



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

고온 환경에서 열팽창을 이용한 마이크로
외팔보 온도센서 연구

2016년 8월

부 산 대 학 교 대 학 원

수송기기하이테크소재부품

소 순 호

공 학 석 사 학 위 논 문

고온 환경에서 열팽창을 이용한 마이크로 외팔보 온도센서 연구

지도교수 고정상

2016년 8월

부산대학교 대학원

수송기기하이테크소재부품

소 순 호

소순호의 공학 석사 학위논문을 인준함

2016년 6월 30일



위원장 최 윤 석 인

위 원 김 광 석 인

위 원 고 정 상 인

목 차

Nomenclature	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	2
제 2 장 온도 센서 소재 선정	4
2.1 상용 순 니켈 소재 선정 이유	4
2.2 상용 순 니켈 도금높이	5
제 3 장 열팽창을 이용한 온도 측정 원리	7
3.1 금속 열팽창 이론	7
3.2 측정 원리	8
3.3 전산 해석	9
제 4 장 온도 센서 제작	11
4.1 포토 마스크 제작	11
4.1.1 온도 센서 배열 설계	12
4.2 온도 센서 제작 공정	13

4.2.1 제작 결과	14
제 5 장 온도 센서 성능 평가	15
5.1 전기로를 이용한 온도 센서 성능 평가	15
5.1.1 전기로를 이용한 온도 센서 성능 평가 결과 ...	16
5.2 원거리 현미경을 이용한 온도 센서 성능 평가	17
5.2.1 원거리 현미경을 이용한 온도 센서 성능 평가 결과	17
제 6 장 고 찰	19
6.1 고온용 온도 센서 제조 공정 고찰	19
제 7 장 결 론	21
참고 문헌	22
표	23
그림	31
Abstract	55

List of Tables

Table 1 Chemical composition of alloy Ni ^[11]

Table 2 Properties of pure Ni

Table 3 Prismatic beam conditions for the equations of deflection curve

Table 4 Equation calculation result of deflection curve with Ni plating height

Table 5 Performance evaluation in furnace (type – 1)

Table 6 Performance evaluation in furnace (type – 2)

Table 7 Real-Time performance evaluation (type – 1)

Table 8 Real-Time performance evaluation (type – 2)

List of Figures

Fig. 1 K-type thermocouple temperature measurement range $-200 - 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 Thermochromic Liquid Crystal & Indicating Sticks ^[1]

Fig. 3 Nickel-plated height of $20\text{ }\mu\text{m}$ temperature sensor bent at $750\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 4 Latching structural of temperature sensor ^[1]

Fig. 5 Two types of temperature sensor (type – 1, type – 2) ^[5]

Fig. 6 Microstructure of annealed pure nickel ^[11]

Fig. 7 Concept of thermal expansion

Fig. 8 Temperature distribution analysis of temperature sensor

Fig. 9 Internal structure of temperature sensor

Fig. 10 Latching cantilever array to type – 1 temperature sensor

Fig. 11 Latching cantilever array to type – 2 temperature sensor

Fig. 12 Fabrication mechanism of temperature sensor

Fig. 13 Fabrication result of temperature sensor array on the Si wafer

Fig. 14 Experimental setup for temperature sensor using furnace

Fig. 15 Temperature test of a single sensor in furnace

Fig. 16 Temperature sensor test in furnace with quartz plate load

Fig. 17 Results of furnace test type – 1

Fig. 18 Results of furnace test type – 2

Fig. 19 Results of furnace test type – 2

Fig. 20 Experimental setup of real-time Measurement

Fig. 21 Results of real-time test type – 1

Fig. 22 Results of real-time test type – 2

Fig. 23 Crack of substrate and delamination of sensor

Fig. 24 Temperature sensor increases nonlinearly

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

최근 전 세계적으로 산업화가 활발하게 일어나면서 센서 및 센서 기술의 수요는 전반적인 산업 분야에 걸쳐서 높아지고 있으며, 반도체 기술 및 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술을 이용하여 성능이 우수하며 소형, 초경량 센서를 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

특히 자동차, 항공기, 선박, 가스터빈 수송기기 등에서 안전성을 높이고 성능을 향상 시키기 위해 고온에서 연구가 진행되는 분야가 증가하고 있다.^[1] 자동차, 항공기 엔진이 지속적으로 가열되어 고온에 노출되어 있을 경우 심한 소음과 함께 연비에 악영향을 미칠 수 있으며, 안전성에도 심각한 문제를 야기 시킬 수 있다. 이와 같은 고온 열 시스템에서 효율을 증가 시키고, 시스템 안정성을 높이기 위해서는 시스템 내부의 온도를 정확히 측정할 수 있어야 한다.^[2]

현재 고온에서 온도를 측정하는 대표적인 방법으로는 Fig. 1에서 보는 바와 같이, 측정부위에 직접 열전대(Thermocouple)를 부착하여 측정하는 방법이 있다. 하지만 이와 같은 방법은 항공기 터빈구조나 회전하는 시스템에서는 전선 연결 문제로 인해 설치가 힘들고 오히려 내부적으로 더 복잡해 질 수 있는 단점이 있다. 또 다른 방법으로는 Fig.

2에서 보는 바와 같이, 온도에 따라 색이 변하여 측정이 되는 감온성 액정(Thermochromic Liquid Crystal) 또는 온도 지시 스틱(Indicating Stick)이 사용되고 있다. 이 경우 측정 가능한 온도가 500 ℃로 한계가 있고, 목표 온도인 700 ℃ 이상에서 온도 측정이 불가능 하며, 온도 분해능이 낮아 정확한 온도가 측정이 사실상 불가능 하다.^[1] 따라서 본 연구에서는 기존에 사용되고 있는 온도측정 방법의 단점을 보완하고 고온 열 시스템 내부에서 소형 온도 센서를 개발하여 고온에서 정확한 온도 측정을 할 수 있는 기술에 대한 연구를 수행하고자 한다. 또한 온도 센서는 열팽창 현상을 이용한 센서로서 구조가 비교적 간단하며, 고온에서 온도를 측정할 수 있는 초소형 센서이며, 별도의 전원공급 없이도 작동이 가능하고 대량생산이 용이하다는 장점이 있다.

1.2 연구 목적

기존 실리콘으로 제작한 온도 센서는 공정과정이 단순하지만 열팽창 계수가 낮아 가시적으로 관측하기가 힘들다는 단점이 있었으며^[1], 20 μm 높이로 제작된 니켈 구조물에선 Fig. 3에서 보는 바와 같이, 고온에서 휘어지는 현상이 심하게 나타난 것을 확인 할 수 있다.

본 연구에서는 고온에서 온도를 측정할 때 전선의 연결 설치 문제 및 온도 측정범위 정확도의 한계를 보완하기 위해 금속 열팽창을 이용해 온도가 증가함에 따라 길이가 늘어나는 온도 센서를 제작하고자 한다. 마이크로 단위의 니켈 구조물을 제작 하기 위해, MEMS 제조 공정

기술로 제작하였다. 온도가 증가함에 따라 외팔보 형태인 니켈 구조물 길이가 선형적으로 팽창, 구조물 처짐 현상이 발생하는 것에 대한 전산 해석을 수행 하면서 온도 센서의 제작 가능성을 확인하고 이를 바탕으로 제작하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이, 목표한 온도에 도달 하면 체결(Latching)을 통해 온도를 측정할 수 있도록 설계를 하였다. 체결을 통한 형상 구현은 Fig. 5에서 보는 바와 같이, 두 가지 형상의 온도 센서를 제작하였다.

본 연구에서 제작하는 온도 센서의 목표 온도는 $600 - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 설계를 하였다.

제 2 장 온도 센서 소재 선정

2.1 상용 순 니켈 소재 선정 이유

금속 열팽창 현상을 이용하여 고온에서의 온도 센서를 제작하고 그 성능을 측정 하기 위해서는 온도가 증가함에 따라 구조물 형상이 유지되어야 한다. 온도 센서 제작에 사용된 니켈은 상용 순수 니켈(Ni 200) 이다. 상용 순수 니켈은 Table 1에서 정리된 바와 같이, 화학조성을 나타내었다. 대표적인 용도로는 전기, 전자부품, 우주선 및 미사일 구성 재료, 부식제 처리장치와 파이프 등 다양한 곳에서 이용 된다.^[3] 어닐링한 상용 순 니켈(Ni 200)의 미세조직은 Fig. 6에서 보는 바와 같이^[11], 전형적인 고용체 조직이다.^[2] 상용 순 니켈(Ni 200)은 기계적 성질이 좋으며 여러 환경에서의 내식성이 우수하다. 이 합금은 고온에서도 강도가 유지되며 저온에서도 인성과 연성이 뛰어나다. 니켈의 용융점은 1400 ℃로 목표 온도보다 높으므로 성능 측정 시 형상 변화에도 문제가 되지 않는다. 그리고 초소형 구조물 제작 방법인 MEMS를 통해 공정이 가능하며 복잡한 구조물 에서도 균일하게 도금이 가능하다. 본 연구에서 사용한 상용 순 니켈의 물성치는 Table 2에서 정리된 바와 같다.

