

Evanohm R 합금 히터를 사용한 크로멜-콘스탄탄 다중접합 열전변환기의 제작 및 특성

李映和 · 權聖遠* · 金國珍* · 朴世一*[†] · 林榮彦

Fabrication and Characteristics of Chromel-Constantan Multijunction Thermal Converter with Evanohm R Alloy Heater

Young Hwa Lee, Sung-Won Kwon*, Kook-Jin Kim*, Se Il Park*[†], and Young Eon Ihm

Abstract

A thin-film multijunction thermal converter was fabricated through the process using 6 inch silicon wafer semiconductor process and bulk micromachining. Evanohm R alloy and chromel-constantan were used as a heater and thermocouple materials, respectively. The temperature coefficient of resistance of Evanohm R heater was about 75.12 ppm/°C and the voltage sensitivity of the thermal converter indicated about 5.75 mV/mW in air. The transfer differences, measured by FRDC-DC method in the frequency range from 20 Hz to 10 kHz, showed the value under about 1.36 ppm, 0.83 ppm for the film thickness of 500, 200 nm, respectively. And in case of a 200 nm-thick thermal converter, the AC-DC transfer differences seems to be stabilized below the value of 1 ppm in the frequency range from 1 kHz to 500 kHz.

Key Words : thermal converter, voltage sensitivity, FRDC-DC, AD-DC

1. 서 론

흡수 효과와 펄티어 효과를 최소화 하기 위한 3차원 다중접합 열전형 변환기는 현재 여러나라의 표준기관에서 교류전압 및 전류의 1차 표준기로 활용되고 있다. 평면형 다중접합 열전변환기는 1989년 M. Klonz 등이 실리콘 기판 위에 형성된 SiO₂ 다이어프램 위에 콘스탄탄 히터와 Cu-콘스탄탄 열전쌍을 사용하여 제작, 보고한 이래 각국의 표준기관에서는 반도체 공정기술을 응용한 다양한 박막형 다중접합 열전변환기가 활발하게 연구되어지고 있다^[1-4].

본 논문에서는 Evanohm R type (Ni₇₅-Cr₂₀-Al_{2.5}-Cu_{2.5}) 합금 박막을 히터로 하고 크로멜(Ni₉₀-Cr₁₀)과 콘스탄탄(Cu₅₅-Ni₄₅) 박막 열전대(상대 제벡 계수 : 65 μV/°C)를 Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄ 다이어프램 위에 각각 형성시

켜 평면형 다중접합 열전변환기를 제작하였다^[5]. 박막 저항 물질로는 순금속에 비해 비저항 값이 크고, 장기 안정도가 우수한 니켈-크롬계 합금이 다양한 조성으로 사용되는데, 불순물로 알루미늄, 구리 등이 포함된 Evanohm 합금이 저항 재료로서 많이 사용된다. Evanohm 합금은 낮은 온도저항계수와 높은 비저항 값을 갖는 매우 우수한 벌크(bulk) 저항 물질이며, 본 연구에서는 Evanohm S type 합금에 비해 스퍼터링시의 성분비 재현성이 높고 박막 제작시 매우 낮은 정도의 핀홀(pinhole)수를 보이는 Evanohm R type 합금을 사용하였다^[6]. 몇 가지 박막 저항 물질들의 특성은 표 1과 같다.

상기와 같이 제작한 열전변환기는 입력-출력 관계, 전압감응도 및 교류-직류 변환오차 등의 특성에 대해 논의하였다.

2. 열전변환기의 제작

본 연구에서 제작된 열전변환기는 직경 6인치(100) 결정면을 갖는 양면 연마된 비저항 8~10 Ω · cm,

충남대학교 재료공학과(Department of Material Engineering, Chungnam National University)

*한국표준과학연구원 전자기표준부(Division of Electromagnetic Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

[†]Corresponding author: seilpark@kriss.re.kr

(Received : December 1, 2003, Accepted : December 26, 2003)

표 1. 박막저항금속의 특성

Table 1. Properties of several thin film metals

	TCR (ppm/°C)	Resistivity ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	TEC (ppm/°C)	Thermal conductivity (W/m · K)
Evanohm R	10	134	11.7	14.6
Evanohm S	5	133	13	14.6
Ni80-Cr20	50	108	14	13.4
Pt	3,920	10.58	9	71.6

