

고온에서 안정한 저전력 마이크로히터 구조 최적화 연구

Study on Optimal Structure of Low Power Microheater to Remain Stability at High Temperature

임 운 현* · Vijay Kondalkar* · 이 기 근*
(Woonhyun Lim · Vijay Kondalkar · Keekeun Lee)

Abstract - Microheaters with different structures were fabricated and compared to find an optimal configuration enhancing the performances of C_2H_2 gas sensor. Three temperature sensors were integrated on the surface of the insulation layer over the microheater, and resistance changes were observed to check the generated heat from the microheater. A low operating voltage of 1mV was applied to the temperature sensor to minimize any influence of thermal heat from the resistance type temperature sensor, whereas high voltages in the range between 10 and 20V were applied to the microheater. A microheater structure generating maximum heat at low voltage was determined. The generated heat was verified by the temperature sensors on the top of the Si_3N_4 and infrared camera. A long term stability and accuracy of the microheater were observed. The developed microheater was applied to enhance the performances of C_2H_2 gas sensor and successfully confirmed that the developed microheater greatly contributes to the improvement of sensitivity and selectivity of gas sensor.

Key Words : Microheater, Temperature sensor, Thermal conductivity, Joule heating, C_2H_2 sensor

1. 서 론

외부의 자극(stimulus)을 전기신호로 변환하는 센서는 MEMS 기술의 발전과 함께 소형 집적화되어 많은 산업분야에 이용되고 있다. 센서에 입력되는 여러 자극 중에서 특정 요소만을 선택적으로 검출하는 선택성은 센서의 핵심성능이며, 특히 가스센서의 경우 동작온도에 따라 선택성에 큰 차이가 있다. 다양한 방법으로 가스센서의 선택성 향상 기술이 보고되고 있다. 주요한 방법으로는 최적화된 감지물질 표면위에 촉매, 도핑 물질을 첨가하여 선택성을 향상시키거나, 동작온도에 따라 특정가스에만 민감히 반응하는 온도를 찾아 센서를 구동시킨다. 또한 여러 가스들에 동시에 반응하는 감지물질에서 특정온도에서 가스들 간의 반응비를 미리 알아 소프트웨어를 이용하여 원치 않는 타가스의 반응비를 뺌으로써 선택성을 높이는 기술 및 감지물질 표면위에 원하는 가스만 통과시키는 얇은 필터막을 증착하여 선택성 향상에 기여한다. 따라서 가스센서의 감도 및 선택성 향상 측면에서 마이크로히터를 센서와 집적하여 일정한 동작온도를 유지시키는 일은 매우 중요하다. MEMS 기술의 발전은 히터의 소형화 저전력에 큰 영향을 끼쳤다[1-4]. 본 논문에서 채택하는 방법은 혼합 테스트

구조이다. 이것은 의사 무작위 테스트를 수행하고 그것으로 잡아 내기 어려운 고장을 결정 테스트로 해결하는 방식이다[4]. 무작위 저항 고장에 대한 패턴만을 FSM을 이용해서 가해주고 나머지 고장은 의사 무작위 패턴생성으로 잡아주는 방식을 채택하였다[5]. 히터가 다운 스케일링되면서 더 빠른 응답 시간, 배터리를 이용한 구동가능, 저전력을 이용한 높은 온도 구현이 가능해졌다. 센서에 열에너지를 전달하는 방법은 센서 외부로부터 감지물질 표면위에 열을 전달하는 방식과 내부에서 열전도에 의해서 직접적으로 센서에 열을 가하는 방식이 있다. 외부 전달 방식은 매질의 온도 상승을 야기하여 매질의 성질을 변화시킬 위험이 있다. 또한 온도 조절을 위한 또 다른 신호부의 처리가 요구되며 시스템을 구동하기 위한 전력도 많이 소비된다. 그에 비해 마이크로히터는 저전력으로 높은 열에너지를 센서에 공급해 동작 온도의 설정을 용이하게 함과 동시에 빠른 온도의 상승, 하강 시간을 보이는 장점으로 인하여 센서의 동작온도 확보에 유리하다. 탄화수소 가스센서(CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 등)의 경우 가스 구성 원자들의 비슷함으로 인해 하나의 감지물질에 여러 다른 가스들이 동시에 반응하여 센서의 선택성을 갖추기 매우 어렵다. 그러나 탄화수소 가스는 온도에 따라 분자의 운동성의 차이가 있는데, 이러한 온도특성을 이용하여 CH 계열의 특정 기체를 탐지하고 센서의 선택성을 향상시키기 위해선 마이크로히터는 필수불가결하게 집적화가 이루어져야 된다. 일반적으로, 마이크로히터를 구성하는 물질로는 크게 세라믹, 폴리실리콘, 금속이 쓰인다[5-6]. 세라믹히터는 필라멘트를 매개체로 열을 세라믹 물질에 전달하며 절연특성과 히터의 열용량이 크다는 장점이 있다. 하지만 열에너지가 충전, 방전되는 시간이 매우 길어 빠른 구동시간을 요구하

* Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea.
E-mail: keekeun@ajou.ac.kr
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9472-0209>

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea.