2.2 상용 순 니켈 도금높이

니켈 도금 높이를 20 μm 로 제작한 균일 단면 외팔보 구조물 성능평가를 수행 했을 때 도금 높이가 상대적으로 낮아 공정과정 중 파손되는 구조물들이 많이 발생 하여 처음에 목표했던 형상을 구현하기가 어려웠다. 그리고 고온에서 성능평가 수행 시 대부분의 구조물들이 휘어지는 현상과 한쪽 방향으로 기울어지는 현상이 발생하였다. 이는 도금의 높이가 상대적으로 낮아 고온에서 니켈 구조물이 예상했던 응력의 범위 보다 많이 노출되어 발생한 현상이라고 보여지며, 다른 이유로는 균일 단면 외팔보에 하중이 작용하면 변형이 일어나게 되고, 보의 길이 방향의 축은 곡선으로 변형된다.^[4] 이러한 현상을 방지하고자 균일 단면 외팔보 구조물의 처짐 정도를 확인 하기 위해 처짐 곡선의 방정식을 이용하였다. 단순 하중에서의 처짐 방정식은 수식 2.1에 나타내었다. 처짐 곡선의 방정식을 이용 하여 제작을 하였을 때 상온에서 얼마큼 균일 단면 외팔보의 처짐 정도를 이론적으로 확인 하였다. 제작하고자 하는 온도 센서는 고온에서 성능평가를 진행하고 목표 하는 온도가 600 - 1000 $^{\circ}\text{C}$ 이므로 고온에서 도금 높이에 따라 균일 단면 외팔보 구조물의 처짐 정도의 변화를 예측 하기 위해 이론적으로 계산 하였으며, 온도에 따른 처짐 곡선의 방정식 수식 2.2에 나타내었다. 처짐 곡선의 방정식을 적용하기 위한 균일 단면 외팔보의 필요한 조건은 Table 3에서 정리된 바와 같다.

$$\begin{aligned}\theta_B = -v'(L) &= \frac{qL^3}{6EI} + \frac{\alpha(T_t - T_b)L}{d} \\ \delta_B = -v(L) &= \frac{qL^4}{8EI} + \frac{\alpha(T_t - T_b)L^2}{2d}\end{aligned}\tag{2.1}$$

$$\begin{aligned}\theta_B &= \frac{\alpha(T_t - T_b)L}{d} \\ \delta_B &= \frac{\alpha(T_t - T_b)L^2}{2d}\end{aligned}\tag{2.2}$$

처짐 곡선의 방정식을 이용해 니켈 도금 높이 변화에 따른 이론적으로 계산한 결과는 Table 4에서 정리된 바와 같다. 도금 높이가 150 μm 일 때 다른 높이에 비해 처짐 정도가 감소하는 것을 확인 할 수 있었으며, 도금높이가 너무 높아지면 센서 제작 과정에 어려움이 있다. 성능 평가 수행 시 외팔보 구조물이 휘어지거나 파손되는 현상이 나타나지 않을 정도의 결과 값으로 확인 하였다. 최종적으로 니켈 도금 높이 150 μm 로 선정하였으며, 처짐 각도 θ 는 $2.14 \times 10^{-6}^\circ$, 처짐 길이 δ 는 8.23×10^{-6} mm 값을 확인 할 수 있었다.

제 3 장 열팽창을 이용한 온도 측정 원리

3.1 금속 열팽창 이론

금속 열팽창 이론은 실생활에서도 쉽게 발견할 수 있다. 몇 가지의 예를 들면 다리의 이음새 부분에 틈을 만들어 온도 변화에 의해 다리가 뒤틀리는 현상을 방지하는 역할을 한다. 또 다른 예로는 바이메탈을 들 수 있다. 열팽창 정도가 다른 두 금속을 붙여놓은 것이다. 온도가 높아지면 열팽창 정도가 작은 금속 쪽으로 휘고, 온도가 낮아지면 열팽창 정도가 큰 금속 쪽으로 휜다. 바이메탈이 휘어지면, 전원이 차단되어 전류가 더는 흐르지 않는다. 전자기구가 과열되면 바이메탈이 휘어져 전원이 차단되므로 전기기구를 안전하게 사용할 수 있다. 바이메탈은 전기기구가 계속 가열되는 것을 막아 전열기와 같은 전기기구의 온도를 적정 온도로 일정하게 유지한다.

금속 열팽창 이론의 원리는 물질의 온도가 변하게 되면 부피가 변하게 되며, 그 원리는 Fig. 7에서 보는 바와 같이, 물체에 열을 가하면 분자들의 운동이 활발해져 분자들 사이의 간격이 멀어지기 때문이다. 금속과 같은 고체는 부피 변화율 보다는 보통 길이 변화율로 표현되며 열팽창계수는 이러한 길이 변화율을 나타내는 값이다. 길이 변화율은 온도 변화량에 비례하게 된다. 즉, 온도 증가와 길이가 길수록 길이 변화량이 크다. 온도가 1 °C 변화할 때 재료의 단위길이당 길이의 변화이다. 고체의 길이가 온도에 따라 변화하는 것을 말한다.

3.2 측정 원리

열팽창계수는 온도가 1 °C 올라갔을 때 길이의 변화량을 전체길이로 나눈 값으로 온도가 0 °C, T_1 °C, T_2 °C일 때의 길이가 각각 L_0 , L_1 , L_2 라 가정하면 열팽창계수 α 는 수식 3.1에 나타내었으며, 온도가 증가함에 따라 늘어나는 길이 ΔL 은 수식 3.2에 나타내었다.

$$\alpha = \frac{1}{L(T_0)} \cdot \frac{L_2(T_2) - L_1(T_1)}{T_2 - T_1} = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (3.1)$$

L_0 : 시편의 초기 길이

ΔL : 시편의 길이 변화

ΔT : 시편의 온도 변화

α : 금속 열팽창계수

$$\therefore \Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

금속은 열을 받게 되면 분자 사이의 간격이 넓어 지면서 길이가 팽창하지만 열을 받지 않는 상황에서는 분자 사이의 간격이 다시 좁아지면서 수축하는 현상을 확인 할 수 있다. 이와 같은 현상을 방지하기 위해 금속이 수축해도 기존에 측정된 온도를 확인 할 수 있도록 본래의 형상을 유지하는 결착형 디자인을 구현 하였다. 화살표 형상의 온도 센서가 결쇠형상 구조물에

결착이 되어 금속 구조물이 수축 하게 되더라도 결착된 구조물이 제자리로 돌아갈 수 없도록 한다. 따라서 이러한 열팽창 성질을 이용하여 외팔보 구조물의 늘어나는 길이에 따라 고온 열 시스템 내부의 온도를 측정할 수 있다.

3.3 전산 해석

여러 가지 설계 변수를 설정하고, 설계 변수의 변화에 따른 외팔보 구조물의 현상을 고찰 하기 위해 상용 구조해석 및 열 해석 툴인 ANSYS-Workbench 모듈을 통해 전산 해석을 수행 하였다. 고온에서 외팔보 구조물이 선형적으로 늘어나는 것을 확인 하였고, 상용 순 니켈의 물성치는 Table 2에서 정리된 바와 같다. 초기길이 5 mm, 열팽창 계수 $13.0 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$, 온도는 상온 22°C 를 제외한 578°C 로 설정하여 전산 해석을 수행 하였다. 처짐 곡선의 방정식으로 얻어진 열팽창 길이는 $37.57 \mu\text{m}$ 전산해석을 통해 얻은 길이는 $37.45 \mu\text{m}$ 로 동일하게 길이가 팽창하는 것을 확인 할 수 있었다.

니켈 금속이 선형적으로 길이가 늘어나는 것을 확인하고 온도에 따라 균일 단면 외팔보 구조물의 처짐 정도가 이론 값과 일치하는지에 대한 전산해석을 수행하였다. 전산해석 수행 시 입력 값은 Table 3과 동일하다. 처짐 곡선의 방정식을 이용해 계산 했을 때 처짐 각도 θ 는 2.14×10^{-6} 였고, 전산해석 결과 처짐 각도 θ 는 2.1787×10^{-6} 로 결과 값이 동일한 것으로 확인 하였으며, 처짐 길이 δ 역시 $8.23 \times 10^{-6} \text{ mm}$ 로 동일했다.

성능평가 진행 시 금속 구조물의 온도분포가 균일하게 전도 되는 것을 확인 하기 위해 열 전달 해석을 수행 하였다. 카본 단열챔버 내부와 동일한 크기(30mm × 20mm × 20mm)로 모델링 하였고, 상온(22 ℃)에서 목표 온도(600 ℃)까지 온도를 증가 하면서 해석을 수행 하였다. 그 결과 금속 구조물의 온도 분포는 599.81 – 600 ℃까지 온도 균일하게 분포되는 것을 확인 하였으며, Fig. 8에서 보는 바와 같다.



제 4 장 온도 센서 제작

4.1 포토 마스크 제작

온도 센서 제작을 위해 두 장의 마스크를 설계 및 제작하였다. 온도 센서 형상 패턴은 상용 프로그램인 오토 캐드(Auto-CAD)를 사용하였다. 6인치 실리콘 웨이퍼를 사용 하였으며, 두 가지 형상(Type - 1, Type - 2)의 온도 센서를 제작 하였다. 첫 번째 필름 마스크에서 공중에 떠 있는 외팔보 구조물을 구현하기 40 μm 높이로 니켈도금을 통해 가장자리에 기둥 부분을 제작 하였으며, Type - 2의 형상을 구현 하기 위해 같은 높이로 중심부에 크로스 형태의 기둥을 같이 구현 하였다. 두 번째 온도 센서 형상의 정확도를 높이기 위해 크롬 마스크를 사용 하였으며, 110 μm 높이 니켈 구조물과 중심부 크로스 기둥을 제작 하였다. 온도 센서의 니켈 도금 높이는 총 150 μm 로 제작 하였다. 외팔보 구조물을 정확하게 구현하기 위해서는 두 마스크의 정렬이 중요하다. 따라서 마스크의 정확한 정렬을 위해 정렬마크를 이용 하였다.

150 μm 이상의 패턴을 형성하기 위해, 액상의 일반적인 PR(Photo Resist)로는 구하기가 어려워서 구현이 어려웠다. 대신 필름형태의 감광성 레지스트 (DFR = Dry Film Resist)를 이용하여, 패턴을 구현하였다. 필름형태라고 해서, 150 μm 이상의 두께를 가진 것은 아니다. 적층형 필름을 도포해서 사용하는 것이 액상에 비해 용이하므로, 필름을 두 매

(112 μm 1매 + 56 μm 1매)로 적층 해서 구현 하였다. 필름은 액상처리 스펀코팅 후 Laminating System(라미네이터)를 이용해 필름과 웨이퍼를 고무 Roll을 이용하여 압착시키는 방식으로 진행 하였다. 이후 일반 액상 PR과 같이, 마스크를 놓고 노광 후 현상시키는 작업을 하였다.