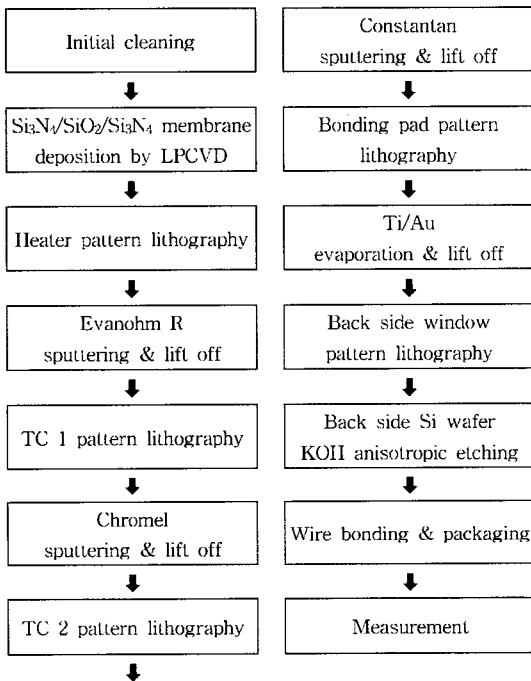


그림 1. 열전변환기의 제작공정

Fig. 1. Process for the fabrication of multi-junction thermal converters

두께 500 μm 의 보론(B)이 불순물 첨가된 P형 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 본 연구의 제작에 사용된 제작 공정 순서는 그림 1과 같다.

먼저 아세트 및 불산 수용액을 이용해 초기 세척한 양면 실리콘 기판위에 잔류응력을 줄이기 위한 샌드위치 구조의 $\text{Si}_3\text{N}_4(200 \text{ nm})/\text{SiO}_2(1000 \text{ nm})/\text{Si}_3\text{N}_4(200 \text{ nm})$ 박막을 LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition)법으로 각각 형성하였다. 이때, Si_3N_4 박막은 약 780°C의 분위기로 DCS(Dichlorosilane, SiCl_2H_2)와 NH_3 혼합가스를 사용하여 증착하였고, SiO_2 박막은 약 700°C의 분위기로 TEOS(Tetra Ethyle Ortho Silicate)와 O_2 혼합가스를 사용하여 증착하였다.

증착된 Si_3N_4 박막은 열전도도가 약 $18.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 로서 실리콘 기판의 열전도도 약 $149 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 보다 매우 작아 실리콘 기판을 통한 히터의 열손실을 줄일 수 있다^[7]. 각 박막의 측정된 잔류 응력 값은 $\text{Si}_3\text{N}_4(200 \text{ nm})$ 박막의 경우 약 1087 MPa, $\text{SiO}_2(1000 \text{ nm})$ 박막의 경우 약 -93 MPa이었다.

그 다음 감광액 노광법으로 패턴을 형성하고, 7인치 Evanohm R type 타겟으로 DC 마그네트론 스퍼터를 사용, 두께 500 nm 및 200 nm로 증착하고 히터 패턴을 lift-off 방법으로 형성하였다. 이 때 형성된 패턴은 선평 60 μm , 길이 2650 μm 의 bifilar 형식으로 설계하여 톱슨 효과 및 펄터어 효과를 최소화하였고, 계산된 저항값은 두께 200 nm의 경우 약 596 Ω , 500 nm의 경우 약 236 Ω 이었다.

열전대는 역시 감광액 노광법으로 패턴 형성 후, DC 마그네트론 스퍼터링 법으로 7인치 크로멜 및 콘스탄탄 타겟을 사용해 각각 두께 500 nm 및 200 nm의 패턴을 lift-off 방법으로 제작하였다. 열전대와 히터 사이의 거리는 15 μm , 각 열전대의 길이는 750 μm 로 하였고, 크로멜 $19 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, 콘스탄탄 $19.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 의 열전도도를 고려하여 각각 40 μm 의 동일한 선평을 갖고, 각 열전대 사이의 간격을 30 μm 로 일정하게 설계하였다^[8]. 계산된 열전대의 저항은 두께 200 nm의 경우 약 4186 Ω , 500 nm의 경우 약 1580 Ω 이었고, 접합의 총 수는 34 쌍으로 하였다.

다음은 와이어 본딩 전극 형성을 위하여 감광액 패턴 형성 후, 기저층으로 Ti를 30 nm, 그 위에 Au를 200 nm 두께로 각각 전자선 진공 증착하고 lift-off 패터닝 하였다.

