

실리콘 Thermopile을 이용한 감습 소자의 제작

(Fabrication of a Humidity Sensing Device using Silicon Thermopile)

金泰潤*, 朱炳權**, 吳明煥**, 朴廷浩***

(Tae Yoon Kim, Byeong Kwon Ju, Myung Hwan Oh and Jung Ho Park)

要約

본 논문에서는 새로운 감습 원리를 기초로 한 감습 소자를 설계, 제작하였다. 실리콘 thermopile은 25쌍의 p형 확산층-알루미늄으로 구성되었다. thermopile의 내부 저항은 300k Ω , Seebeck계수는 537 μ V/K이었다. 제작된 감습 소자는 상대 습도를 20%에서 90%로 변화시켰을 때 9 μ V/%RH의 감도를 가지며 선형적인 특성을 나타내었다.

Abstract

A humidity sensing device based on a new humidity sensing principle is designed and fabricated in this study. The silicon thermopile is consisted of 25 couples of p-type diffused layer/Al strips. The internal resistance and the Seebeck coefficient are 300 k Ω and 537 μ V/K, respectively. Fabricated sensors showed linear response characteristics proportional to relative humidity changes with a sensitivity of 9 μ V/%RH in the range from 20% to 90% .

1. 서론

온도와 함께 가장 핵심적인 환경 요소인 습도의 측정 및 제어의 필요성이 점증함에 따라 습도센서를 위한 다양한 재료, 제조 기술, 소자의 구조 등에 대한 연구가 활발히 전개되고 있다. 대개의 습도센서는 센

서 소자 표면에 분위기 중의 수분이 물리적, 화학적으로 흡착, 탈리 혹은 결로됨에 따라 생기는 감습 재료의 전기 저항 또는 정전 용량의 변화를 측정하는 방법을 동작 원리로 하고 있으며, 금속 산화물 소결체^[1], 다공질 금속 산화막^[2], 고분자 전해질막^[3] 등의 감습 재료가 주로 이용되고 있다. 이와 같은 다종 다양한 감습센서는 분위기와 각각의 특성에 맞게 활용되어 진다.

본 논문에서는 건조 공기에 대한 수증기의 혼합비가 증가함에 따라 열전도도가 증가되는 물리적 현상에 의하여 변화되는 미세한 온도차를, 통상의 실리콘 반도체 공정으로 제작되어 온도, 적외선, 흐름, 진공도센서 등에 활용되고 있는 실리콘 thermopile^[4,5]로써 감지하는 감습 원리를 제시하고, 일정하게 발열

* 正會員, 金星中央研究所

(GoldStr Central Reseach Lab.)

** 正會員, 韓國科學技術研究院 理工學研究團

(Div. of Applied Science and Engineering, KIST)

*** 正會員, 高麗大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Korea Univ.)

接受日字 : 1993年 2月 9日

하는 가열원과 실리콘 thermopile을 응용하여 감습 소자를 설계, 제작하여 습도 센서로써 응용이 가능함을 보이고자 하였다.

II. 감습 원리

1. 실리콘 thermopile

실리콘 thermopile은 실리콘 칩상에서 Seebeck효과를 이용하여 온도차를 측정하는 소자이다.

$$\Delta V = \frac{\nabla E_f}{q} = \alpha_s \Delta T \quad (1)$$

여기서 α_s 는 Seebeck 계수이다.

Fermi에너지 준위의 곡률로써 구하는 이론적인 Seebeck계수 외에 실제적으로는 센서를 설계할 때 활용하기 적합하도록, 전기적 저항의 함수로 근사시킨 식으로써 실리콘의 Seebeck계수를 구할수 있다.⁶⁾

$$\alpha_s = \frac{mk}{q} \ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \quad (2)$$