Received : October 10, 2018; Accepted : November 29, 2018

는 마이크로히터 분야에는 치명적인 단점이 존재한다. 폴리실리 콘은 고농도로 도핑이 된 실리콘이며, 동일한 형태를 가지고 있을 때 도핑농도의 조절로 비저항의 값을 원하는 대로 조절할 수 있다. 하지만 공정의 난이도가 상승하며 그에 따라 제작단가 역시 높아지게 된다. 금속을 이용한 히터는 빠른 온도변화를 만들어 낼 수 있으며 제작이 용이하다는 장점이 있다. 금속히터는 줄 발열 원리를 이용하여 전기에너지를 인가하고 열에너지를 얻는데, 집적화된 마이크로히터에서는 저전력에서 최대한 고온의 상태를 유지하는 것이 핵심 쟁점이다. 또한 동작영역에서 일정한 열에너지를 유지시켜 주어야 하는데, 줄 발열에 의한 온도가 상승함에 따라 발생하는 금속의 저항변화로 인해 온도 지속성에 관한 문제가 최근 주목되고 있으며 매질로의 열전달 등의 이슈 역시 금속 마이크로히터의 설계의 고려 요소이다[7-8]. 연구마다 상이한 동작영역과 MEMS 시스템의 제한 때문에 마이크로히터는 규격화되기가 매우 어려우며 최근의 연구 등에서는 다양한 금속선 구조의 배열을 통하여 최대한의 전력이득과 열안정성을 꾀하고 있다. 2017년, J. Kang 등은 백금을 이용한 단일금속선 기반 마이크로히터를 개발하였다[9]. 개발된 마이크로히터는 150°C에 달하는 최고도달온도를 지니지만, 열안정성, 동작구역 내의 동등한 온도형성에 대한 문제가 남아있다. W. Sripumkhai의 연구팀은 Si₃N₄ 절연층 기반 소자를 소개하였으며 인가전압에 따른 온도 포화(saturation)를 확인하였다[10]. 하지만 마이크로히터가 공기중에 노출되어 있어 매질의 간섭 등이 존재하고 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 탄화수소 가스센서에서의 특정 온도유지 필요성과 센서의 동작영역에서 저전력 최대효율의 열생성, 매질 간섭을 최소화 하면서 가스 선택성을 향상시키기 위한 150°C 최대 도달 온도의 마이크로히터의 최적구조를 제안한다. 그림 1은 제안하는 마이크로히터의 표면도 및 단면도를 도식화한 그림이다. 금속에 전류를 인가하면 도체 내부에 전계가 생성되고

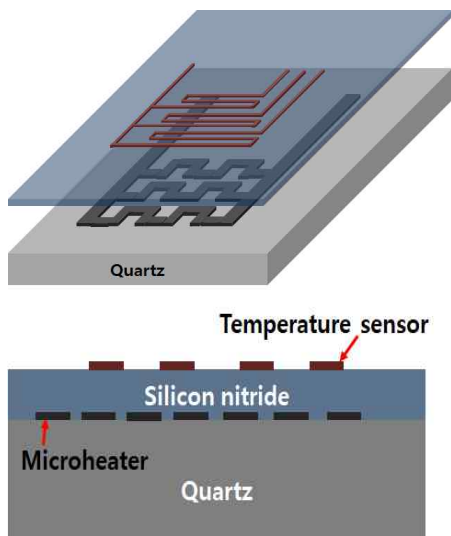


그림 1 마이크로히터 및 온도센서가 집적된 3D 설계도 및 단면도
Fig. 1 3D overall and cross-sectional views of the developed micro-heater and temperature sensor

그 전계에 의해 이온들이 충돌한다. 충돌한 에너지는 전계의 세기에 비례하여 열에너지로 전환되며, 금속자체에 열이 충전됨과 동시에 주변매질로의 열전도가 일어난다. 제한된 영역에서 최대의 온도 전환을 이룸과 동시에 안정적인 온도 지속성을 얻기 위해 다양한 구조의 히터들이 설계되었다. 본 연구에서는 4가지 구조의 마이크로히터의 성능을 비교한다(그림 2). 1번 구조는 단일 금속선으로 동작영역을 채운 직렬형 구조이다. 동작영역에서 단일 저항을 가진 금속선을 가짐으로써 저항과 전압의 간단한 관계에 의해 줄 발열을 기대해 볼 수 있다. 2번 구조는 단일 금속선에 평행하게 매우 얇은 금속선을 배치하여 얇은 금속선에 빠르게 열에너지가 채워지고, 그 열에너지가 열용량이 큰 단일 금속선에 전달되면서 빠른 온도 상승시간과 더불어 더 높은 온도 특성, 안정적인 열 배급을 기대해보았다. 3, 4번 구조는 긴 금속선에 동작영역에서는 단일 금속선이 병렬구조로 연결되어 있는 구조들이며 각각 하나의 금속선의 크기를 조절하여 안정적이며 열용량이 큰 특성을 얻기 위해 시도된다. 4번 구조에 비교하여 3번 구조는 금속선이 좀 더 세밀하고 많은 턴으로 교차하고 있다. 3번 구조는 4번 구조에 비해 병렬선의 저항이 높다. 매질의 간섭을 줄이기 위해 마이크로 히터 상부에는 절연층이 1.5μm 형성되었고, 절연층 표면의 온도를 확인하기 위하여 동작영역을 3구역으로 다시 나누고, 그라운드를 공유하는 3개의 백금 온도센서를 배열하여 표면의 온도를 저항변화로 정확히 계산할 수 있도록 하였다.