마지막으로 히터부 및 열전대의 고온 접합부는 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 다이어프램 위에, 열전대의 저온 접합부는 실리콘 기판에 놓여지도록 다이어프램 윈도우 크기를 $1.5 \times 3.0 \text{ mm}^2$ 로 조정하여 기판의 뒷면을 이방성 식각 하였다. 우선 전용의 후면 마스크 정렬기를 사용하여 노광 및 현상 후, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 박막을 각각 반응성 이온 식각 및 BOE(Buffered Oxide Etchant) 습식 식각 시켰고, 6인치 웨이퍼 전용 지그에 고정시켜 80°C 30%의 KOH 수용액에서 1.2 $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 식각 속도로 비등방성 식각 시켰다. 그림 2는 제작된 열전변환기의 현미경 사진을 나타낸다.

제작된 열전 변환기의 Evanohm R 히터 및 열전대의 저항은 박막 두께 500 nm의 경우 각각 222 Ω 및 1657 Ω , 박막 두께 200 nm의 경우 각각 524 Ω 및 4.1 k Ω 으로 상기의 계산된 값과 큰 차이를 보이지 않았다.

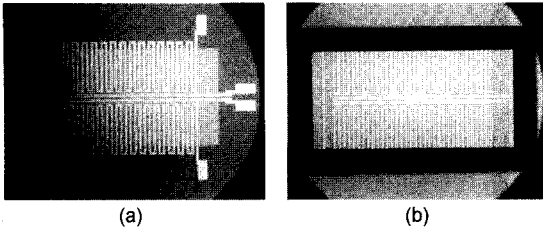


그림 2. 열전변환기의 현미경 사진 : (a) 전면부, (b) 후면부
Fig. 2. Microscopic image of a multi-junction thermal converter : (a) front side and (b) back side.

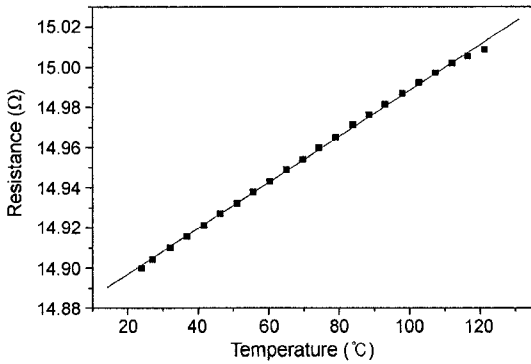


그림 3. 박막 히터의 온도에 따른 저항 변화
Fig. 3. Variation of resistance as a function of heater temperature.

3. 열전변환기의 특성평가

3.1. 히터 및 입력-출력 관계

Evanohm R 히터의 온도저항계수를 측정하기 위하여 박막 두께 500 nm인 경우의 공기 중에서 저항값을 측정한 결과는 그림 3과 같다. 그림의 기울기로부터 계산된 히터의 온도저항계수는 75.12 ppm/°C로서 Evanohm S 히터의 약 140 ppm/°C 보다 작았다⁹⁾.

열전변환기의 출력은 기본적으로 열손실 및 히터의 저항변화가 없는 이상적 조건에서 히터의 온도에 선형적으로 비례하므로 입력 전력, 즉, 입력 전압의 제곱에 비례한다. 그러나 입력 전압이 높아지면서 히터의 공기 중 대류 및 복사에 의한 열손실로 인해 지수는 제곱승보다 작은 약 1.8985 값을 가진다. 그림 4는 박막 두께 500 nm인 열전변환기의 공기 중 입력 전압에 대한 출력 전압의 변화이다.

상기의 측정으로부터 계산된 히터의 입력 전력에 대한 열전대의 출력 전압의 비, 즉 전압 감응도는 공기 중에서 약 5.75 mV/mW로서 유사한 디자인의 크로멜-알루멜 열전대의 약 3.16 mV/mW 보다 높은 값을 보였다⁹⁾.

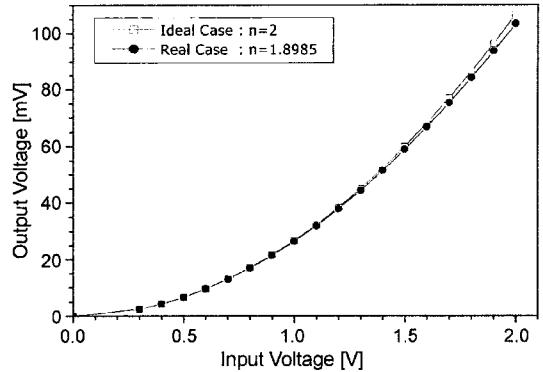


그림 4. 공기 중 입력 전압에 대한 출력 전압 변화
Fig. 4. Variation of output voltage as a function of input voltage in air.