여기서 $\rho_0 \cong 5 \times 10^{-6} \Omega_m$, $\frac{mk}{q} \cong 0.22 mV/K$ 이다.⁷⁾

rectangular thermopile의 경우, thermopile의 폭을 W, 길이를 L, $Ar = L/W$ 이고, N개의 쌍을 직렬로 연결하였을 때, thermopile의 출력전압 V_{tp} ⁷⁾는

$$V_{tp} = \frac{mk}{q} \frac{P}{k} \left[\frac{R_{tp} f A_r}{dt} \right]^{1/2} \rho^{-1/2} \ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \quad (3)$$

- P : heat flowing through the thermopile(W)
- R_{tp} : thermopile internal resistance(Ω)
- k : thermal conductivity(W/mK)
- f : de/dt
- de : equivalent electrical sheet thickness(m)
- dt : equivalent thermal sheet thickness(m)

로 나타낼 수 있다. 즉 출력 전압을 높게 하기 위해서는 Seebeck계수와 thermopile의 냉, 온접점 간의 온도차가 크게 되어야 하고, 열적, 전기적 저항을 크게 하여야 함을 알 수 있다.

2. 감습 기구

그림 1은 감습 기구를 설명하기 위하여 본 논문에서 제작된 소자의 열전달 경로를 모식적으로 나타낸 것이다.

가열원으로부터 소자 표면으로 열은 대류, 전도, 복사에 의하여 전달된다. 근접된 거리에서 국부적으로 소자 표면의 온접점을 가열할 때, 가열원으로부터 소자 표면으로 전달되는 열의 상대적인 값을 매체 공

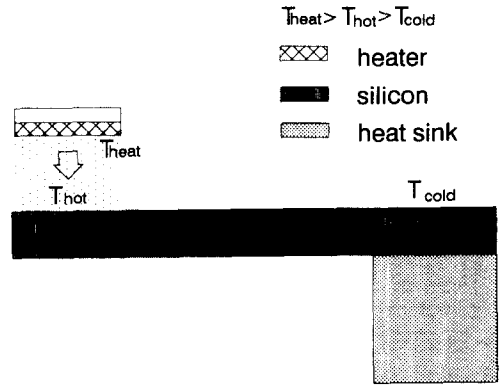


그림 1. 소자내의 열전달 모식도

Fig. 1. Schematic diagram of heat transfer for the fabricated device.

기의 함수량의 함수로 볼 경우에는 복사열 및 실리콘을 통한 전도에 의한 열의 흐름을 제외시킬 수 있다. 따라서 가열원으로부터 소자의 온접점으로 전달되는 열은 매체 공기의 열전도도인 λ_{mix} 의 변화에 기인되고, 결국 thermopile의 출력 전압의 변화로써 나타나게 된다.

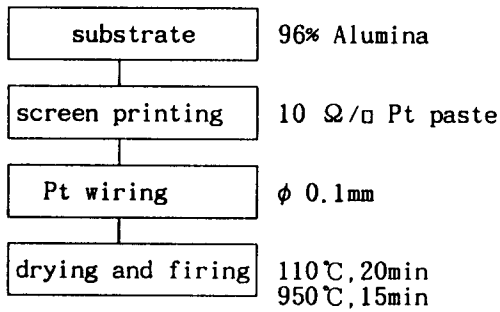
III. 실험

1. 소자의 제작

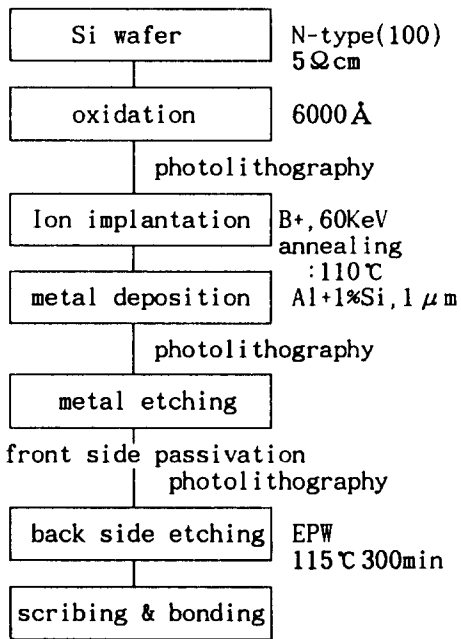
그림 2에 소자의 제조 공정을 나타내었다. 전력을 공급함에 따라 일정하게 발열하는 가열원과 그 가열원으로부터 제공받는 열량의 변화를 측정하기 위한 thermopile을 별도로 제작한 후, 가열원과 thermopile의 온접점이 500 μ m 간격이 되도록 패키징하였다.

