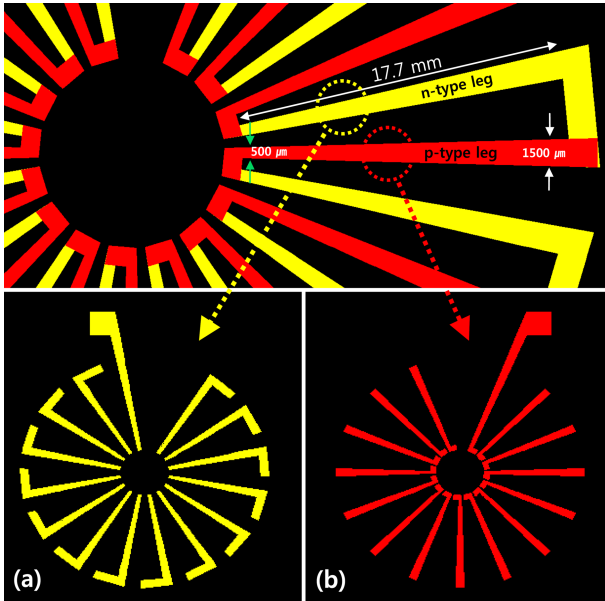


Fig. 3. Mask patterns of (a) the n-type Bi-Te and (b) the p-type Sb-Te thin film legs to form the in-plane thermoelectric sensor.

이하의 진공도를 유지하면서 n형 Bi-Te 박막을 증착하였다. n형 Bi-Te 박막의 증착원으로는 Bi 분말과 Te 분말을 각기 10 at%와 90 at%의 비율로 혼합한 분말을 사용하였다. Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 화학양론적 조성에 비하여 심하게 Te이 과잉인 조성의 증착원을 사용한 이유는 Te이 Bi에 비해 증발이 훨씬 잘 일어나기 때문이다<sup>15)</sup> 박막이 증착원보다 Te이 심하게 부족한 조성을 나타내기 때문이다. n형 Bi-Te 박막 레그들을 진공증착한 유리기판을 진공증착 챔버에서 꺼내어 Bi-Te 메탈 마스크를 제거한 후, Fig. 3(b)와 같은 형상의 p형 Sb-Te 박막 레그 형성용 메탈 마스크를 올려놓고 진공증착 챔버에 장입하여 1×10<sup>-5</sup> torr 이하의 진공도를 유지하면서 p형 Sb-Te 박막을 증착하였다. p형 Sb-Te 박막의 증착원으로는 Sb 분말과 Te 분말을 각기 30 at%와 70 at%의 비율로 혼합한 분말을 사용하였다.

증착된 n형 Bi-Te 박막과 p형 Sb-Te 박막의 조성을 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)를 사용하여 분석하였다. Bi-Te 박막과 Sb-Te 박막의 열전특성을 상온에서 측정하였다. Seebeck 계수( $\alpha$ )는 시편 한쪽을 sub-heater로 가열하여 시편 양단간의 온도차를 20°C 정도로 유지한 후, 이에 의해 발생하는 전압을 측정하여  $\alpha = \Delta V / \Delta T$ 의 관계식을 사용하여 구하였다. 박막의 전기비저항( $\rho$ )은 4단자법을 사용하여 측정하였다. Seebeck 계수와 전기비저항의 측정값으로부터  $P = \alpha^2 / \rho$ 의 관계식을 이용하여 출력인

자(power factor)를 평가하였다.