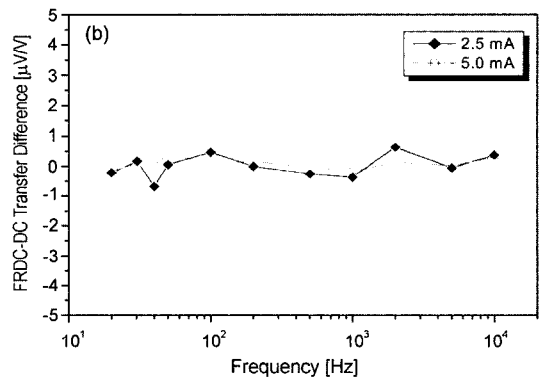
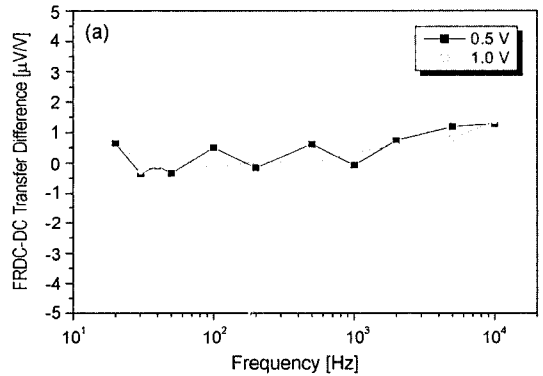


그림 5. 박막 두께 500 nm 열전변환기의 주파수에 대한 FRDC-DC 변환오차 : (a) 전압 모드, (b) 전류모드
Fig. 5. FRDC-DC transfer difference as a function of frequency in case of a 500 nm-thick multi-junction thermal converter : (a) voltage mode and (b) current mode.

3.2. 교류-직류 변환오차

FRDC(Fast Reversed DC)-DC 측정법은 0.1 ppm의 매우 작은 불확도를 가지고 열전효과로부터 기인된 교

류-직류 변환오차를 측정할 수 있다¹⁰⁾. 따라서 본 연구에서는 20 Hz~10 kHz의 주파수 범위에서 교류-직류 변환오차를 FRDC 방법으로 자동 측정하였고, 또한 변환 오차의 전압 또는 전류 모드 의존성을 관찰하기 위하여 각각 전압과 전류 모드로 나누어 측정하였다. 그림 5(a) 및 (b)는 박막 두께 500 nm인 경우의 0.5 V 및 1.0 V 실효전압 및 2.5 mA 및 5.0 mA 실효전류를 입력으로 한 주파수에 대한 FRDC-DC 변환오차를 나타낸다. 그림 6(a) 및 (b)는 박막 두께 200 nm인 경우의 1.0 V 및 2.0 V 실효전압 및 2.5 mA 및 5.0 mA 실효전류를 입력으로 한 주파수에 대한 FRDC-DC 변환오차이다.

본 측정에서 얻어진 변환오차는 박막 두께 500 nm 열전변환기에서 전압모드의 경우 0.5 V와 1.0 V의 입력 전압에 대해 각각 약 ±0.11~1.28 ppm 및 약 ±0.03~1.36 ppm이었다. 전류 모드의 경우 2.5 mA와 5.0 mA의 입력 전류에 대해 각각 약 ±0.01~0.68 ppm 및 약 ±0.01~0.40 ppm의 변환오차를 보였다. 또한 박막 두께

200 nm 열전변환기의 경우 전압 모드에서 1.0 V와 2.0 V의 입력 전압에 대해 각각 약 ±0.03~0.74 ppm 및 약 ±0.11~0.61 ppm의 변환오차 값을 보였다. 전류 모드의 경우 2.5 mA와 5.0 mA의 입력 전류에 대해 각각 약 ±0.01~0.64 ppm 및 약 ±0.05~0.93 ppm의 변환오차를 보였다. 전류 모드는 비교적 적은 주파수 의존성을 보이고, 전압 모드에 대비해 보다 적은 변환 오차를 보인다.