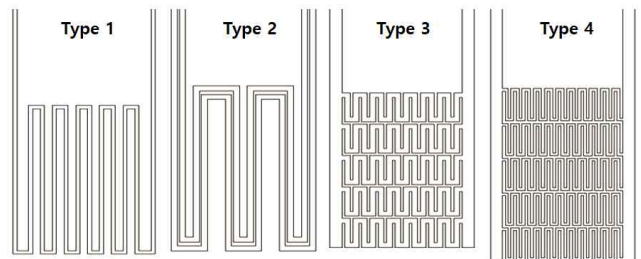


그림 2 제작된 4가지 종류의 마이크로히터 상세 도면
Fig. 2 Specific drawings of the four different types of the proposed micro-heaters

2. 최적 소자 파라미터 및 COMSOL 시뮬레이션

2.1 마이크로히터 파라미터

마이크로히터의 특성에 영향을 미치는 요소는 크게 초기저항, 구조, 열안정도 및 열전달성이 있다. 금속은 줄 발열의 원리에 따라 그 열량을 계산할 수 있으며 그 양은

$$H = I^2 \rho \frac{L}{A} t \quad (1)$$

H : 줄 열, I : 전류세기, ρ: 고유 비저항, L: 금속선의 길이, A: 전류 진행방향의 금속 면적 등으로 계산할 수 있다.

위 식 (1)에서 줄 열에 가장 큰 영향을 끼치는 변수는 금속에 흐르는 전류이다. 동일한 전압을 가할 때 최대한의 전류를 흐르게 하여 열에너지 생성효율을 높이기 위해선 히터의 초기저항을 낮춰야 한다. 또한 동일한 영역에 일정한 온도를 형성하기 위해선 영역 내에 최대한 일정한 패턴의 금속들이 배치되어야 한다. 이러한 점 때문에 금속 마이크로히터의 구조를 형성할 때 대칭성의 구불구불한 형태의 금속 배열을 만드는 것이 안정적인 열전달에 유리하다. 열의 전도도는 온도와 압력에 따라서 그 특성이 다르게 나타나며 등방성 물질의 경우는 스칼라량, 비등방성 물질의 경우에는 텐서량이 된다. 금속은 그중에서도 자유전자에 의해 매우 큰 열전도도를 가지고 있다. 열전도율은 물질의 밀도, 비열, 점도에 영향을 받는다. 물체를 통하여 전달된 열량은

$$\Delta Q = kA\Delta T \frac{t}{h} \quad (2)$$

ΔQ : 전도된 에너지, k : 고유 열전도계수, A : 통과 단면적, ΔT : 양끝 사이 온도차, t : 전도 시간 h : 열전달 거리이다. 열용량은 물질을 1°C 올리는데 필요한 칼로리를 의미한다. 열용량은 분자간의 결합의 세기에 큰 영향을 받으며 비열이 낮을수록 낮은 온도 차이에 의해서도 열 이동이 용이하다. 일반적으로 금속은 비열이 낮아 빠른 열전달이 가능하며 그 중에서도 백금, 금, 은, 구리는 매우 효율적인 열전달 물질로 알려져 있다. 열용량은

$$C = c_p m \Delta T \quad (3)$$

C : 열용량, c_p : 물질의 비열, m : 물질의 질량, ΔT : 온도변화량. 식 3의 열용량을 이용하여 물질의 온도변화에 필요한 열에너지(줄)는 다음과 같이 정의된다.

$$VI \cdot t = C_p m \Delta T \quad (4)$$

온도상승(ΔT)은 히터물질의 선택과 그 질량, 저항, 인가전압/전류 등에 의해 결정됨을 알 수 있다. 따라서 마이크로히터가 열을 품고 지속적인 열에너지를 안정적으로 공급해주기 위해선 반응 금속의 질량을 증가시켜야 하며, 이는 소자의 초기 저항 및 조밀한 대칭패턴 형성과 상충되지 않게 적절한 설계가 진행되어야 한다. 가스센서의 반응은 수 시간, 혹은 수 일 이상 반응을 한다. 따라서 본 연구에서 제작한 마이크로히터는 오랜 시간동안 전압이 인가되어도 온도의 안정성이 유지됨과 동시에 지속적인 사용을 위해서 금속의 산화 및 변형이 없어야 한다. 따라서 열계수가 높으면서 녹는점이 매우 높고, 산화가 거의 일어나지 않는 백금을 반응 금속으로 이용한다. 또한 외부의 공기층 차단을 위하여 Si_3N_4 절연층을 마이크로히터 상단에 덮어준다. Si_3N_4 는 온도에 따른 열팽창이 일어나지 않으며, 밀도가 높은 절연체이다. 절연층의 두께는 공기와의 단절을 하면서 동시에 마이크로히터의 열전달을 방해하지 않는 정도의 $1.5\mu\text{m}$ 의 두께를 가진다. 마이크로히터는 금속에 전류가 인가되는 순간 분자의 열용량이 만족될 때까지 열에너지를 품으며 온도가 상승한다. 이때 인가되는 전압에 비례하여 백금 히터에서 생성되는 열에너지가 증가한다. 동시

에 주변의 낮은 열에너지를 가진 물질에 열에너지가 전도된다. 열용량이 채워진 분자가 많아짐과 동시에 주변물질들과의 온도차가 낮아져 점차 열평형 상태에 도달한다. 모든 분자가 열용량이 채워지면 전압에 의해 생성되는 열에너지와 주변에 전도되는 열에너지의 총량이 같아지며 포화영역에 도달한다. 주변의 낮은 열에너지를 가진 물질로의 열의 흐름은 주변 매질과의 열전달, 열대류, 열방사의 합으로 알려져 있으며 일정온도를 유지키위한 주변층의 선택이 중요하다. 본 연구에서는 히터에서 많이 사용되고 있는 Si_3N_4 및 SiO_2 층을 주변 층으로 선택하였다.