가열원은 전형적인 후막 공정을 통하여 제조된 백금 후막 저항체를 사용하였다. 두께 0.2mm인 알루미늄 (96% Al₂O₃) 기판위에 10 Ω /□인 백금 페이스트를 스크린 인쇄하였다. 리드선은 직경 0.1mm인 백금선을 백금 페이스트를 사용하여 부착한 후 건조 및 열처리하였다. 이와 같이 제작된 가열용 후막 저항체의 저항은 2.5 \pm 0.2 Ω 이었다.

크기가 3.4 \times 4.0mm²인 칩 위에 열전 재료가 알루미늄과 p형 실리콘으로 된 열전쌍을 직렬로 25쌍 연결하여, thermopile의 크기가 2 \times 2mm²이 되도록 구성했다. thermopile 각 선의 폭은 10 μ m이고 길이는 2,000 μ m이며, 선 간의 간격을 10 μ m로 설계하였다. 또한 뒷면 식각을 위한 창 면적은 4 \times 2mm²로 하였다.



(a)



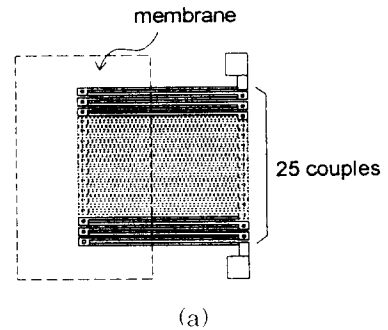
(b)

그림 2. 소자의 제조 공정

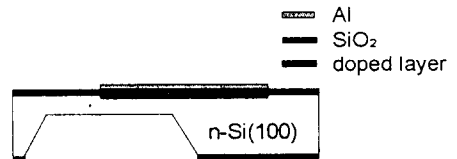
Fig. 2. Fabrication Process of devices.

- (a) heating source.
- (b) silicon thermopile.

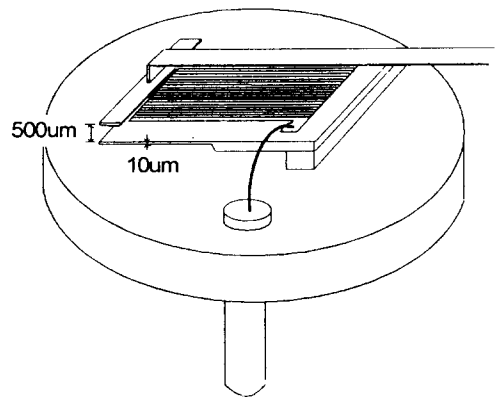
이것의 구조를 그림 3에 나타내었다. n-형 5 Ωcm, 결정방향이 (100)인 실리콘 웨이퍼에 확산 마스크로써 사용하기 위하여 6000 Å 두께의 SiO₂ 층을 습식 산화하였다. B가 도핑된 실리콘 선을 형성하기 위하여 웨이퍼 전면에 포토리소그라피 작업을 한 후 확산 창을 내고 1000 Å 두께의 버퍼 산화물 층을 형성했다. B'을 60KeV의 에너지로 3x10¹⁴ dose 가 되도록 주입하고 열처리 하였을 때, B'가 도핑된 층의 캐리어



(a)



(b)



(c)

그림 3. thermopile 및 소자의 구조

Fig. 3. Construction of devices.

- (a) top view of thermopile.
- (b) cross section of thermopile.
- (c) whole structure of devices.

농도는 2.2x10¹⁸/cm³ 이고 침투깊이는 1 μ m 였다.