이러한 모드 의존성은 단일접합 열전변환기의 경우에는 Seebeck 효과에 기인한 입력 회로에서의 열전 전압에 의해서 설명되고, 다중접합 열전변환기의 경우 기대되는 값보다 더 큰 값을 갖게 된다¹³⁾.

교류-직류 전압 변환오차 평가 장치는 열전효과를 포함한 모든 오차요인에 의한 값을 측정하는 방법으로, 비교되는 두 전압변환기의 출력을 동시에 비교 측정하는 이중채널 자동 측정 방식 시스템을 사용하여 드리프트의 영향을 감소시켰고, 이중채널 스캐너를 사용하

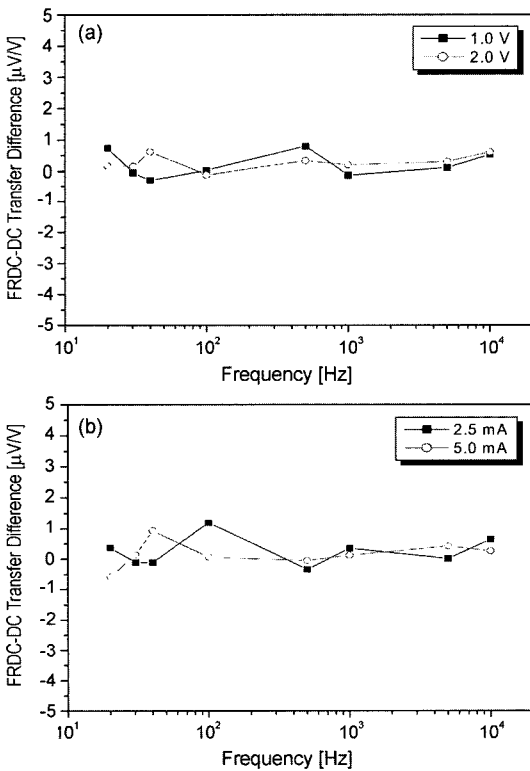


그림 6. 박막 두께 200 nm 열전변환기의 주파수에 대한 FRDC-DC 변환오차 : (a) 전압 모드, (b) 전류모드
Fig. 6. FRDC-DC transfer difference as a function of frequency in case of a 200 nm-thick multi-junction thermal converter : (a) voltage mode and (b) current mode.

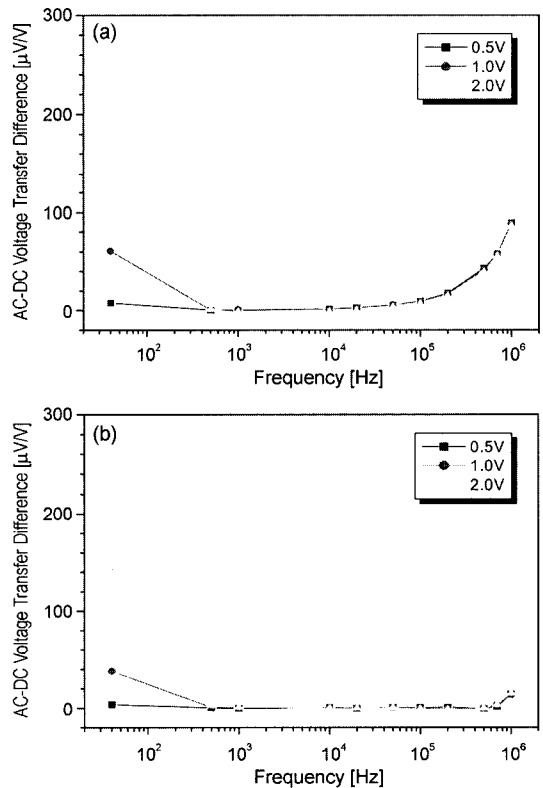


그림 7. 열전변환기의 주파수에 대한 교류-직류 전압 변환 오차 : 박막 두께 (a) 500 nm, (b) 200 nm인 경우
Fig. 7. AC-DC voltage transfer difference as a function of frequency : in case of (a) 500 nm and (b) 200 nm film thickness.

여 전압 측정기의 윌셀 전압이 제거되도록 하였다¹¹⁾. 본 연구에서는 40 Hz에서 1 MHz의 주파수 범위에서 실효전압이 0.5 V, 1.0 V 및 2.0 V인 경우의 교류-직류 전압 변환오차를 각각 측정하였다. 그림 7(a)와 (b)는 각각 박막 두께 500 nm 및 200 nm인 열전변환기의 주파수에 따른 교류-직류 전압 변환오차를 나타낸다.