4.1.1 온도 센서 배열 설계

측정하고자 하는 공간적인 부분을 최소화 시키기 위해 온도 센서의 면적은 100 mm^2 ($10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$)의 크기로 제작 하였다. Fig. 9에서 보는 바와 같이, $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 의 센서 안 폭이 0.5 mm 인 테두리를 설계하였다. 첫 번째 온도 센서 형상은 외팔보 구조물이 서로 같이 마주보는 한 쌍의 구조물을 구현하였으며, 총 열 쌍이 배열 되도록 설계 하였다. 화살표 형상의 외팔보 구조물 길이는 $4.9 \times 10^3\ \mu\text{m}$ 로 설계 하였으며, 각 센서당 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 온도 분해능을 가지고 있으며 $600 - 960\text{ }^\circ\text{C}$ 까지 온도 측정 할 수 있도록 설계 하였다. 열팽창 이론을 바탕으로 한 계산 결과 기준은 최초 외팔보 구조물 사이의 간격은 Fig. 10에서 보는 바와 같이, 85.1 μm 이고, 5.4 μm 씩 길이 간격을 증가시켜 마지막 외팔보 구조물 사이의 간격은 133.7 μm 가 되도록 설계 하였다. 두 번째 온도 센서 형상은 면당 1개 총 4개의 외팔보 구조물을 설계 하였다. 최초 외팔보 구조물 사이의 간격은 Fig. 11에서 보는 바와 같이, 49.1 μm 이고, 7 μm 씩 길이 간격을 증가 시켜 마지막 외팔보 구조물 사이의 간격은 70.1 μm 가 되도록 설계 하였다. 각 센서당 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 온도 분해능을 가지

고 있으며 700 - 1000 °C에서 온도를 측정할 수 있도록 설계 하였다.

4.2 온도 센서 제작 공정

온도 센서는 MEMS 기술을 이용하여 제작하였다. 공정 순서는 Fig. 12과 같다.

- A. 두께 675 μm , 6인치 Si웨이퍼 표면에 존재하는 불순물들(필름, 개별 입자 혹은 입자 덩어리, 흡착된 가스, 이온, 분자 등)을 제거하기 위해 과산화수소(H_2O_2) 용액을 이용한 화학적 습식 방법을 진행 했다. $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{DI Water} = 1 : 5 : 1$ 의 혼합물 속에서 5분 동안 ($T=70\text{ }^\circ\text{C}$) 가열했다.
- B. 웨이퍼 수분 증발을 위해 80 °C 건조용 오븐에 10분동안 증기건조를 시켰다.
- C. 밀착력을 우수하게 만들어주는 Adhesion Layer를 제작하였다. Seed Metal Sputter (Ti / Cu, 50nm / 500nm) 비율로 진행 하였으며, Ti(티타늄)은 Si-wafer 와 Cu 간의 Cu 는 전기도금의 성장을 원활하기 진행하기 위한, 낮은 저항을 가진 Metal이다.
- D. 준비된 웨이퍼에 감광제(THB-126N, JSR)를 1000 RPM으로 20 초간 회전시켜 고르게 코팅 후 100 °C에서 5분간 열처리를 하였다. 감광제가 코팅되어 있는 웨이퍼 위에 마스크를 배치하고 300 mJ 전면 노광 후 120 °C에서 5분간 열처리를 하였다. 몰딩 부분에 Cu 도금 작업을 진행 후 감광액을 제거하였으며, 감광액이 제거된 웨

이퍼 전면에 Ni E-plating을 진행하였다.

E. Ni 높이는 CMP (Chemical Mechanical Polishing) 과정을 통해 불필요하게 형성된 박막을 제거하면서 원하고자 하는 Ni 도금 높이로 제작하였다. 위와 같은 공정을 통해 1단계 기둥부분 40 μm , 2단계 외팔보 구조물 150 μm 공정을 진행하였다.

F. 앞선 공정 완료 후 SC1 (Standard Cleaning) 용액을 이용하여 30초간 50회 반복하여 습식 식각 진행 하였다. 이 방법은 구리만 선택적으로 식각이 가능하며 Cu가 잔류할 경우 기포가 발생 되지만 충분한 시간을 통해 기포가 발생되지 않을 때까지 식각을 진행 하였으며, 이를 통해 Ni을 제외한 나머지 Cu 도금을 모두 제거할 수 있었다.

4.2.1 제작 결과

앞서 기술한 공정 순서와 조건에 따라 온도 센서 제작을 수행하였으며 Fig. 13에서 보는 바와 같이, 6인치 실리콘 웨이퍼에 40개의 센서를 제작 하였다. 제작 완료 후 현미경을 통해 관측한 결과 너비가 상대적으로 얇은 결재 부분에서 파손이 일어난 센서들도 발견이 되었다. 중심부에 위치한 센서는 균일한 높이로 도금이 된 것을 확인 할 수 있었지만 가장자리에 위치한 센서는 니켈도금 높이가 5 - 10 μm 정도의 오차를 보이는 것을 확인 하였다.

제 5 장 온도 센서 성능 평가

본 연구에서는 고온에서 외팔보 구조물의 결착 현상을 통해 온도를 측정하고자 한다. 따라서 온도를 측정할 수 있는 범위가 넓고 사용자가 온도를 제어할 수 있는 전기로를 통해 성능 평가를 수행 하였으며, 또 한가지 방법으로 온도가 증가함에 따라 센서가 팽창하는 것을 실시간으로 관측할 수 있는 원거리 현미경을 통해 성능을 평가 하였다.

5.1 전기로를 이용한 온도 센서 성능평가

디지털 온도 센서 고온 측정 성능을 평가하기 위해 목표 온도 600 - 1000 °C 에서 진행 하였으며, 필요한 장비구성으로는 전기로(FPX-27), 세라믹 플레이트(5T) 쿼츠 플레이트(5T), K-type 열전대, 데이터 수집보드(Agilent-34410A)로 Fig. 14 과 같이 구성하였다. 정확한 성능 평가를 위해 K-type 열전대와 데이터 수집보드를 통해 전기로 내부의 온도를 3방향(상, 중, 하)으로 K-type 열전대를 설치하여 측정 하였다. 800 °C 기준으로 전기로 내부의 온도 센서와 데이터 수집보드를 통해 측정 한 최대 온도 차는 4 - 7 °C로 나타났으며, K-type 열전대가 3 - 8 %의 오차를 가지므로 전기로의 온도 센서를 신뢰하고 성능평가를 진행 하였다. Fig. 15에서 보는 바와 같이, 전기로 내부 바닥에 세라믹 플레이트 위치 시킨 후 플레이트 위에 온도 센서를 위치 시켰다. 또 한가지 방법으로 휘어짐

현상을 방지하고자 Fig. 16에서 보는 바와 같이, 퀴즈 플레이트(5T)를 온도 센서 위에 적층 하여 성능 평가를 진행 하였다. 상온 22 ℃에서 목표 온도 960 ℃까지 5시간에 걸쳐서 온도를 증가시켰으며, 목표 온도에 도달 후 12시간에 걸쳐 상온 22 ℃까지 천천히 냉각 시킨 후 현미경(Olympus-MX51)을 통해 확인 하였다.

5.1.1 전기로를 이용한 온도 센서 성능평가 결과

목표했던 온도 600 - 1000 ℃에서 성능 평가 후 관측 결과 Fig. 17에서 보는 바와 같이, 휘어지는 현상은 발생하지 않았다. 첫 번째 형상 온도 센서에서 기존 예상했던 팽창 길이는 5.4 μm 였으나, 0.3 μm 정도의 오차범위를 가지고 선형적으로 늘어나는 것을 확인 하였으며, Table 5에서 정리된 바와 같다. 중간중간 비선형적으로 늘어나는 센서도 발견 할 수 있었다. 두 번째 형상 온도 센서 역시 예상했던 팽창길이는 7 μm 였으나, 0.4 μm 정도의 오차범위가 발생 하였으며, Table 6에서 정리된 바와 같다. Fig. 18에서 보는 바와 같이, 화살표 형상의 온도센서가 결괴 구조물에 결합이 되는 온도 센서도 확인 하였으나, 대부분 온도 센서가 Fig. 19에서 보는 바와 같이, 한쪽 방향으로 치우치는 것을 확인 할 수 있었다. 퀴즈 플레이트를 적층 시킨 온도 센서는 0.5 - 1 μm 팽창길이만 증가 했을 뿐 특이한 점을 발견하지는 못했다.

5.2 원거리 현미경을 이용한 온도 센서 성능평가

디지털 온도 센서의 목표 온도 600 - 1000 °C에서 변화를 실시간 관측을 하려고 했으나 카트리지 히터의 온도 한계로 인해 850 °C까지 성능 평가를 진행 하였다. 필요한 장비구성으로는 원거리 현미경(KH-7700, Hirox), 카본 단열챔버, 단열재(세라크 울), 변압기(Slice AC-1K), 쿼츠 플레이트(5T), 카트리지히터(MHK9.42-38.1-V120-W75)로 Fig. 20에서 보는 바와 같이 구성하였다. 고온으로 갈수록 증기가 발생하면서 떨림 현상이 발생하게 되는데 이를 방지하기 위해 1200 °C까지 견딜 수 있는 탄소 단열 섬유와 세라크 울을 이용해 히터를 고정 하였다. 카트리지 히터는 최고온도 850 °C까지 올라가는 것을 디지털 멀티미터를 통해 확인 하였다. 220V 전압을 변압기를 통해 30분 동안 천천히 온도를 상승시키면서 실시간으로 디지털 온도 센서의 변화 하는 것을 관측 하였다.

5.2.1 원거리 현미경을 이용한 온도 센서 성능평가 결과

카트리지 히터를 통해 관측 할 수 있는 최고 온도가 850 °C 이므로 그 이상의 온도에서는 관측 할 수가 없었다.