B'이 도핑된 실리콘 선 사이를 알루미늄으로 상호 연결하는 공정을 위하여 2000 Å 두께로 산화물을 형성하고 RIE로 건식 식각을 하여 접촉창을 내었다. 전면에 Al+1%Si을 1 μ m 두께로 진공 증착한 다음 포토리소그라피 작업을 거쳐 알루미늄 선을 정의한 후 30분간 화학 에칭을 행하였다. 그 후 450°C로 가열하여 금속 합금을 형성하였다.

공정이 진행된 전면을 보호하기 위해 포토레지스트 보호막을 입히고, 후면에 양면정열기를 이용하여 리소그래피 작업을 거쳐 다이아프램 창을 형성하였다. 식각용 테프론 지그에 샘플을 고정시키고 EPW 액(Ethylenediamine : Pyrocatechol : Water = 300ml : 90g : 90g) 에 115±1℃의 온도로 300분 가량 화학 식각을 하여 10μ m 두께의 다이아프램을 만들었다. 이 때 실리콘의 식각율은 약 2μ m/min였고, 후면에 위치시킨 백열등의 투과광을 관찰하여 식각을 정지하였다.

마지막으로 칩을 자르고 실버에폭시를 이용하여 패드에 부착한 후 금선으로 본딩하였다.

2. 시험 방법

시편의 감습 특성을 측정하기 위하여 항온기 안에 내용적 2l의 시험조를 위치시켜 장치를 구성하였다. 황산과 염화리튬을 거쳐 탈습된 공기와, 물을 거쳐 습해진 공기를 각각 조절하여 시험조 안으로 흘려 보냈다. 시험조 안으로 유입되는 공기 흐름의 양은 100ml/min로 조절하였고, 시험 시에는 공기의 흐름이 없도록 하였다. 공기-수증기 혼합비는 flowmeter로 조절하였고 기준 습도계로 보정하였다. 가열용 저항체의 입력 전원은 Keithley 228 voltage/current source를 사용하였으며 thermopile의 출력 전압은 Yt recorder로 직접 출력하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 입력 신호원의 특성

가열용 백금 후막 저항체에 전력이 공급됨에 따라

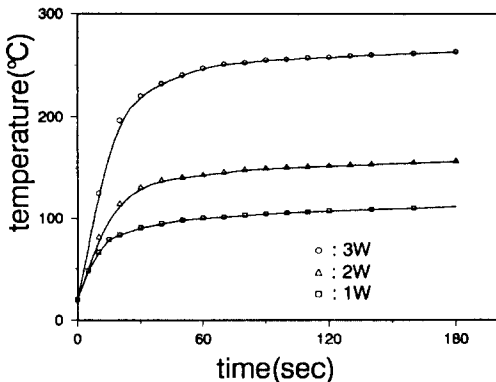


그림 4. 가열용 저항체의 표면 발열 온도 변화
Fig. 4. Surface temperature of the heating resistor as a function of heater-on time.

발열하는 온도 변화를 그림 4에 나타내었다. 1W, 2W, 3W의 전력을 각각 인가하며 접촉식 열전대를 이용하여 측정한 표면 발열 온도는 다소 증가하는 경향을 보였고, 안정적인 값에 이르는 데 약 25초 정도의 시간이 소요되었다. 이것은 가열용 백금 후막 저항체 자체가 갖는 TCR (Temperature Coefficient of Resistance)값과 가열용 저항체부의 열용량 등에 기인되는 것이라 생각된다. 일반적으로 금속 또는 금속 산화물 페이스트로 후막 저항체를 만들었을 때, TCR 값은 페이스트 조성 및 열처리 조건 등의 공정 변수에 의해 많은 차이가 나며, 또한 비교적 크다.