Fig. 1과 같은 in-plane 열전센서의 감지특성을 측정하기 위해 중앙부에 형성한 Ti/Cu/Ti 박막히터에 0.05~0.13 A의 전류를 인가하여 박막히터를 가열하고, 이에 의해 발생하는 열전센서 중앙부와 주변부의 온도차를 열전대를 사용하여 측정하였다. 열전센서 중앙부와 주변부의 온도차에 의해 열전센서에서 발생하는 Seebeck 전압을 디지털 멀티미터로 측정하였으며, 온도차에 따른 Seebeck 전압의 변화 곡선의 기울기로부터 열전센서의 감지특성을 평가하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Table 1에 n형 Bi-Te와 p형 Sb-Te 증착박막의 조성과 열전특성을 나타내었다. n형 Bi-Te 박막의 증착원 조성은 10at% Bi-90at% Te 이며, p형 Sb-Te 박막의 증착원 조성은 30at% Sb-70at% Te 으로 모두 심한 Te 과잉 조성이었으나, 이들을 사용하여 증착한 박막들은 33at% Bi-67at% Te 및 42at% Sb-58at% Te으로 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>와 Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 화학양론적 조성에 근접한 조성을 나타내었다. 이와 같이 증착원의 조성에 비해 박막에 Te이 적게 함유되어 화학양론적 조성에 근접하게 되는 이유는 Bi와 Sb에 비해 Te의 증기압이 더 높기 때문으로 판단된다.<sup>15)</sup> Bi나 Sb보다 Te이 먼저 증발되고 사방으로 용이하게 퍼져 나가 주변에 부착되어 기판에 도달하는 Te의 양이 제한을 받기 때문에, 증착원의 조성에 비해 박막의 Te 함량이 훨씬 낮아져서 화학양론적 조성에 접근하는 것으로 판단된다.

Table 1과 같이 n형 Bi-Te 박막은 -165  $\mu\text{V/K}$ 의 Seebeck 계수와  $80 \times 10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ 의 출력인자를 나타내었다. 이와 같은 열전특성은 스퍼터링으로 형성하여 수소분위기 열처리한 Bi-Te 박막에서 보고된 -128.2  $\mu\text{V/K}$ 의 Seebeck 계수와  $9 \times 10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ 의 출력인자 및 전기도금한 박막에서 보고된 -51.6  $\mu\text{V/K}$ 의 Seebeck 계수와  $7.1 \times 10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ 의 출력인자에 비해 훨씬 우수한 값이다.<sup>16,17)</sup> 본 실험에서 형성한 p형 Sb-Te 박막은 Table 1과 같이 142  $\mu\text{V/K}$ 의 Seebeck 계수와  $51.7 \times 10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ 의 출력인자를 나타내었다. 이와 같은 열전특성은 Sb-Te 스퍼터 박막에서 보고된 106  $\mu\text{V/K}$ 의 Seebeck 계수와  $22.6 \times 10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ 의 출력인자 및 전기도금한 박막에서 보고된 52.1  $\mu\text{V/K}$ 의 Seebeck 계수와  $1.7 \times 10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ 의 출력인자에 비해 훨씬 우수한 값이다.<sup>17,18)</sup>

Fig. 4에 유리기판에 Ti/Cu/Ti 박막히터를 형성한 후 n형 Bi-Te 열전박막과 p형 Sb-Te 열전박막을 진공증착하

Table 1. Compositions and thermoelectric properties of the evaporated Bi-Te and Sb-Te thin films.

Thin film	Composition (at%)	Seebeck coefficient ( $\mu\text{V/K}$ )	Resistivity ( $\text{m}\Omega\text{-cm}$ )	Power factor ( $10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ )
Bi-Te	33 Bi-67 Te	-165	0.34	80
Sb-Te	42 Sb-58 Te	142	0.39	51.7

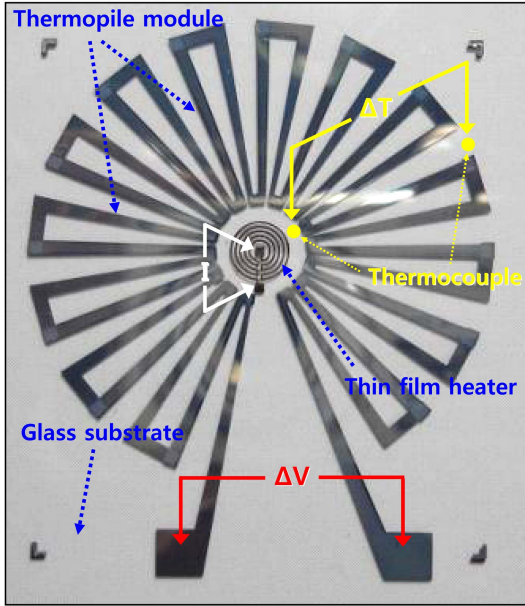


Fig. 4. Optical micrograph of the in-plane thermoelectric sensor formed by sputtering of the Ti/Cu/Ti thin film heater and evaporation of the n-type Bi-Te and p-type Sb-Te thin films.