2.2 저항형 온도센서

마이크로히터가 생성한 열에너지는 절연층을 통과하여 표면에 머문다. 이 표면의 온도를 정확하게 측정하기 위하여 백금을 이용한 온도센서를 표면층에 형성한다. 백금은 온도에 따른 열저항계수가 0.00385로 높아 미세한 온도의 변화에 따라서 선형적으로 그 저항값이 변한다. 동작영역의 표면에서 동일한 온도가 형성되는지 확인하기 위하여 구역을 3개로 나누었고, GND를 공유하는 온도센서를 각 구역에 배치하여 표면에 형성되는 온도를 센서 저항의 확인만으로 정확하게 계산할 수 있게 한다.

2.3 COMSOL 시뮬레이션

그림 2와 3은 본 연구에서 설계 비교하는 마이크로히터의 총 4가지의 다른 구조를 나타낸다. 단일 금속라인으로 구성된 마이크로히터(Type 1), 얇고 높은 전류가 흘러 빠르게 열용량이 충전되는 금속라인을 기존의 금속라인과 평행하게 배치하여 빠른 상승시간과 높은 열전달을 가능하게 한 히터(Type 2), 동작구역 측부의 낮은 저항의 금속선에서 병렬형태로 금속선이 배열되어 높은 열용량을 기대한 병렬형 히터 두 가지가 있다(Type 3, Type 4). 그림 3은 위의 변수들을 고려하여 본 연구에서 제안한 4가지 구조를 가진 마이크로히터의 COMSOL 시뮬레이션 결과이다. 쿼츠 기판위에 Pt를 이용하여 다양한 구조의 히터를 설계하였으며 그 위에 Si_3N_4 가 $1.5\mu\text{m}$ 위치시켰다. 배경의 매질은 공기이며 주변의 온도는 상온으로 설정되었다. 외부로부터 전압/전류가 인가

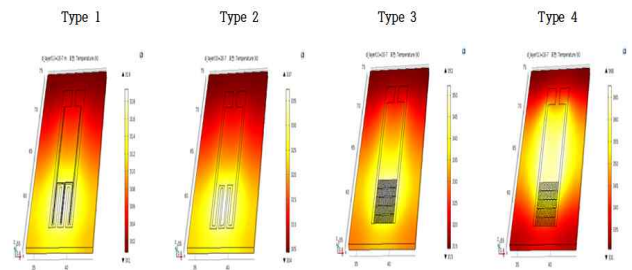


그림 3 COMSOL 시뮬레이션을 이용한 마이크로히터 최적 설계 및 표면 열전달 분포도

Fig. 3 Optimal design of microheater using COMSOL simulation and distribution of surface heat transfer

되었으며 시뮬레이션 상으로 단일 금속선으로 구성된 1번 히터는 동일전압에 가장 낮은 열효율을 보였으며, 병렬형 구조를 가진 3번 히터가 약 350°C의 가장 높은 온도 및 고른 열안정성을 띠는 것으로 확인되었다. 특히 3번 구조에서 인가전압에 따라 동작온도가 표면 위에 일정하게 유지되었으며, 동일한 전력에서 최고 도달온도를 얻을 수 있었다. 시뮬레이션 결과는 실험결과와 비교되었으며 뒷장에서 언급한 바와 같이 3번 구조에서 안정한 히터 성능이 관찰되었다.

3. 제작 및 측정 셋업

3.1 마이크로히터 및 온도센서 제작

소자의 제작은 그림 4와 같이 리소그래피를 이용하여 패턴을 형성하였다. 먼저 포토레지스트를 쿼츠 웨이퍼 상에 스핀코팅한 후, UV 얼라이너를 이용하여 표면에 마이크로히터의 패턴을 형성한다. 형성된 패턴위에 E-beam evaporator를 이용하여 Pt/Ti 박막을 증착한 후 리프트 오프 과정을 거쳐 패턴을 형성한다. 절연층을 형성하기 위해서는 PECVD 방식을 이용하여 Si₃N₄를 웨이퍼 상부 전체에 증착하였다. 절연층이 형성된 웨이퍼 위에 표면온도를 측정하기 위한 온도센서를 마이크로히터의 패턴형성과

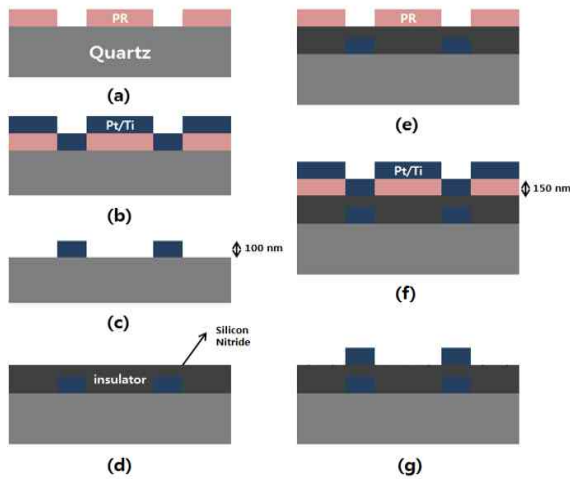


그림 4 마이크로히터 및 온도센서 제작과정. (a) PR 패턴닝, (b) 백금/티타늄 금속 증착, (c) 리프트 오프 과정을 통한 마이크로히터 패턴 완성, (d) PECVD를 이용한 Si₃N₄ 절연층 증착, (e) 표면 온도 측정을 위한 온도센서 패턴, (f) 온도센서용 금속 증착, (g) 완성된 센서