그림 5에는 그림 3과 같이 1W, 2W의 전력을 인가할 때, 저항체 주위 공기의 습습 정도에 따라 가열용 저항체의 표면 발열 온도 변화를 조사한 결과를 나타내었다. 그림에 나타난 표면 발열 온도는 저항체로부터 150μm 정도 떨어진 곳에 열전대를 위치시키고 시험조를 건조 공기 (25℃, 상대습도 20%) 또는 습한 공기 (25℃, 상대습도 90%)로 채운 후 측정하였다. 그림에서처럼 측정 오차 내의 변화만 보일 뿐 그 경향을 확인하기가 곤란하였다. 이것은 열전대를 150 m 이격시켜 측정한 관계로 발열체 표면의 열 손실량을 정확히 측정할 수 없었거나, 변화량 자체가 극히 작아 측정 오차 범위에 포함되었을 것이라 추측된다.

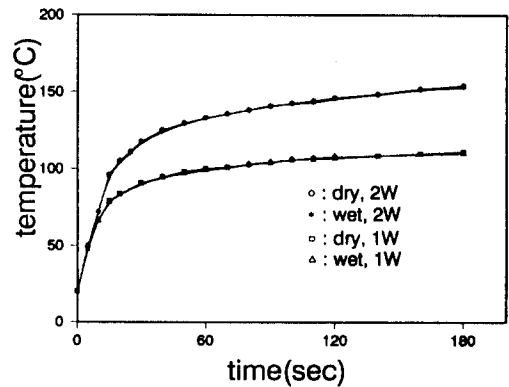


그림 5. 분위기 공기의 습습에 따른 가열용 저항체의 표면 발열온도 변화

Fig. 5. The change of surface temperature of the heating resistor by humidified ambient air as a function of heater-on time.

그림 6에는 공기 흐름의 영향을 확인하기 위하여 2W의 전력을 가열용 저항체에 인가하면서 시험조 내로 건조 공기 또는 습한 공기를 3 l/min로 흘릴 때와 흐름이 없게 할 때의 표면 온도를 비교하여 나타내었다. 건조한

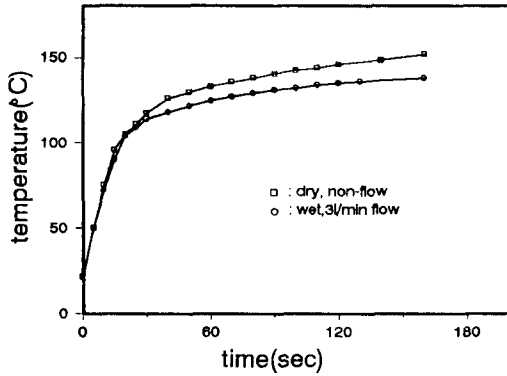


그림 6. 공기의 흐름에 의한 가열용 저항체의 표면 발열온도 변화

Fig. 6. The change of surface temperature of the heating resistor by air flow as a function of heater-on time.

공기나 습한 공기인 경우 모두 흐름에 의한 열 손실은 많았으며 안정된 발열 온도값에 빨리 도달하였다.

2. 출력 신호 특성

출력 특성은 여러 시험 조건에서의 thermopile의 출력 전압으로 나타난다. 제작된 thermopile의 Seebeck계수를 계산하기 위해서 온접점과 냉접점 양단에 웨도우마스크를 사용하여 크롬/니켈을 약 3000 Å 열증착하여 저항체 쌍을 구성하였다. 이 저항체 쌍의 저항온도계수는 약 4500ppm이었으며, 저항 변화를 온도로 환산하여 구한 Seebeck계수 등 thermopile의 성능값을 표 1에 요약하였다.