목표했던 온도 600 - 850 °C에서 온도를 서서히 증가시키면서 관측 하였다. 그 결과 첫 번째 형상의 온도 센서는 Fig. 21에서 보는 바와 같이, 목표 온도인 600 °C부터 온도 센서가 팽창하여 결괴부분까지 늘어나는 것을 확인 하였으며, 온도가 증가함에 따라 센서의 길이도 0.5 μm 오차를

가지면서 선형적으로 $5.4\ \mu\text{m}$ 간격으로 팽창 하였으며, Table 7에서 정리된 바와 같다. 다만 공정 중 결석부분 구현에 어려움이 많아 완벽하게 구현되지 않아 결착이 되는 현상은 관측 할 수 없었다. 두 번째 형상의 온도 센서 역시 $700\ ^\circ\text{C}$ 이상에서 $0.5\ \mu\text{m}$ 오차를 가지면서 선형적으로 팽창한 것을 확인 하였으며, Table 8에서 정리된 바와 같다. Fig. 22에서 보는 바와 같이, $700\ ^\circ\text{C}$ 와 $800\ ^\circ\text{C}$ 일 때 온도 센서가 목표했던 중심부 기둥까지 팽창하면서 늘어나는 것을 확인 하였지만, 온도를 가하지 않았을 경우, 니켈로 제작된 온도 센서의 금속 수축으로 인해 다시 줄어드는 현상을 통해 결착이 일어나지는 않았다는 것을 확인 하였다.

제 6 장 고 찰

6.1 고온용 온도 센서 제조 공정 고찰

본 연구에서는 고온용 온도센서를 만들기 위하여 두 가지의 결착 디자인 형상을 제작 하였다. 고온에서 금속이 팽창하여 길이가 선형적으로 팽창함에 따라 온도 측정이 가능한 센서를 제작 하였고, 금속이 다시 수축하는 것을 방지하기 위해 결착형 디자인을 구현 하였다. 하지만 제작 과정 및 성능평가 결과 문제점이 있었다.

첫 번째, 제작 완료 후 Fig. 23에서 보는 바와 같이, 결착이 이루어지는 결쇠 패턴 형상이 완벽하게 구현 되지 않았던 이유는 2차 도금 높이가 지나치게 높은 편이었기 때문에 그것을 구현할 수 있는 PR의 선택에 있어서 제한적일 수 밖에 없었다. 또한 구현 해상력이라고 하는 것이 어느 정도 중횡비에 반비례하는 성향을 보일 수 있기 때문에 크기 부분에서 문제가 발생 한 것으로 확인 되었다. 이와 비슷한 문제로 갈고리의 형상이 파손된 것도 발견 되었다. 원인으로서는 첫 번째 DFR과 도금부가 함께 존재하는 상황에서 CMP 공정 과정 중 폴리싱 패드를 이용하여 면 가공을 진행할 때, 패턴 크기 대비 높이가 높으므로, 면 가공 스트레스에 의해서 떨어졌을 가능성이 크다. 두 번째 1차 도금부(40 μm 영역) 과의 2차 패턴 후 도금 진행 시 상호간의 밀착력 문제가 부분 산화 등으로 인하여 발생했을 수 있다. 패턴이 큰 영역들은 밀착이 잘 되었으나, 긴 결쇠 부분은

얇고 길게 제작을 하였으므로, 밀착력이 부족한 채로 도금이 되었을 가능성이 크다. 이 경우에는 CMP 가공을 이겨내지 못하고 떨어진 것으로 확인 되었다.

두 번째 Fig. 24에서 보는 바와 같이, 고온에서 성능평가 진행했을 당시 비 선형적으로 외팔보 구조물이 팽창하는 현상을 확인 할 수 있었다. 도금 높이를 확인한 결과 중심부에 위치한 센서들은 균일하게 니켈 도금이 된 것을 확인 할 수 있었지만 가장자리에 위치한 센서는 니켈도금 높이가 균일하지 않았다. 그 이유는 전해도금은 같은 시간으로 도금 했을 경우 위치별로 비슷한 부피만큼의 성장을 하는 경향이 있다. 즉 중심부는 그림참조 폭이 좁으므로 도금시간대비 쉽게 도금 높이가 올라오게 되는데, 가장자리 부분은 주변부에 구리 도금되는 영역이 많아 상대적으로 느리게 올라오면서 높이 차가 있는 것으로 확인 되었다.

위와 같은 두 가지의 문제점들의 공통점은 결쇠 형상이 도금 높이에 비해 상대적으로 얇으면서 길다 보니 발생하는 문제점 이다. 이러한 현상들을 방지 하기 위해서는 도금높이에 따른 결쇠 형상의 구현에 대해 추가적인 연구 진행이 필요하다.

제 7 장 결 론

본 연구에서는 고온에서 와이어 연결 없이 정확한 온도 측정을 하기 위한 방법으로 고온용 온도 센서를 제안 하였다. 금속 열팽창 이론을 이용하여 니켈 구조물 제작하는 방법과 곡면에 직접 제작하는 방법을 제시하고, 제작된 센서의 성능 평가를 수행하였다. MEMS 기법을 통해 10 mm × 10 mm 크기로 두 가지 형상의 디지털 온도 센서를 제작하였다.

목표 온도 600 - 1000 °C에서 고온 성능 평가를 진행 하였다. 온도 센서의 외팔보 구조물이 온도가 증가 함에 따라 예상했던 길이만큼 결쇠 부분 까지 선형적으로 늘어나는 것을 확인 하였고, 구부러짐 현상도 나타나지 않았다. 두 번째 형상에서 결착이 되는 온도 센서도 발견 하였지만, 대부분 결착은 이루어 지지 않았다. 그 이유로는 도금높이는 높지만 결쇠부분의 형상이 얇고 길게 디자인이 되어 수치해석으로 얻어진 선 폭 너비만큼 구현이 되지 않았던 것이 가장 큰 문제점으로 나타났다.

향후 연구 결과를 향상 시키기 위해 처짐 곡선의 방정식과 전산해석을 통해 결쇠 형상을 완벽하게 구현 할 수 있는 도금높이를 도출 하는 연구가 진행 된다면 처음에 목표했던 고온에서 효과적으로 온도 측정이 가능 할 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] 박형욱, 2013, “열팽창을 이용한 디지털 온도 지시기 연구”, 부산대학교 부산캠퍼스 제1도서관, PP. 17-18
- [2] Yunhwa Hong, Young-Jun Lee, Chongdu Cho, Kyungshik Lee, 2015, “Development of a MEMS Multi-functional(Pressure, Flow rate, Temperature) Sensor for Monitoring of Pipes used in High Pressure”, The Korean Society of Mechanical Engineers, vol. 1, pp. 285-286
- [3] Chung-Yun Kang, 2012, “Trend on Research TLP Bonding of Ni and Ni Base Superalloy for High Temperature Heat Exchanger”, Journal of The Korean Welding & Joining Society, vol. 30, pp. 21-26
- [4] Park Soo-Young, Kim Heung-Youl, Hong Kap-Pyo, 2010, “Analytical Study on the Fire Resistance of the Asymmetric H-section Slimflor Beam Concerning the Thickness of the Web”, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction vol. 26, pp. 61-68
- [5] Hao-Long Zhou, Yue-Biao Zhang, Jie-Peng Zhang & Xiao-Ming Chen, 2015, “Supramolecular-Jack-Like Guest in Ultramicroporous Crystal for Exceptional Thermal Expansion Behaviour”, Nature Communications 6, Article number 6917
- [6] 윤동현, 이광석, 정중은, 장영원, 이정환, 2011, “저열팽창 $\text{Ni}_{\text{x}}\text{Fe}_{100-\text{x}}$ ($\text{x}=36, 40, 44$) 합금의 고온 변형 거동”, 한국소성가공학회, PP. 216-219
- [7] Kuo-Yu Lee, Jung-Tang Huang, Hou-Jun Hsu, Ching-Kong Chen, and Ting- Chiang Tsai, 2010, “Fabrication technology of CMOS-MEMS Probe

- Chip Compatible with Electroless Nickel Plating Process”, 5th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), No.1, pp. 1-4
- [8] Bing Pan, DafangWu, ZhaoyangWang and Yong Xia, 2010, “High-Temperature Digital Image Correlation Method for Full-Field Deformation Measurement at 1200°C”, Meas. Sci. Technol, vol. 22, pp. 015701 (11)
- [9] Jae-Sung Park, Deuk-Sung Choi, Mi-Mok Kim, 2013, “High Temperature Silicon Pressure Sensor of SDB Structure”, Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, vol.50, pp. 305-310
- [10] Hyuk-Jae Kwon, Young-Deog Kim, Kyung-Il Lee, Dong-Su Kim, Young-Tae Lee, 2012, “Development of a Dynamic Pressure Sensor Equipped with High-temperature Cable for Gas Turbines”, The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 1167-1168
- [11] William F. Smith, “Structure and Properties of Engineering Alloys”, University of Central Florida, Mc Graw Hill

Table 1 Chemical composition of alloy Ni ^[11]

Ni alloy no. 200	
Element symbol	Elemental content (%)
Ni	99.5 ^a
Cu	0.13
Mn	0.2
Fe	0.2
Si	0.2
C	0.08

^a Including a Co

Table 2 Properties of pure Ni

Name	Value
Density at 20 °C (g/cm ³)	8.9
Melting point (°C)	1440
Specific heat at 20 °C (J/g K)	0.47
Thermal conductivity at 20 °C (W/m K)	69
Average linear thermal expansion coefficient (100 °C 10 ⁻⁶ /K)	13
Thermal EMF against copper at 20 °C (μV/K)	-23
Young's modulus (GPa)	200

Physical characteristics (Reference value)

Name	Value
Tensile strength (MPa)	Elongation ($L_0 = 100\text{mm}$) % at nominal diameter in mm (0.02 to 0.063)
450	≈ 10