Fig. 4 Micro heater and temperature sensor fabrication process. (a) PR patterning, (b) platinum/titanium metal deposition, (c) completion of the microheater pattern through lift off process, (d) deposition of Si₃N₄ insulating layer using PECVD, (f) metal deposition for temperature sensor, and (g) completed device

동일한 방식으로 형성한다. 마지막으로 Reactive Ion Etching (RIE) 시스템을 이용하여 절연층에 덮힌 마이크로 히터의 전극 부분을 드라이 에칭하여 표면이 드러나게 한다. 이와 같이 제작이 끝난 후 다이싱 컷을 통해 각각의 샘플로 제작하였으며, 각 전극의 패드를 Au 와이어 본딩을 이용하여 PCB 기판에 패키징 하였다.

3.2 테스트 과정

와이어 본딩으로 연결된 PCB 기판에 납땀을 하여 구리선을 연결하고 마이크로히터는 DC 서플라이에, 온도센서는 I/V 미터에 연결한다(그림 5). I/V 미터에서는 히터의 가열에 따른 온도의 변화를 확인하기 위하여 온도센서의 저항변화를 측정하며 1mV의 셋업 전압을 인가해준다. 히터에 전압을 가하지 않은 상태로 I/V 미터를 작동시켜 초기 저항을 확인하고 DC 서플라이를 구동하여 시간에 따른 온도상승과 최고 도달 온도를 확인할 수 있게 하였다.



그림 5 항온항습 챔버내 온도센서 측정 및 마이크로 히터 측정 셋업

Fig. 5 Temperature sensor placed in constant temperature and humidity chamber and micro-heater measurement setup

4. 결 과

4.1 제작된 마이크로히터 및 온도센서

그림 6은 본 실험에서 제작한 마이크로히터와 Si₃N₄ 절연층 위 표면층에 가해지는 온도를 확인하기 위한 온도센서가 집적된 소자의 측정 사진이다. 표면에 일정한 열을 가하기 위해 1.5μm 두께의 절연층을 패턴 전체를 덮을 수 있게 형성하였다. 상부의 온도센서는 백금을 이용한 저항형 온도 감지기 (RTD) 형식 센서로 제작되었다.

4.2 온도센서 측정 결과

그림 7은 상부 표면의 온도센서와 수직 단면도를 SEM으로 촬영한 사진이다. 표면의 온도를 확인하기 위한 백금 온도센서는 온도의 변화에 따라 선형적으로 저항이 변화하며 그 변화량은 백

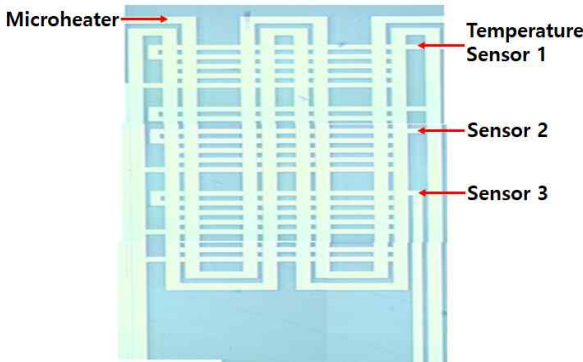


그림 6 완성된 소자의 표면 광학 사진
Fig. 6 Optical view of the completed device

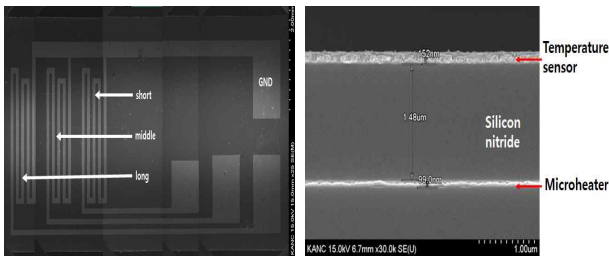


그림 7 상부의 온도센서 SEM 및 마이크로히터 및 온도센서를 포함한 단면도
Fig. 7 SEM view of upper temperature sensor and cross-sectional view of microheater and temperature sensor

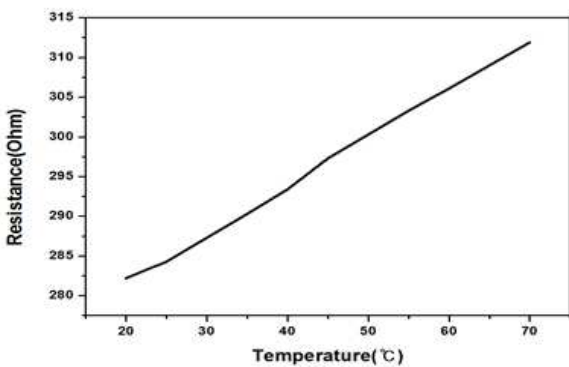


그림 8 온도에 따른 표면 온도센서의 저항 변화
Fig. 8 Variation of resistance of surface temperature sensor in terms of applied temperature