표 1. 제작된 thermopile의 성능

Table 1. Typical performance characteristics of thermopile.

items	values
materials	p-Si : Al
dimension of strips, μm	10 x 2000
number of couples	25
sheet resistance, Ω/\square	250
internal resistance of thermopile, $k\Omega$	300
Seebeck coefficient of a couple, $\mu\text{V}/\text{K}$	547
thermoelectric power of a thermopile, mV/K	13.7

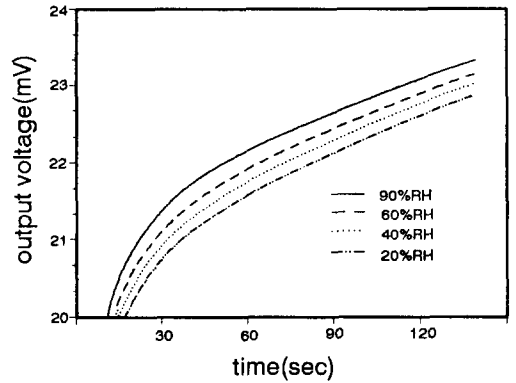


그림 7. 가열용 저항체의 발열개시에 따른 thermopile의 출력변화 곡선

Fig. 7. Output voltage of a thermopile vs. heater-on time.

가열용 저항체가 감습 소자의 입력 신호원인 반면, 출력 신호는 입력 신호원의 열 공급에 의한 thermopile 양단간의 개방 회로 전압이 된다.

그림 7은 각기 다른 상대 습도 분위기에서 가열용 저항체에 전력을 공급할 때 시간에 대한 thermopile의 출력변화를 나타내었다. 가열 시간이 증가함에 따라 thermopile의 출력 전압도 증가함을 보이고 있는데, 이것은 그림 4에서 본 바와 같이 발열 온도가 증가함에 따라 thermopile의 온접점이 받는 열의 양이 많아지기 때문이다. 또 시험조 내의 분위기가 건조 상태에서 습한 상태로 바뀔 때 따라 출력 전압은 증가한다. 그 이유는 상대 습도가 증가함에 따라 분위기 공기의 열전도도는 증가되므로 가열원으로부터 thermopile의 온접점에 전달되는 열은 많아지게 되고, 방열되는 냉접점의 온도는 분위기 온도로 일정하게 유지되므로, 보다 많은 열을 받는 고습도쪽의 냉-온접점 양단간의 온도 차가 더 크게 되어 출력 전압은 증가하게 된다.

동일한 측정 분위기하 (같은 온도, 습도)에서 입력 신호원인 가열용 저항체에 공급되는 power를 단속시킬 때, 출력 신호를 내는 thermopile의 응답성을 그림 8에 나타내었다. 가열용 저항체에 전력을 공급함에 따라 안정된 값에 도달되는 시간이 약 25초 정도 소요됨은 그림 5에서 설명된 것과 같다. 그에 따라 thermopile의 출력 특성도 전력 공급이 개시된 이후 약 30초, 중단된 후 약 15초 정도가 소요된다. 이것은 실리콘 thermopile 자체의 응답성 때문이 아니고 가열용 저항체부, 분위기 공기 및 실리콘의 열용량에 의한 지연시간에 기인된 것이다.

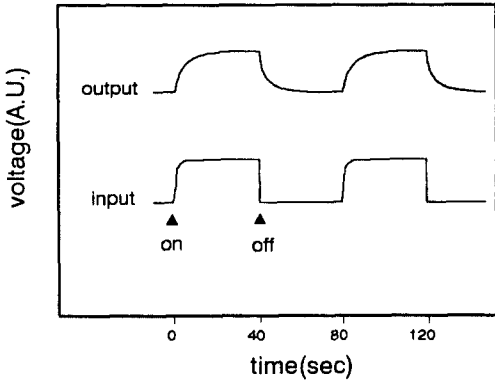


그림 8. 가열개시 및 중단에 따른 출력특성의 응답성
 Fig. 8. Transient characteristic of thermopile with the heater on-off as input signal.