여 형성한 in-plane형 열전센서의 광학현미경 사진을 나타내었다. 15쌍의 n형 Bi-Te 박막과 p형 Sb-Te 박막으로 구성된 열전박막 센서의 총 저항은 19 kΩ으로 측정되었다. 이와 같은 열전센서의 중앙부에 위치한 박막히터에 전류를 인가하여 가열하며 Fig. 4와 같이 열전박막 모듈의 중앙부와 주변부의 온도를 열전대를 사용하여 측정하였으며, 중앙부와 주변부의 온도차에 의해 발생하는 Seebeck 전압을 측정하였다.

Fig. 5에 박막히터에 인가한 전류에 의해 열전박막 모듈의 중앙부와 주변부 사이에서 발생한 온도차(ΔT)를 나타내었다. 또한 Fig. 6에는 이와 같은 온도차(ΔT)에 의해 열전센서에서 발생한 Seebeck 전압(ΔV)을 나타내었는데, 온도차(ΔT)에 따른 Seebeck 전압(ΔV)은 직선적인 변화거동을 나타내었다. Fig. 6에 있는 Seebeck 전압(ΔV)-온도차(ΔT) 곡선의 기울기로부터 구한 열전센서의 감지도 (sensitivity, ΔV/ΔT)는 2.8 mV/K로 분석되었다. 이와 같은 감지특성 값은 silicon-on-insulator 구조의 p-n 소자 한쌍으로 구성된 열전센서에서 보고된 감지특성인 0.19 mV/K 및 4쌍의 n형 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>와 p형 Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 박막 레그들로 구성된 미니소자에서 예측된 감지특성인 1.2 mV/K보다 우수한 값이다.<sup>19,20</sup> 이와 같이 본 실험에서 다른 연구자들이 보고하거나 예측한 값들<sup>19,20</sup>보다 더 우수한 감지특성을 얻을 수 있는 주요한 이유는 다른 연구자들보다 더 많은 수의 n/p 박막 쌍을 사용하여 열전센서를 구성하였기 때문이다.

Table 1에서와 같이 본 실험에서 열전센서를 구성하는데 사용한 n형 Bi-Te 및 p형 Sb-Te 증착박막의 Seebeck 계수는 각기 -165 μV/K 및 142 μV/K 이다. 따라서 15쌍의

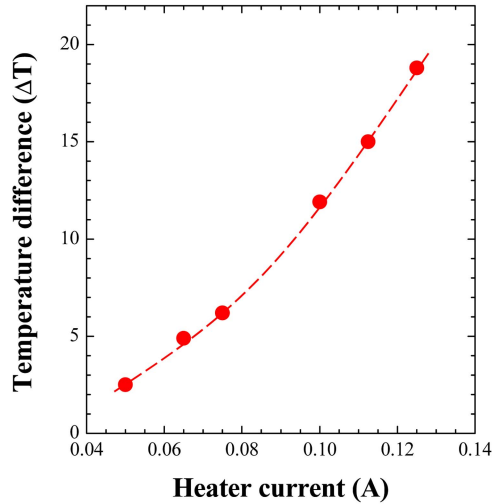


Fig. 5. Temperature difference of the in-plane thermoelectric sensor as a function of the applied heater current.

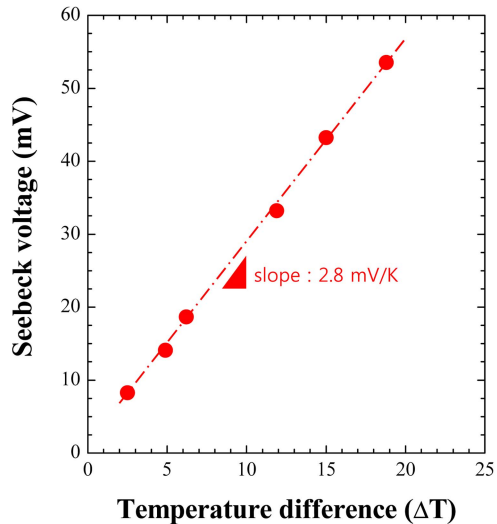


Fig. 6. Seebeck voltage of the in-plane thermoelectric sensor as a function of the temperature difference.