금 자체의 온도 계수와 초기저항에 의해 결정된다. 따라서 마이크로히터의 가열효과를 정확하게 확인하기 위해서는 먼저 표면에 증착된 온도센서의 선형성을 먼저 확인해두어야 한다. 따라서 온도센서에 저항미터를 연결하고 항온 항습 챔버 시스템을 이용해 온도를 변화시키며 시간에 따른 온도 변화를 관측한다. 그림 8은

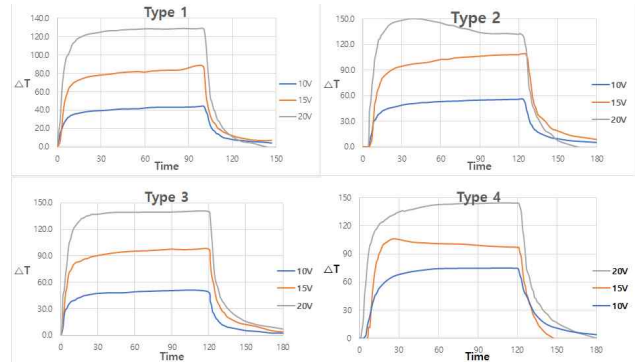


그림 9 히터에 인가된 전압에 따른 마이크로히터의 표면온도 변화 추이
Fig. 9 Changes of the surface temperature of the microheater in terms of the voltages applied to the heater

온도의 변화에 따른 센서의 저항변화를 나타낸 그래프이다. 상온에서 온도센서의 초기저항은 282.2Ω으로 측정되었다. 그림을 보면 50°C의 온도가 변화할 때 저항의 변화는 약 30Ω 변화였으며 1°C당 0.6Ω의 변화가 있는 것을 알 수 있다. 선형성을 계산해보면 오차율 0.01% 정도이며 온도센서가 충분히 선형성을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

4.3 인가전압에 따른 마이크로히터 열생성 분석

줄 발열의 원리에 따라서 금속 히터는 전류의 제곱에 비례해 열에너지가 생성된다. 인가된 전압의 크기에 따라 표면에 가해지는 열에너지가 변화한다. 구조가 다른 히터들에 각 10, 15, 20V의 직류 전압을 인가한 후 측정된 표면온도를 그림 9로 정리하였다. 타입 1을 보면 단일 금속선으로 이루어진 히터가 가장 낮은 열효율을 보인다. 온도 상승시간은 최대온도의 90%에 도달하는데 약 2초의 짧은 특성을 보이지만 패턴의 금속의 질량이 가장 적고 따라서 열을 담을 수 있는 양이 적기 때문에 낮은 효율을 가지게 된다. 타입 2는 1의 구조의 단점을 보완하기 위해 빠르게 열에너지가 충전되는 금속선을 주위에 배치해 온도 상승속도를 높이고 최대 도달 온도 역시 더 높은 효율을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 발산되는 열에너지가 절연층 위의 수직인 표면 방향으로만 전달되는 것이 아니고 모든 방향으로 퍼지기 때문에 빠르게 온도를 상승시키면서도 동시에 축매역할을 하는 금속선의 열 역시 전달되며 더 높은 열에너지가 표면에 머무를 수 있기 때문이다. 하지만 빠른 열에너지 상승으로 인해서 전압이 인가되고 온도가 상승될 때 안정화되는 시간이 오래 걸렸다. 타입 3, 4는 각 병렬 저항의 크기가 다른 금속선의 배열을 하였고, 병렬연결로 인한 각각의 금속선에 열 충전이 일어나 높은 최고 온도를 유지하였고, 또한 3번 구조는 4번 구조에 비해 병렬선의 저항이 높아 각 금속선당 줄 발열이 더 빠르게 일어났다. 인가전압이 상승함에 따라 최대 도달 온도가 안정적으로 지속됨을 확인할 수 있었으며, 안정적이면서 높은 열전달을 하는 3번 구조의 히터가 가장 이상적인 센서 구조라는 것을 확인할 수 있다.

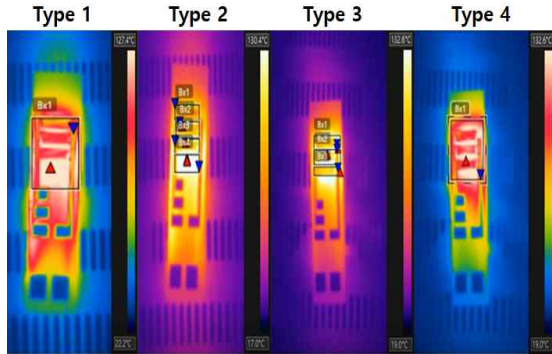


그림 10 제작된 히터에 전압인가에 따른 표면 온도 분포도
Fig. 10 Infrared temperature distribution in terms of the voltage applied to the heater