그림 9는 온도를 25℃로 일정하게 유지시킨 시험조 분위기 내에서 thermopile 출력 특성의 확산값을 상대 습도의 변화에 대해서 나타낸 것이다. 이 그림에서 상대 습도 변화에 대한 출력 특성은 우수한 선형성을 나타내고 있고, 출력 특성의 변화율은 약 3 %FS(full scale), 감도는 9 μ V/%RH로서 조금 작은 값인 편이다. 이것은 실리콘이 비교적 큰 열전도도 (약 150W/mK)를 갖기 때문에 membrane 구조나 두께를 조절하여 열적 격리 효과를 증대시키는 방법과^{4,5)} 열기전력 효과가 큰 재료의 선택, 혹은 시험 조건 및 방법의 개선 등을 통한 출력 감도를 향상시킬 수 있다. 그러나, 선형성과 재현성 등의 중요한 특성들만 확보된다면 신호의 증폭 등 회로적인 배려로써 비교적 낮은

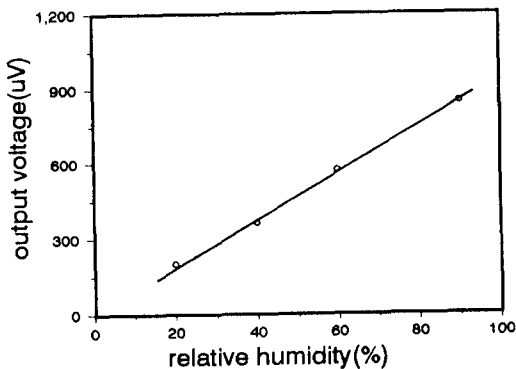


그림 9. 상대습도 변화에 따른 소자의 출력특성
 Fig. 9. Output voltage response of a device as a function of relative humidity.

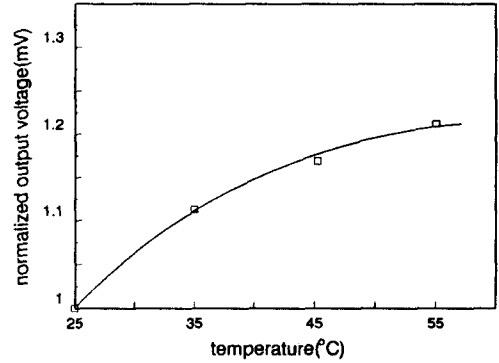


그림 10. 분위기 온도 변화에 따른 소자의 출력 전압 변화

Fig. 10. Normalized output voltage vs. ambient temperature.

감도라도 극복될 수 있으리라 생각된다

그림 10에 상대습도 20%를 유지하면서 감습 소자의 분위기 온도를 변화시킬 때, 25℃에서의 출력에 대한 상대적인 출력 특성 값의 변화를 나타내었다. 분위기 온도가 증가함에 따라 출력 특성 값도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 상대 습도를 일정하게 유지할 지라도 분위기 온도 변화에 대한 출력 특성을 고찰할 때에는 단순히 온도 변화만으로 설명할 수는 없다. 이것은 온도가 변화함에 따라 포화 수증기압, 또는 절대 습도가 직선적으로 변화하지 않으므로 분위기 내의 수증기량에 의한 것으로써 직접적인 설명이 되지 않으며, 공기중의 각종 입자의 운동량, 점성 변화 등 복잡한 물리적 현상에 대한 고찰이 필요하다고 생각된다.

이 밖에도 소자의 출력특성에 영향을 미치는 인자로서는 열전도도가 크게 다른 기체가 다량 혼합될 경우 또는 공기의 압력 및 흐름의 변화 등을 들 수 있다. 특히 흐름에 의한 영향은 그림 6에서와 같이 가열용 저항체의 표면 발열온도를 크게 변화시키므로, 습기에 의한 열전도 효과를 상대적으로 미미하게 한다. 그러나 실험 결과 이중 호울카바나 메쉬카바 등의 패키지 방법으로써 흐름의 영향은 제한할 수 있었다.

앞으로 본 논문에서 제시된 소자를 실용적으로 응용할 경우는 이러한 인자들에 대한 영향을 파악하고, 그것을 최소화하는 연구가 보완되어야 하겠다. 또한 별도의 기준 소자를 이용하여 온도에 의존하지 않는 절대 습도량을 계측하거나, 단일 습도센서 뿐 아니라 하나의 모듈상에 여러 물리량을 계측할 수 있도록 각 실리콘 센서를 함께 구축하는 방법 등도 고려할 수 있을 것이다.