Strength properties at 20 °C in annealed condition

Table 3 Prismatic beam conditions for equations of deflection curve

Name	Value
Width (m)	0.00025
Height (m)	0.00015
Length (m)	0.0049
Moment of inertia (m^4)	7.03125×10^{-17}
Mass (Kg)	1.60411×10^{-05}
Gravity (Kg/sec^2)	9.8
Top of temperature ($^{\circ}C$)	600
Bottom of temperature ($^{\circ}C$)	595

Table 4 Equation calculation result of deflection curve
with Ni plating height

Ni plating height (m)	Angle (θ)	Length (δ)
0.00002	1.63 e^{-2}	4.62 e^{-9}
0.00005	6.52 e^{-3}	7.4 e^{-10}
0.0001	3.26 e^{-3}	1.85 e^{-10}
0.00015	2.17 e^{-3}	8.23 e^{-11}
0.0002	1.63 e^{-3}	4.64 e^{-11}
0.00025	1.3 e^{-3}	2.98 e^{-11}
0.0003	1.09 e^{-3}	2.08 e^{-11}

Table 5 Performance evaluation in furnace (type – 1)

No.	Temperature (°C)	ΔL (μm)	No.	Temperature (°C)	ΔL (μm)
1	600	5.4	6	800	5.5
2	640		7	840	5.4
3	680		8	880	5.2
4	720		9	920	5.6
5	760		10	960	5.7

Table 6 Performance evaluation in furnace (type – 2)

No.	Temperature (°C)	ΔL (μm)	No.	Temperature (°C)	ΔL (μm)
1	700		3	900	6.9
2	800		7.3	4	1000
Furnace temperature error : 4 - 7 °C					

Table 7 Real-Time performance evaluation (type – 1)

No.	Temperature (°C)	ΔL (μm)	No.	Temperature (°C)	ΔL (μm)
1	600		6	800	5.9
2	640	5.4	7	840	5
3	680	5	8	880	
4	720	5.2	9	920	
5	760	5.8	10	960	

Table 8 Real-Time performance evaluation (type – 2)

No.	Temperature (°C)	ΔL (μm)	No.	Temperature (°C)	ΔL (μm)
1	700	6.8	3	900	6.5
2	800		4	1000	
Cartridge heater temperature error : 7 - 10 °C					

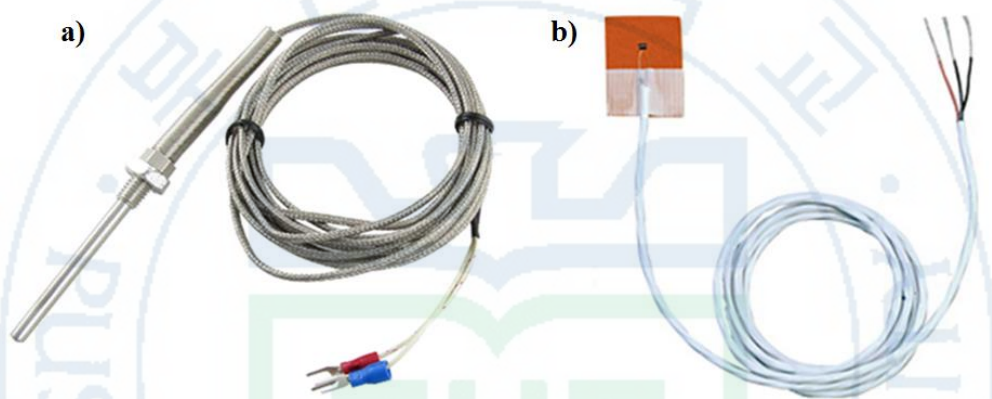


Fig. 1 K-type thermocouple & Contact sensor

- a) Thermocouple or RTD type temp range $-200 - 1,400\text{ }^{\circ}\text{C}$
- b) Contact sensor is temperature range $-60 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fig. 2 Thermochromic liquid crystal & Indicating sticks ^[1]

Difficulty in measuring accurate temperature & Low resolution at high temperature

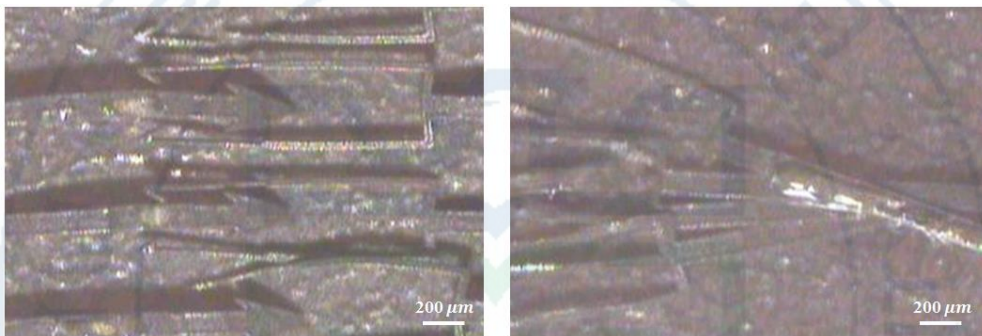


Fig. 3 Nickel-plating height of 20 μm temperature sensor bent at 750 $^{\circ}C$

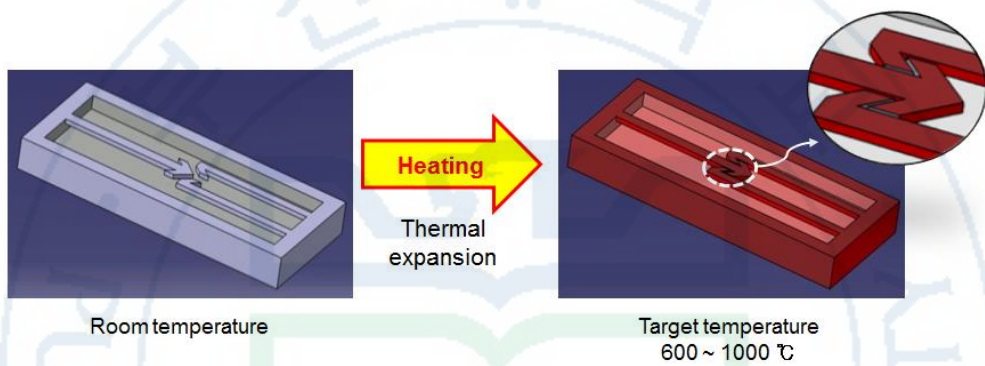
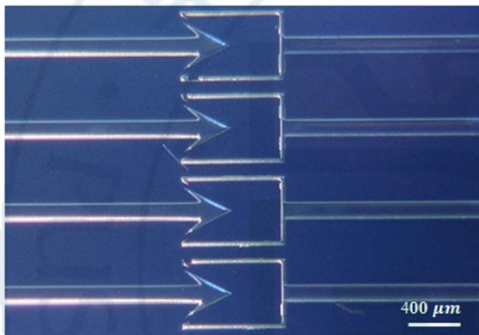


Fig. 4 Latching structural of temperature sensor ^[1]

a) Type - 1



b) Type - 2

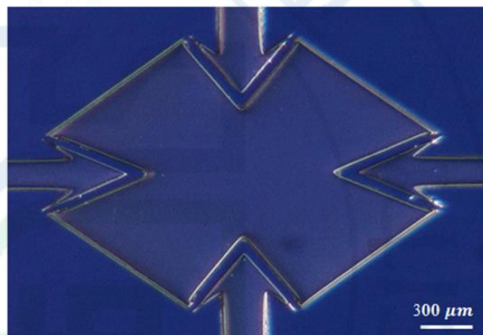


Fig. 5 Two types of temperature sensor

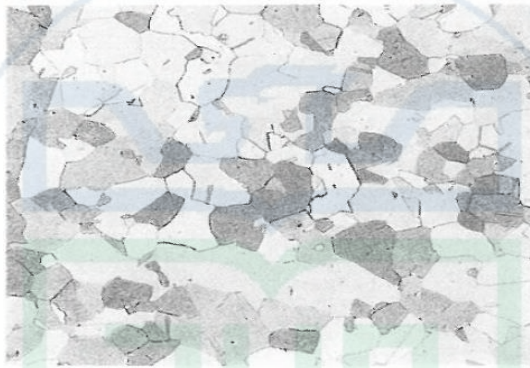


Fig. 6 Microstructure of annealed pure nickel ^[11]

Cold drawing and also continuous annealing at 82 °C. Microstructure is a solid solution.

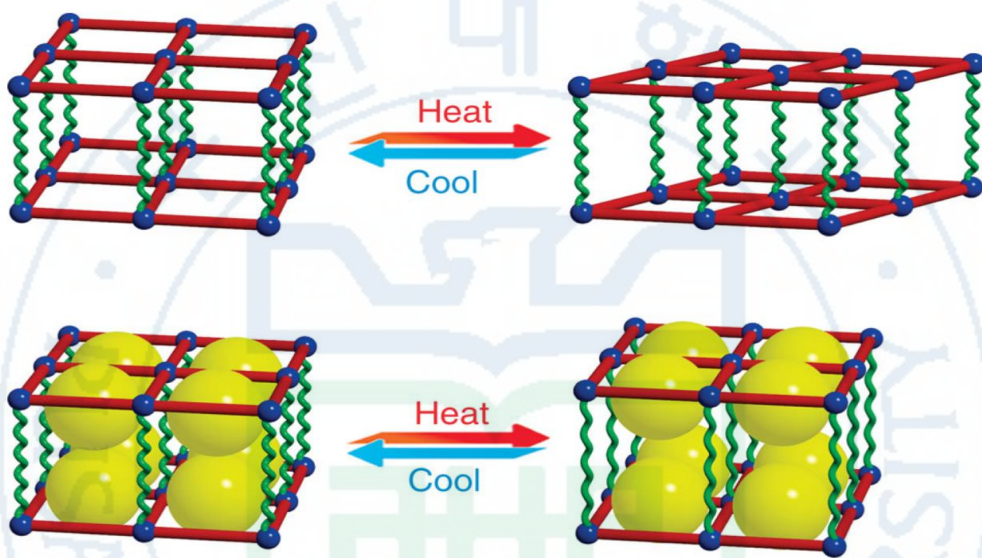


Fig. 7 Concept of thermal expansion ^[5]