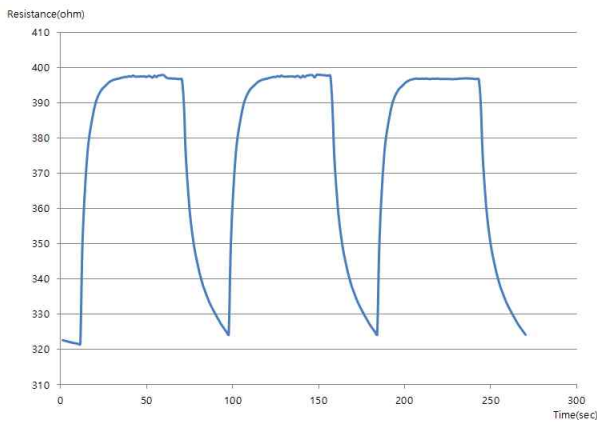


그림 11 타입 3 마이크로히터의 반복성 결과
Fig. 11 Repeatability results of type 3 microheater

4.4 포화영역에서 안정화 및 구역에 따른 온도 분포 분석

마이크로히터에 전압을 인가한 상태에서 적외선 온도 측정기를 통해 히터 표면에서의 온도를 관찰하였다. 그림 10의 적외선 측정결과에서 볼 수 있듯이 표면에서 고르게 열에너지가 동작영역에 전달되고 계산된 표면온도와 거의 동일한 측정값을 보임을 확인하였다. 온도센서의 저항변화로 계산된 표면온도와 실제값이 일치한지 확인하였다. 제작된 타입 3번의 마이크로 히터에 동일한 전압을 여러 번 반복적으로 인가해주면서 동일 시간 동일 저항특성을 보이는지 확인해보았다(그림 11). 거의 오차 없이 상승 시간과 최대온도가 일정함을 볼 수 있다. 또한 그림 12는 타입 3 번의 마이크로히터 동작영역 표면에서 위치에 따른 열에너지 전달 정도를 확인하기 위해 3개의 영역에 존재하는 온도 센서에 동일하게 5V의 입력전압을 가한 후 감지한 온도변화를 확인하였다. 3개의 온도센서는 그라운드를 공유하며 각자의 초기저항이 조금씩 다르다. 하지만 온도계수가 동일하며 초기저항을 고려해 저항의 변화를 확인해보면 각 표면 당 전달되는 온도의 차이는

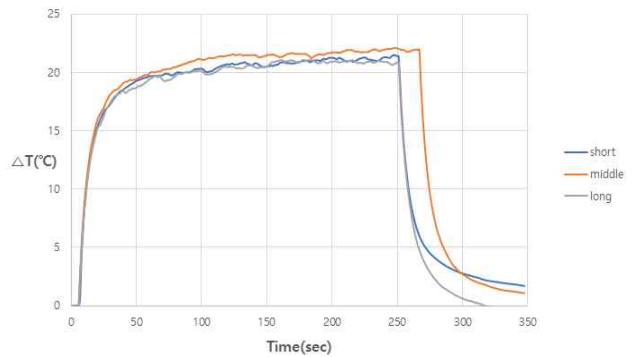


그림 12 타입 3 마이크로히터 표면위에서 위치에 따른 열 전달 비교 결과
Fig. 12 Temperature variations on surface depending on positions of type 3 microheater

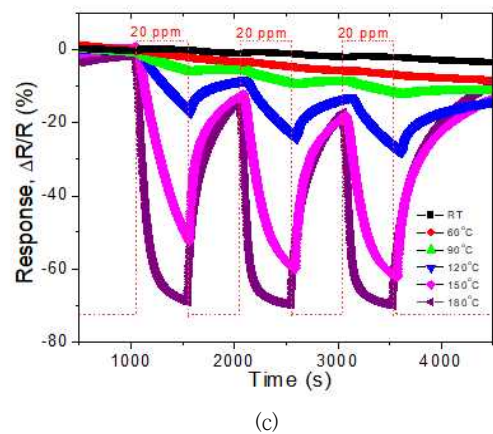
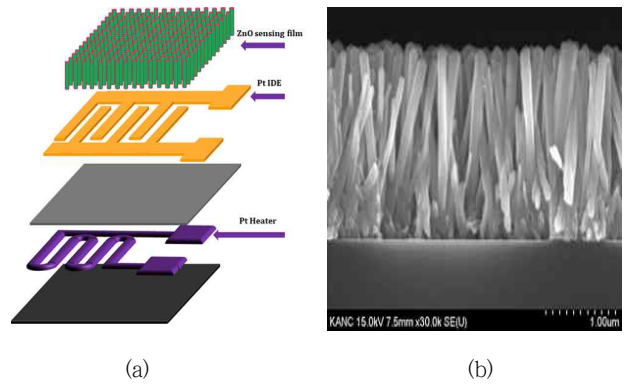


그림 13 (a) 마이크로 히터를 집적한 C₂H₂ 가스센서 도식도, (b) Pt:ZnO nanorod 기반의 제작된 센서, (c) 마이크로히터를 이용한 온도에 따른 가스 반응도
Fig. 13 (a) Schematic of microheater integrated with C₂H₂ sensor (b) fabricated Pt : ZnO nanorod-based sensor, and (c) temperature dependence of sensor performance

1°C 이내라는 것을 확인할 수 있다.