V. 결론

공기의 열전도도 변화의 감지를 원리로 하는 감습 소자를 제작하여 습도센서로의 응용 가능성에 대하여 조사하였다.

공기에 대한 수증기의 물분율이 약 0.2 이하인 경우는 수증기 함량이 증가할수록 열전도율이 증가한다. 일반적인 계측 온도 범위 내에서 함습 공기의 열전도도 변화를 감지하기 위한 소자로써, 가열원으로 쓰일 백금 후막 저항체와, p형 실리콘 및 알루미늄으로 구성된 열전쌍을 25쌍 직렬로 연결하여 실리콘 thermopile을 제작하였다.

제작된 thermopile의 내부 저항은 300k Ω 이었고, Seebeck계수는 547 μ V/K, 출력 감도는 13.7 mV/K로써 비교적 낮은 값이었다. 그러나 25 $^{\circ}$ C의 일정한 온도에서 상대습도를 20%에서 90%로 변화시킬 때 이 소자들은 선형적인 출력 특성을 나타냈고, 변화율은 약 3%FS였다. 가열 개시 후 안정된 출력 특성을 보이기까지 소요 시간은 30여초였으며, 초기값으로 복귀하는 시간은 15초 정도의 응답성을 보였다.

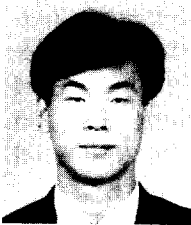
參考文獻

- [1] T.Seiyama, N.Yamazoe and H.Arai, "Ceramic humidity sensors," *Sensors and Actuators*, 4, pp.85-96, 1983
- [2] S.Hasegawa, "Performance characteristics

of a thin-film aluminum oxide humidity sensor," *Proc. Electron Components Conference*, 30, pp.386-391, 1980

- [3] P.E.Thomas, J.O.Colla and R.Stewart, "A capacitance humidity sensing transducer," *IEEE Trans. Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, CHMT-2, pp.231-233, 1979
- [4] A.W.Van Herwaarden, D.C.Van Duyn and P.M.Sarro, "Integrated thermopile sensors," *Sensors and Actuators*, A21-A23, pp.621-630, 1989
- [5] 주병권, 김형곤, 오명환, "실리콘 thermopile 집적센서의 기술동향," 전자 공학회지, 제16권, 제6호, pp.90-99, 1989
- [6] G.D.Nievelde, "Thermopiles fabricated using silicon planar technology," *Sensors and Actuators*, 3, pp.179-183, 1982
- [7] A.W.Van Herwaarden and P.M.Sarro, "Thermal sensors based on the Seebeck effect," *Sensors and Actuators*, 10, pp.321-346, 1986
- [8] B.W.Van Oudheusden and A.W.Van Herwaarden, "High-sensitivity 2-D flow sensor with an etched thermal isolation structure," *Sensors and Actuators*, A21-A23, pp.425-430, 1990

著者紹介



金泰潤(正會員)
1960년 3월 20日生. 1984년 2월 한양대 무기재료공학과 학사. 1993년 2월 고려대 전자공학과 석사. 1987년 8월 ~ 현재 금성 중앙연구소 연구원. 주관심 분야는 센서 소자 및 응용 등임.

朴廷浩(正會員)
1955년 12월 26日生. 1981년 2월 고려대 전자공학과 학사. 1987년 12월 미국 Univ. of Delaware 공학박사. 1987년 ~ 1990년 금성중앙연구소 책임연구원. 1990년 3월 ~ 현재 고려대 전자공학과 부교수. 주관심 분야는 III-V 화합물 반도체 소자, 광 집적 회로 등임.

朱炳權(正會員) 第 28卷 A編 第 8號 參照
현재 KIST 정보전자연구부 연구원
고려대 전자공학과 박사과정

吳明煥(正會員) 第 26卷 第 11號 參照
현재 KIST 정보전자연구부 책임
연구원