Fig. 8 Temperature distribution analysis of temperature sensor

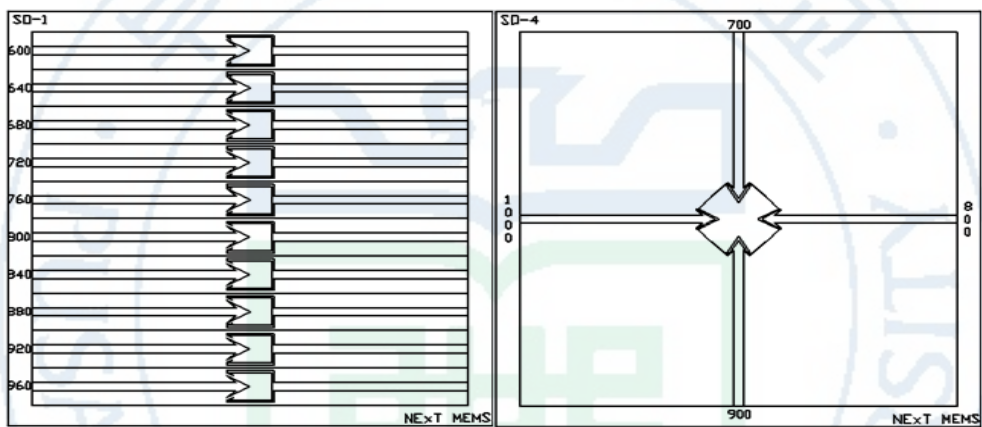


Fig. 9 Internal structure of temperature sensor

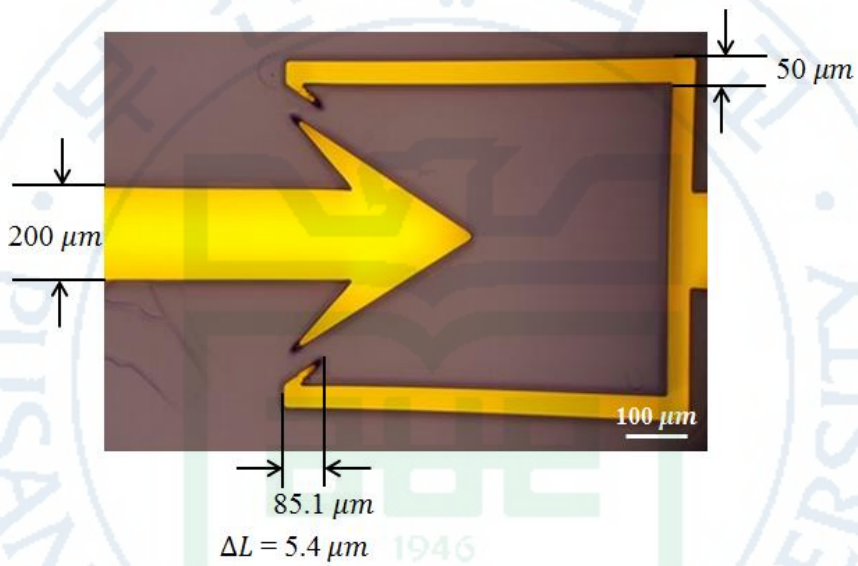


Fig. 10 Latching cantilever array to Type-1 temperature sensor

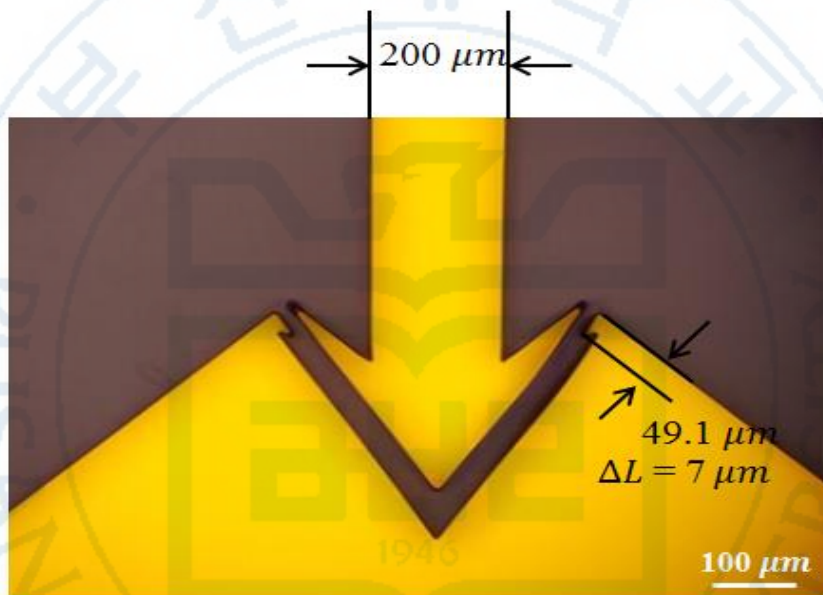
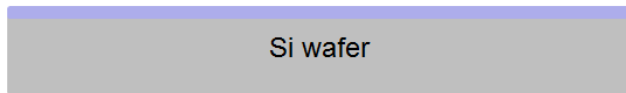


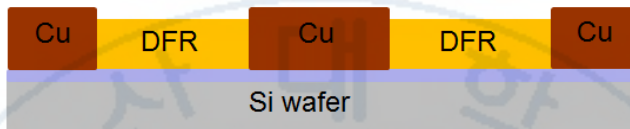
Fig. 11 Latching cantilever array to Type-2 temperature sensor

a) Adhesion layer

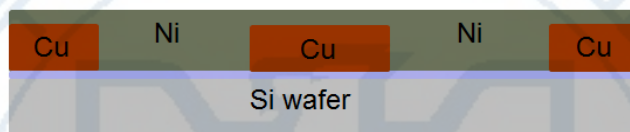
↓ Ti(50 nm) / Cu(500 nm) seed layer sputtering



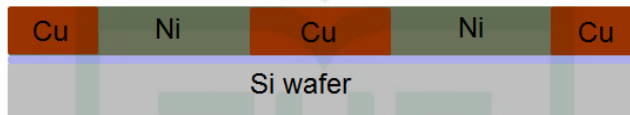
b) DFR (Dry Film Resist 56 μm) & Cu plating



c) DFR removing & Ni plating (50 μm)



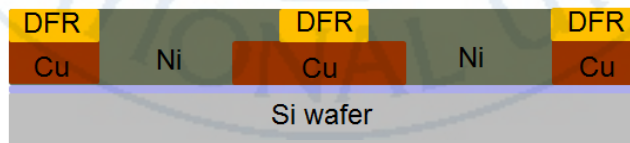
d) CMP (Chemical Mechanical Polishing 40 μm)



e) DFR (112 μm) & Ni plating (120 μm)



f) CMP (110 μm)