4.5 마이크로히터를 C₂H₂ 센서 성능 향상에 응용

구조 3의 마이크로히터에서 10, 15, 20V를 인가하였을 때 50, 95, 141°C의 온도 증가를 이뤘으며, 가장 안정적이고 전압에 따른 온도 증가가 최적화되었음을 알 수 있다. 제작된 구조 3 마이크로 히터위에 C₂H₂ 센서가 제작되었다(그림 13). 이미 측정된 마이크로 히터의 저장된 데이터를 이용하여 히터에 전압이 인가 되었으며 온도가 안정된 상태에서 C₂H₂ 가스센서의 반응정도를 관찰하였다. 전압은 5~25V 사이에서 인가되었으며 다양한 센서 표면온도를 형성시켰다. 그림 13은 온도에 따른 C₂H₂ 센서의 반응률을 보인다. 온도에 따라 반응률이 큰 차이가 있었으며 180°C에서 최적화된 온도를 얻을 수 있었다. 결론적으로 본 논문에서 제작된 마이크로 히터의 성능은 인가 전압에 따라 선형성을 지닌 온도변화가 절연체 표면에서 관찰되었으며 이를 이용하여 가스센서 성능 및 선택성 향상에 크게 기여할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 매질의 영향 없이 표면에 효율적인 열에너지를 전달하기 위한 마이크로히터를 소개하였다. 여러 가지 구조를 통해 열안정성과 열효율을 최적화하였으며, 절연층 위에서 안정적인 열 공급이 가능하게 하였다. 마이크로히터가 절연층 표면에 전달하는 열을 확인하기 위해 동작영역을 세 구역으로 나누고 백금 온도센서를 형성하여 히터에서 발생한 열을 확인하기 위해 온도센서의 저항 변화를 확인하였다. 온도센서의 정확성을 검증하기 위해 항온 챔버에서 저항-온도 변화의 선형성을 확인하였다. 네 가지의 구조를 가진 마이크로히터에 각각 일정한 전압들을 인가하여 온도의 변화를 측정하였다. 그 결과 구조 3의 마이크로히터에서 10, 15, 20V를 인가하였을 때 50, 95, 141°C의 온도 증가를 이뤘으며, 가장 안정적이고 전압에 따른 온도 증가가 최적화되었음을 알 수 있다. 표면의 각 구역에서 동일한 온도가 형성되는지 확인하기 위해 온도센서들의 저항변화를 비교했으며 1°C 이하의 온도 차이를 보이는 것을 확인하였으며 동작영역에서 고르게 열에너지가 전달됨을 적외선 열 측정을 통해 다시 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 한국 에너지기술평가원 지원(과제번호 20172220200110)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] A. Ahmed, J. Dennis, M. Khir, and M. Mohamad Saad, "Design and Characterization of Embedded Microheater on CMOS-MEMS Resonator for Application in Mass-Sensitive Gas Sensors," 5th International Conf. on Intelligent and Advanced Systems, 2014.
- [2] Q. Zhoua, A. Sussmana, J. Chang, J. Dong, A. Zettl, and W. Mickelson, "Fast Response Integrated MEMS Microheaters for Ultra Low Power Gas Detection," *Sensors and Actuators A*, vol. 223, pp. 67-75, March 2015.
- [3] G. Chung, "The Fabrication of Micro-Heaters with Low-Power Consumption Using SOI and Trench Structures," *Metals and Materials International*, vol. 8, pp. 347-351, 2002.
- [4] W. Hwang, K. Shin, J. Roh, D. Lee, and S. Choa, "Development of Micro-Heaters with Optimized Temperature Compensation Design for Gas Sensors," *Sensors*, vol. 11, pp. 2580-2591, March 2011.
- [5] W. Chang and Y. Hsihe, "Multilayer Microheater Based on Glass Substrate Using MEMS Technology," *Micro-electronic Engineering*, vol. 149, pp. 25-30, January 2016.
- [6] C. Lee, C. Chiang, Y. Wang, and R. Ma, "A Self-heating Gas Sensor with Integrated NiO Thin-film for Formaldehyde Detection," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 122, pp. 503-510, March 2007.
- [7] M. Aslam, C. Gregory, J. Hatfield, "Polyimide Membrane for Micro-heated Gas Sensor Array", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 103, pp. 153-157, September 2004.
- [8] O. Gregory and Q. Luo, "A Self-compensated Ceramic Strain Gage for Use at Elevated Temperatures," *Sensors and Actuators A*, vol. 88, pp. 234-240, January 2001.
- [9] J. Kang, J. Park, K. Park, J. Shin, E. Lee, S. Noh, and H. Lee, "Temperature Control of Micro Heater Using Pt Thin Film Temperature Sensor Embedded in Micro Gas Sensor," *Micro and Nano Systems Letters*, vol. 5:26, September 2017.
- [10] W. Sripumkhai, A. Lekwichai, W. Bunjongpru, S. Porntheeraphat, B. Tunhoo, E. Ratanadomphisut, T. Kamsri, C. Hruanun, A. Poyai, and J. Nukeaw, "On-Chip Platinum Micro-Heater with Platinum Temperature Sensor for a Fully Integrated Disposable PCR Module," *Advanced Materials Research*, vol. 93-94, pp. 129-132, 2010.

저 자 소 개



임 운 현 (Lim, Woonhyun)

학사 아주대학교 전자공학과 석사 아주대학교 전자공학과, 현 아주대학교 전자공학과 박사과정, 연구분야 초음파, 가스센서



Vijay Kondalkar

박사 Shivaji University Chemistry
현 아주대학교 전자공학과 박사 후 연구원
연구분야 CH 센서, 자기센서, 전류/전압 센서, Supercapacitor



이 기 근 (Lee, Keekeun)

박사 Arizona State University (2000) 석사 University of Florida (1993)
현 아주대학교 전자공학과 교수 (2004~)
연구분야 Surface Acoustic Wave (SAW), DGA Transformer Sensor, Wireless Underground Sensor, Acoustic-optic (AO) Holographic Display, Ultrasound