본 측정에서 얻어진 변환오차는 40 Hz의 주파수가 인가되었을 때, 입력 전압이 0.5 V, 1.0 V, 2.0 V에서 박막 두께 500 nm의 경우, 각각 7.5 ppm, 60.6 ppm, 228.0 ppm이었고, 200 nm의 경우, 각각 3.9 ppm, 38.0 ppm, 143.6 ppm이었다. 1 MHz의 인가 주파수에서는 두께 500 nm의 경우, 상기의 입력 전압에 대해 변환오차가 각각 89.4 ppm, 88.8 ppm, 85.8 ppm이었고, 200 nm의 경우, 14.4 ppm, 13.5 ppm, 15.6 ppm으로 각각 비슷한 값으로 증가 되었다. 그림에서 보여주는 바와 같이 40 Hz의 낮은 주파수에서 높은 변환오차를 보이는 이유는 교류 입력시의 히터에서 발생하는 열관성 부족으로 설명된다. 그리고 두께 500 nm의 변환기에서의 10 kHz 이상의 높은 주파수에서의 현저히 증가된 변환오차는 박막형 열전변환기의 구조에서 기인한 유전 손실 뿐만 아니라 표면 효과, 캐패시턴스 및 유도성 임피던스에 의한 것으로 설명된다^{12,13,14)}. 그러나 두께 200 nm의 변환기에서는 히터의 저항이 증가함에 따라 음의 변환오차 값을 갖는 유전 손실보다 양의 변환오차 값을 갖는 표면효과가 감소하기 때문에 두께 500 nm의 경우보다 작은 변환오차 값을 갖는다¹⁵⁾. 또한 1 kHz에서 500 kHz의 주파수 범위내에서는 약 1 ppm 이하의 안정된 변환오차값을 보여 교류 실용표준기로서의 가능성을 제시하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 비교적 적은 온도저항계수 값을 갖는 Evanohm R 합금을 히터재료로 하고 크로멜 및 콘스탄탄을 열전대 재료로 하여, 6인치 반도체 공정 및 마이크로머시닝 기술을 사용하여 박막형 다중접합 열전 변환기를 제작하였다. 박막 히터의 형상은 톱슨 효과 및 펠티어 효과를 최소화하기 위한 bifilar 형태를 취했다. 히터 및 열전대의 고온접합부는 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 다이어프램 위에 위치시켰고, 열전대의 저온접합부는 실리콘 기판 위에 놓이도록 하였다.

Evanohm R 박막 히터의 온도저항계수는 약 75 ppm/°C였고, 입력 전압에 대한 출력 전압관계에서 출력전압은 입력전압의 제곱에 비례하지만 입력 전압이 증가함에 따른 열손실로 그 지수는 1.8985로 감소하였

다. 위의 결과에서 계산된 두께 500 nm인 열전변환기의 전압 감응도는 공기중에서 약 5.75 mV/mW이었다.

FRDC 법으로 측정된 FRDC-DC 변환오차는 20 Hz ~10 kHz 범위에서 박막 두께 500 nm의 경우 전압모드와 전류모드입력에 대해 각각 약 ± 1.36 ppm, ± 0.68 ppm 이하의 오차값을 보였다. 또한 박막 두께 200 nm의 경우 전압모드와 전류모드 입력에 대해 각각 ± 0.74 ppm 및 약 ± 0.93 ppm 이하의 변환오차를 보였다.

이중 채널 자동 측정 방식으로 측정된 교류-직류 전압 변환오차 평가 결과 박막 두께 500 nm의 경우 40 Hz의 저주파 및 10 kHz 이상의 고주파에서 각각 228 ppm 및 89.4 ppm 이하의 현저한 변환오차 증가를 보이는데 이는 히터의 열관성 부족 및 구조상의 기생임피던스에 의한 것으로 보인다. 박막 두께 200 nm의 경우 40 Hz의 저주파에서는 역시 히터의 열관성 부족으로 인한 143.6 ppm 이하의 높은 오차 값을 보이며, 1 MHz에서는 15.6 ppm 이하의 비교적 적은 오차 값을 보이는데, 이는 표면효과 및 유전손실에 기인한 각 변환오차 값 사이의 보상으로 설명된다. 그리고 주파수 범위 1 kHz에서 500 kHz에서는 1 ppm 이하의 안정된 변환오차값을 보인다.