n형 Bi-Te와 p형 Sb-Te 증착박막으로 구성된 열전센서의 이론적인 감지도(ΔV/ΔT)는 4.6 mV/K 이어야 한다. 그러나 열전센서의 감지도를 실제 측정된 값은 Fig. 6에서와 같이 2.8 mV/K로 이론값의 61% 수준이다. 전기도금으로 형성한 n형 Bi-Te 박막과 p형 Sb-Te 박막으로 구성된 열전센서에서도 실제 측정된 감지도는 n형과 p형 열전박막들의 Seebeck 계수로부터 환산한 이론값의 36%로 보고되었다.<sup>17</sup> 이와 같이 열전박막 센서에서 측정된 감지도가 열전박막들의 Seebeck 계수로부터 환산한 이론값보다 낮은 이유는 유리기판보다 훨씬 더 얇은 열전박막의 두께에 기인하는 것으로 판단된다. 비록 유리기판의 열전도도가 낮지만 유리기판의 두께가 열전박막의 두께에 비해 훨씬 두껍기 때문에 박막히터에서 발열된 열의 상당 부분이 유리기판을 통해 이동하게 된다. 이에 따라 열전센서의 양단간에 작용하는 실제 온도차는 열전대로 측정된

온도차( $\Delta T$ )에 비해 더 작아져서 열전센서의 실제 감지도가 열전박막들의 Seebeck 계수로부터 환산한 이론값에 비해 더 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 향후 n형 Bi-Te 증착박막과 p형 Sb-Te 증착박막의 두께를 증가시켜 in-plane 열전센서를 구성하면 열전센서의 감지도가 열전박막들의 Seebeck 계수로부터 환산한 이론값에 보다 근접할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

(1) 10at% Bi-90at% Te 조성의 증착원을 사용하여 진공 증착한 n형 Bi-Te 박막의 조성은 33at% Bi-67at% Te 이었으며, 30at% Sb-70at% Te 조성의 증착원을 사용하여 진공 증착한 p형 Sb-Te 박막의 조성은 42at% Sb-58at% Te 이었다.

(2) 진공증착법으로 형성한 n형 Bi-Te 박막은  $-165 \mu\text{V/K}$ 의 Seebeck 계수와  $80 \times 10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ 의 출력인자를 나타내었으며, p형 Sb-Te 박막은  $142 \mu\text{V/K}$ 의 Seebeck 계수와  $51.7 \times 10^{-4} \text{ W/K}^2\text{-m}$ 의 출력인자를 나타내었다.

(3) 유리기판에 Ti/Cu/Ti 박막히터를 형성한 후 n형 Bi-Te 열전박막과 p형 Sb-Te 열전박막을 진공증착하여 15쌍의 n-p 열전박막으로 구성된 in-plane 열전센서를 형성하였다.

(4) In-plane 열전센서에서 측정된 감지도는  $2.8 \text{ mV/K}$ 로 silicon-on-insulator 구조의 p-n 소자 한쌍으로 구성된 열전센서의 감지도  $0.19 \text{ mV/K}$  및 4쌍의 n형  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 와 p형  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  박막 레그들로 구성된 미니소자의 감지도  $1.2 \text{ mV/K}$ 보다 우수한 값이었다.

(5) 15쌍의 n형 Bi-Te와 p형 Sb-Te 증착박막으로 구성된 열전센서에서 측정된 감지도는 열전박막들의 Seebeck 계수로부터 환산한 이론 감지도인  $4.6 \text{ mV/K}$ 의 61% 이었다. 향후 n형 Bi-Te와 p형 Sb-Te 증착박막의 두께를 증가시킴으로써 열전센서의 감지도를 열전박막들의 Seebeck 계수로부터 환산한 이론 감지도에 근접시킬 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(일반연구자지원사업 2010-0009642)의 지원에 의해 연구되었음.