g) DFR & Cu removing

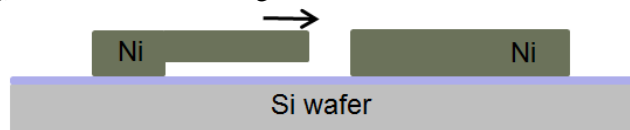


Fig. 12 Fabrication mechanism of temperature sensor

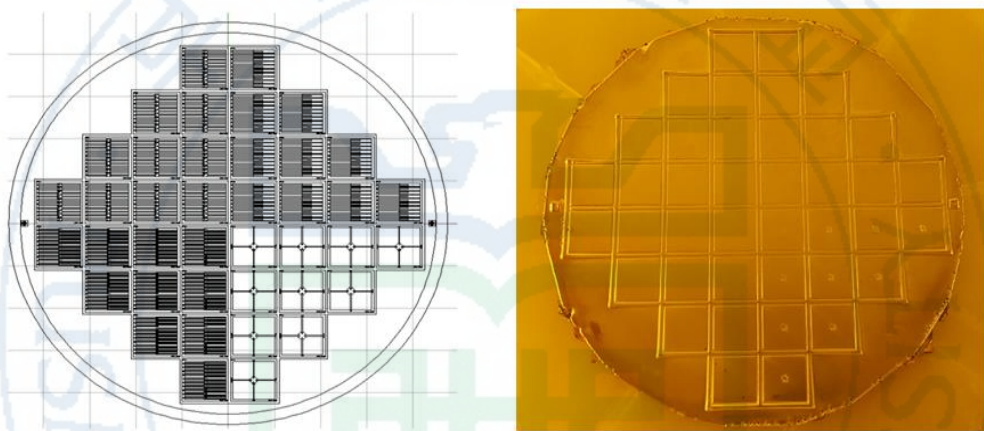


Fig. 13 Fabrication result of temperature sensor array on the Si wafer

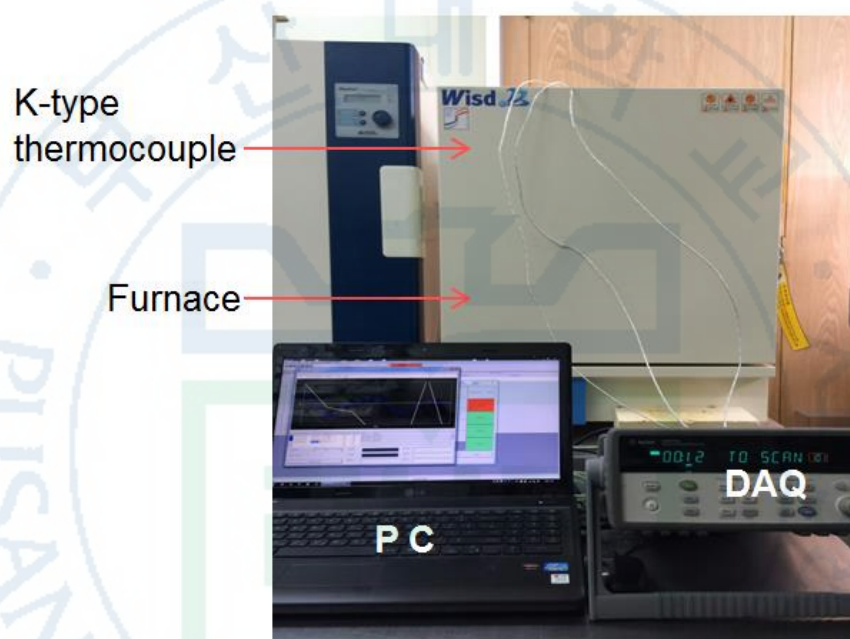


Fig. 14 Experimental Setup of Measurement in Furnace

Furnace test : Performing temperature 600 – 1000 °C

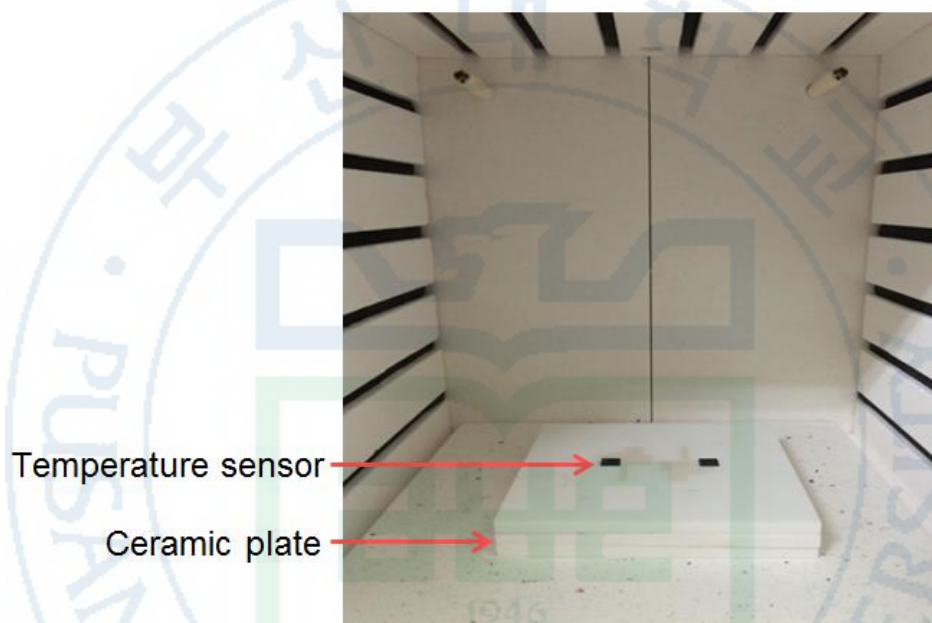


Fig. 15 Temperature test of a single sensor in furnace

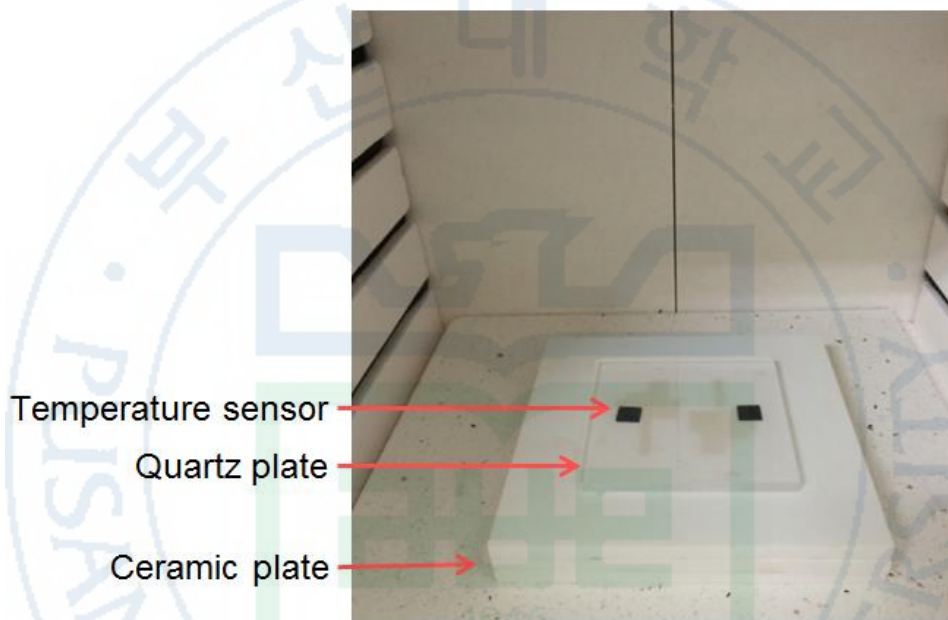


Fig. 16 Temperature measurement setup with quartz plate load

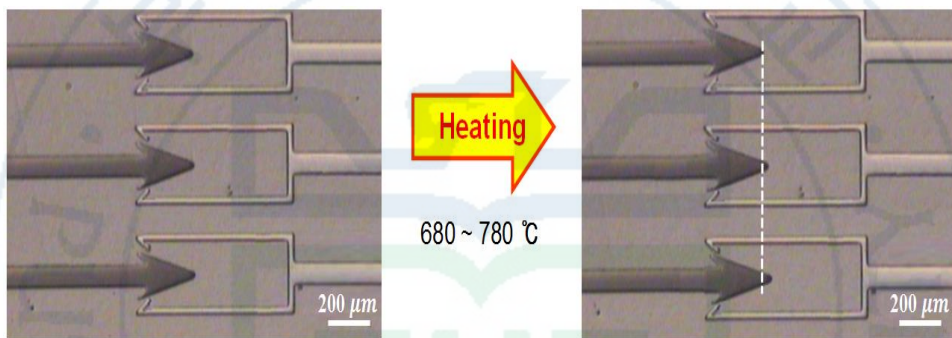


Fig. 17 Results of furnace test type – 1

The length of the temperature sensor is to confirm that expansion linearly

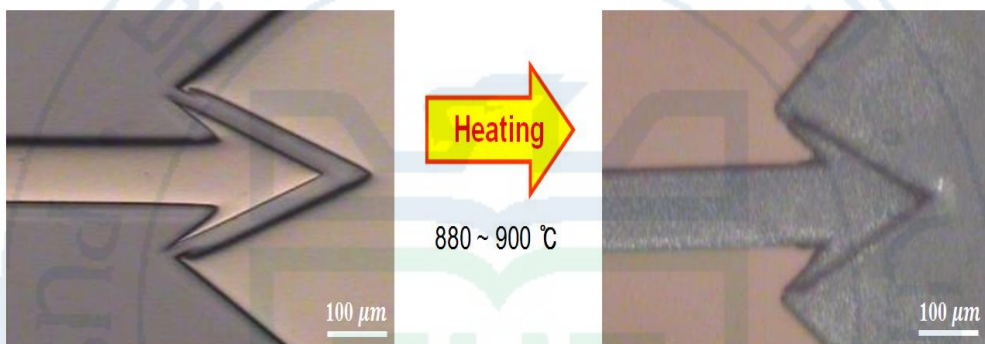


Fig. 18 Results of furnace test type – 2

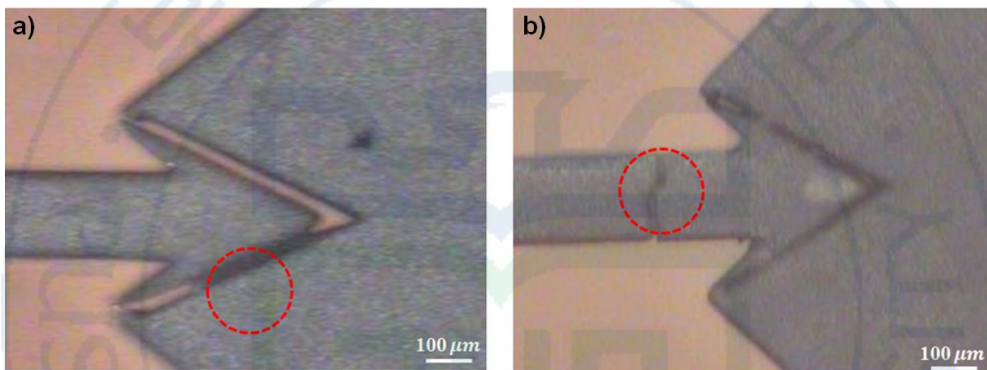


Fig. 19 Results of furnace test type – 2

- a) The temperature sensor is to one side declination
- b) Temperature sensor damaged at high temperatures (850 °C)