상기의 연구 결과로부터 히터의 온도저항계수를 줄이기 위한 적절한 히터 박막의 열처리 조건 확립과, 열전변환 오차를 감소시키기 위하여 히터의 열관성 증가를 고려한 열질량 구조물의 추가 및 소자 설계가 필요하다. 또한 표면효과를 감소시키기 위한 최적의 저항값을 갖는 박막 제조 조건의 확립 및 공정개발, 공기중 측정의 열손실을 줄이기 위한 진공 패키징 방법의 개발 등이 필요하다.

참고 문헌

- [1] M. Klonz and T. Weimann, "Accurate thin film multijunction thermal converter on a silicon chip," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 38, no. 2, pp. 335~337, Apr. 1989.
- [2] J.R. Kinard *et al.*, "Development of thin-film multijunction thermal converters at NIST," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 46, no. 2, pp. 347~351, Apr. 1997.
- [3] K. Takahashi *et al.*, "AC-DC voltage transfer difference due to Seebeck effect in thermal converters," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, no. 2, pp. 391~394, Apr. 1999.
- [4] 김진섭 외, "Bi-Sb 다중접합 열전변환기의 교류-직류 변환 특성," 전자공학회논문지, 제35권 D편, 제11호, pp. 46~54, 1998.

[5] T.F. Wunsch *et al.*, "A new fabrication process for planar thin-film multijunction thermal converters," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 50, no. 2, pp. 330~332, Apr. 2001.

[6] <http://www.hpmetals.com/technical.asp>

[7] T.A. Kovacs, "Micromachined Transducers Sourcebook," McGraw-Hill, New York, NY, pp. 77~83, 1998.

[8] <http://www.goodfellow.com/csp/active/>

[9] 정인식 등, "박막형 크로멜-알루멜 다중접합 열전변환기," 전자공학회논문지, 제36권 D편, 제9호, pp. 37~45, 1999.

[10] M. Klonz *et al.*, "Measuring thermoelectric effects in thermal converters with a fast reversed DC," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 44, no. 2, pp. 379~382, Apr. 1995.

[11] 권성원 등, "교류-직류 변환오차 자동 측정시스템," 센서학회지, 제7권, 제6호, pp. 25~32, 1998

[12] H. Laiz *et al.*, "A simulation tool for the AC-DC transfer difference of thermal converters at low frequencies," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, no. 6, pp. 1155~1160, Dec. 1999.

[13] 조현덕 등, "저출력저항의 박막 크로멜-알루멜 다중접합 열전변환기," 센서학회지, 제9권, 제4호, pp. 288~296, 2000.

[14] B.D. Inglis, "Standards for AC-DC transfer," *Metrologia*, vol. 29, pp. 191~199, 1992.

[15] H. Dintner *et al.*, "AC-DC-mV-transfer with highly sensitive thin-film multijunction thermal converters," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 42, no. 2, pp. 612~614, Apr. 1993.



李 映 和

- 1971년 1월 6일생
- 1997년 2월 충남대학교 재료공학과 졸업 (공학사)
- 1999년 2월 충남대학교 대학원 재료공학과 졸업(공학석사)
- 2000년 3월 ~ 현재 동 대학원 박사과정 재학중
- 주관심분야 : MEMS, 열전변환기 등

權 聖 遠

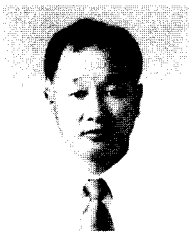
- 『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-09, p.77 참조
- 현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 근무

金 國 珍

- 『센서학회지 제11권 제3호』 논문 2002-11-3-16, p.169 참조
- 현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 근무

朴 世 一

- 『센서학회지 제7권 제3호』 논문 98-7-3-02, p.162 참조
- 현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 근무



林 榮 彦

- 1954년 4월 2일생.
- 1977년 2월 울산대학교 재료공학과 졸업 (공학사)
- 1979년 2월 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학석사)
- 1988년 12월 Purdue University(Indiana, USA) 대학원 재료공학과 졸업(공학박사)
- 현재 충남대학교 신소재공학부 교수
- 주관심분야 : 반도체재료, 자성반도체 등