#### 참고문헌

1. K. Rajasekar, L. Kungumadevi, A. Subbarayan, and R. Sathyamoorthy, "Thermal sensors based on  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  and  $(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{70}(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{30}$  thin films", *Ionics*, 14, 69 (2007).
2. K. Tittes, A. Bund, W. Plieth, A. Bentien, S. Paschen, M. Plotner, H. Grafe, and W-H. Fischer, "Electrochemical deposition of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  for thermoelectric microdevices", *J. Solid State Electrochem.*, 7, 714 (2003).
3. L. M. Goncalves, C. Couto, P. Alpuim, D. M. Rowe, and J. H. Correia, "Thermoelectric microstructures of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  for a self-calibrated micro-pyrometer", *Sens. Actuators*, A130-131, 346 (2006).
4. Y. N. Choi, M. Y. Kim, and T. S. Oh, "Thermoelectric properties of Bi-Te thin films processed by coevaporation", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 17(4), 89 (2010).
5. J. M. Bae, M. Y. Kim, and T. S. Oh, "Effects of evaporation processes and a reduction annealing on thermoelectric properties of the Sb-Te thin films", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 17(4), 77 (2010).
6. D. D. L. Wijngaards, S. H. Kong, M. Bartek, and R. F. Wolffenbittel, "Design and fabrication of on-chip integrated poly SiGe and poly Si Peltier devices", *Sens. Actuators*, 85, 316 (2000).
7. A. W. Van Herwaarden, "The Seebeck effect in silicon ICs", *Sens. Actuators*, 6, 245 (1984).
8. J. R. Lim, G. J. Snyder, C.-K. Huang, J. A. Herman, M. A. Ryan, and J.-P. Fleurial, Proc. "Thermoelectric microdevice fabrication process and evaluation at the Jet Propulsion Laboratory (JPL)", Proc. 21th International Conference on Thermoelectrics, Long Beach, 535, International Thermoelectric Society (2002).
9. A. Giani, A. Boulouz, F. Pascal-Delannoy, A. Foucaran, A. Boyer, B. Aboulfarah, and A. Mzerd, J. Mater, "Electrical and thermoelectrical properties of  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  prepared by the metal-organic chemical vapor deposition technique", *J. Mater. Sci. Lett.*, 18, 541 (1999).
10. M. Y. Kim and T. S. Oh, "Effects of annealing in a reduction ambient on thermoelectric properties of the thin films processed by vacuum evaporation", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 15(3), 1 (2008).
11. Y. Kim, A. DiVenere, C. K. L. Wong, J. B. Ketterson, S. Cho, and J. R. Meyer, "Structural and thermoelectric transport properties of  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  thin films grown by molecular beam epitaxy", *J. Appl. Phys.*, 91, 715 (2002).
12. L. W. Da Silva, M. Kaviani, and C. Uher, "Thermoelectric performance of films in the bismuth-tellurium and antimony-tellurium systems", *J. Appl. Physics*, 97, 114903 (2005).
13. D. D. Frari, S. Diliberto, N. Stein, C. Boulanger, and J.-M. Lecomte, "Comparative study of the electrochemical preparation of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , and  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  films", *Thin Solid Films*, 483, 44 (2005).
14. M. Takahashi, M. Kojima, S. Sato, N. Ohnisi, A. Nishiwaki, K. Wakita, T. Miyuki, S. Ikeda, and Y. Muramatsu, "Electric and thermoelectric properties of electrodeposited bismuth telluride ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) films", *J. Appl. Phys.*, 96, 5582 (2004).
15. A. H. Weber and G. Plantenberg, "Rapid and direct measurement of vapor pressure of liquid metals", *Phys. Rev.* 69, 649 (1946).
16. D. H. Kim and G. H. Lee, "Improvement of thermoelectric properties of bismuth telluride thin films using rapid thermal processing", *Korean J. Mater. Res.*, 16(5), 292 (2006).
17. M. Y. Kim and T. S. Oh, "Electrodeposition and thermoelectric characteristics of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  and  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  films for thermopile sensor applications", *J. Electron. Mater.*, 38, 1176 (2009).
18. P. Fan, Z.-H. Zheng, G.-X. Liang, X.-M. Cai, D.-P. Zhang, "Composition-dependent characterization of  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  thin films prepared by ion beam sputtering deposition", *Chin. Phys.*

- Lett., 27, 087201 (2010).
19. W. H. Lee, Y. T. Lee, H. Takao, K. Sawada, and M. Ishida, "Fabrication of thermoelectric sensor using silicon-on-insulator structure", Jpn. J. Appl. Phys. 46, 7232 (2007).
20. L. M. Goncalves, C. Couto, P. Alpuim, D.M. Rowe, and J. H. Correia, "Thermoelectric microstructures of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  for a self-calibrated micro-pyrometer", Sens. Actuators A 130-31, 346 (2006).