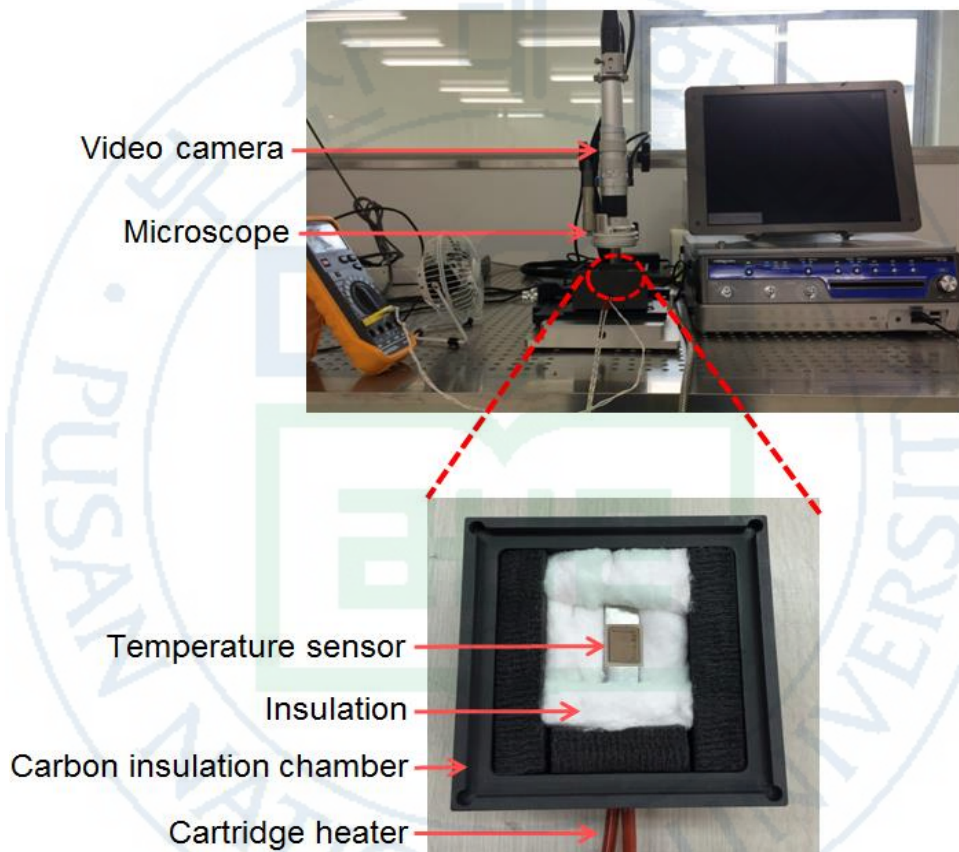


Fig. 20 Experimental setup of real-time measurement

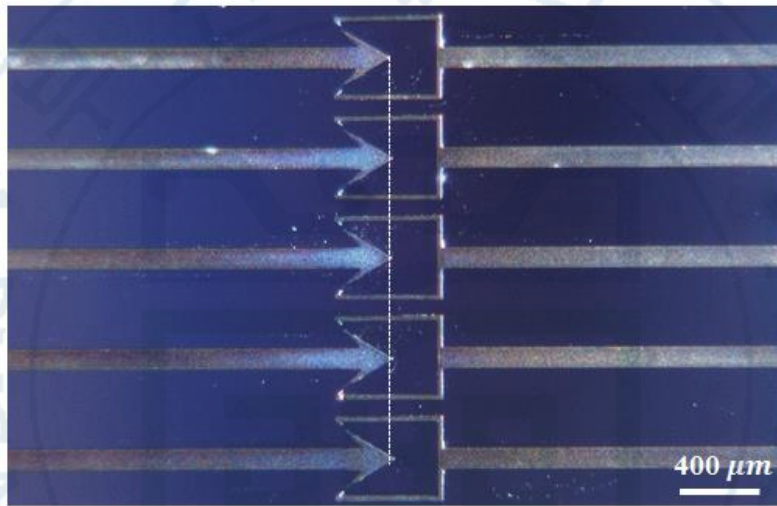


Fig. 21 Results of real-time test type – 1

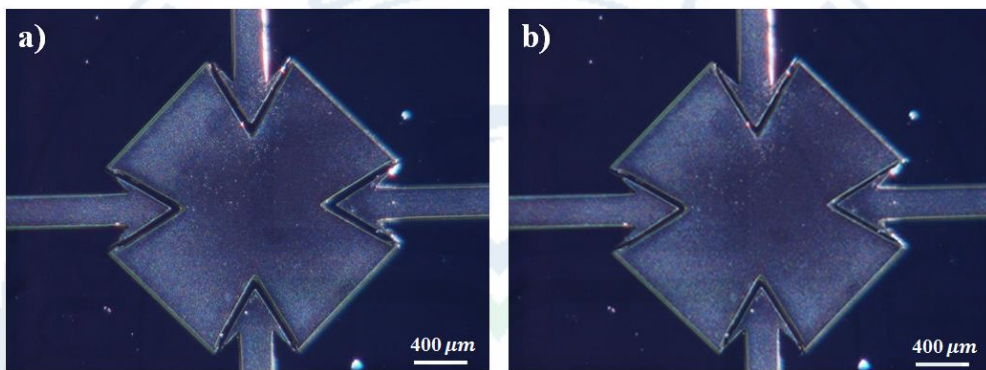


Fig. 22 Results of real-time test type – 2

- a) The temperature sensor(case – 2) in the case of 700 °C
- b) The temperature sensor(case – 2) in the case of 800 °C

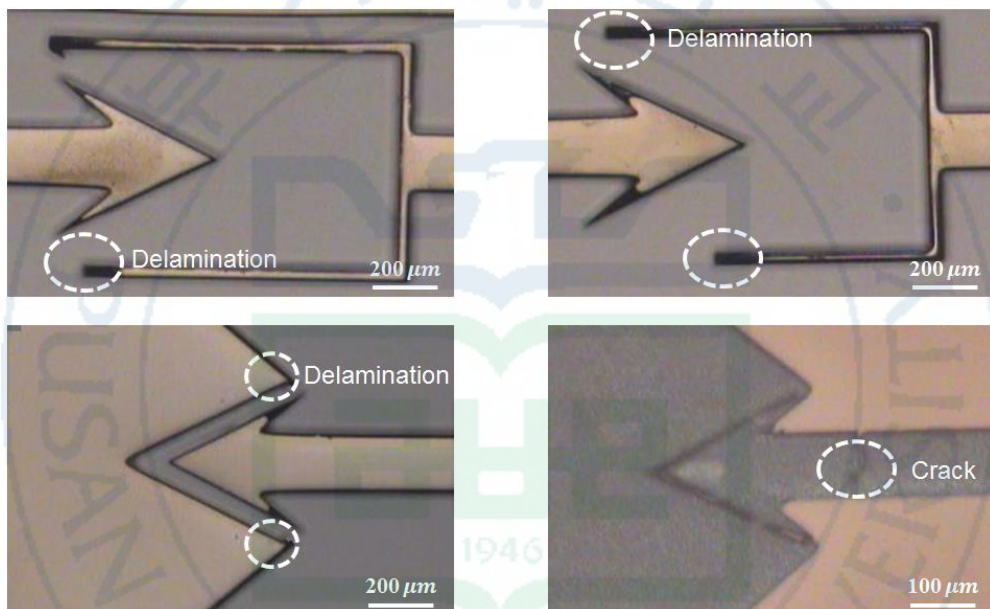


Fig. 23 Crack of substrate and delamination of sensor

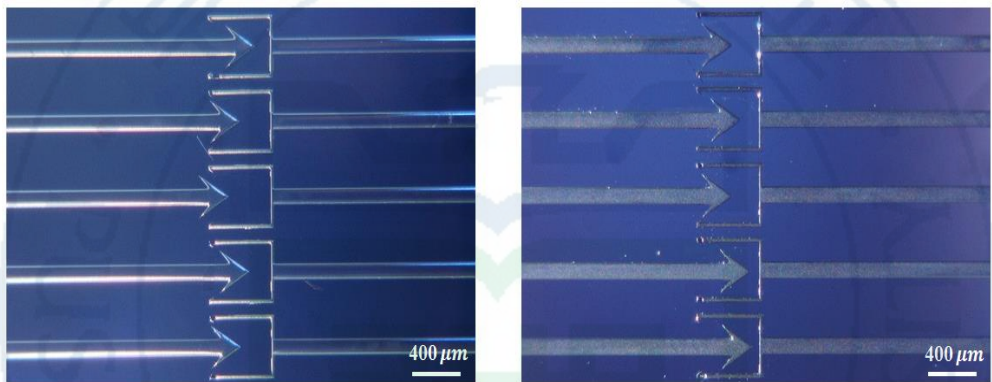


Fig. 24 Temperature sensor increases nonlinearly

Micro Cantilever Temperature Sensor to Monitor High Temperature Experience Using Thermal Expansion

Soon Ho So

Department of Advanced Materials and Parts of
Transportation Systems, Graduate School,
Pusan National University

ABSTRACT

Increase and high temperature thermal systems industry of worldwide energy usage has increased overall. Temperature sensing liquid crystal has been widely used for sensing temperature, wire bonding is still challenging for complex wire connection system. In order to measure and monitor temperature at extreme high temperature. We present a temperature sensing system with wire-bonded device which fabrication with method and based on the elongation caused by metal thermal expansion with the change of length temperature can be visualized and The target temperature is to fabricate a temperature sensor which can measure the performance in the 600 to 1000 °C

감사의 글

어느 새 석사과정을 마치고 학위 논문을 제출하게 되었습니다. 지난 2년의 시간 동안 미흡하지만 학위 논문을 마치면서 도와주신 분들께 감사의 말씀을 전합니다.

부족한 저를 연구생으로 받아주시고, 언제나 세심하고 꼼꼼한 손길로 지적해주신 고정상 교수님께 진심으로 감사 드립니다. 또한 학과 유지에 힘써주시고, 바쁘신 와중에도 따뜻한 격려와 조언을 해주신 최윤석 교수님, 강남현 교수님께 감사 드리며, 연구에 집중할 수 있도록 행정적으로 도움을 많이 주신 조효정 선생님께도 감사의 말씀을 전합니다.

2년간 연구실 생활을 하면서 많은 일들이 있었습니다. 먼저 연구실 생활을 시작하면서 언제나 실장의 역할을 하며 저의 모자람을 채워주고 감사준 형진형님, 불가능의 단어가 무색한 연구실 해결사 제명형님, 효창형님 자상하고 세심하게 챙겨준 문정누나, 함께 많이 하지 못해 아쉬운 Wang bo와 Don 실험실 업무를 같이 하면서 생활한 하나뿐인 후배 동혁, 올바른 연구방향을 제시 해주신 졸업한 철희형님에게도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 항상 옆에서 응원을 해준 여자친구 이나리양에게도 이 자리를 빌어 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 한없이 부족한 저에게 인간됨의 진리를 가르쳐주신 아버님, 철없는 아들을 사랑과 헌신으로 키워주신 어머님, 저보다 먼저 경제적 활동을 하고 있는 동생 소혜진양에게 가장 큰 감사의 마음을 전합니다.

2016. 06. 17