
碩士學位論文

실리콘 微細加工 技術과 白金 薄膜을
이용한 마이크로 熱센서

濟州大學校 大學院

電子工學科



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

金 永 珉

1996年 12月

실리콘 微細加工 技術과 白金 薄膜을 이용한 마이크로 熱센서




指導教授 李 光 萬

金 永 珉

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1996年 12月

제주대학교 중앙도서관
金永珉의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

審査委員長	김	기	석	
委 員	고	성	익	
委 員	이	광	만	

濟州大學校 大學院

1996年 12月

**Micro Thermal Sensors Using Silicon
Micromachining Techniques and Platinum
Thin Film**

Young-Min Kim

(Supervised by Professor Kwang-Man Lee)

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF ELECTRONIC ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

1996. 12.

목 차

Summary	1
I. 서 론	2
II. 기초이론	6
1. 열센서	6
2. 열전달이론	9
III. 실리콘 미세가공 기술	14
1. 실리콘 이방성 식각	14
2. TMAH용액을 이용한 실리콘 이방성 식각	18
3. 결과 및 고찰	21
IV. 마이크로 열센서의 제조와 동작 특성	29
1. NON 구조의 다이어프램 형성	29
1) NON 구조의 절연막 및 다이어프램 형성	30
2) NON 절연막의 기계적 응력 측정	31
3) NON 절연막 다이어프램의 열적 응력 측정	33

2. 백금박막 히터와 온도감지기의 제조	36
1) 백금박막의 증착과 패턴 형성	36
2) 백금박막 히터와 온도감지기의 동작 특성	37
3. 마이크로 열센서의 제조	41
4. 마이크로 열센서의 동작특성	44
1) 마이크로 가스유량 센서의 응답 특성	45
2) 마이크로 진공 센서의 응답 특성	49
V. 결론	52
참고문헌	54



Summary

The micro thermal sensors described in this paper were fabricated by using silicon micromachining techniques and platinum thin film. In order to develop semiconductor thermal sensors with better performance, it is necessary to study the material, structure and property of a silicon micromachining technique and device based on it.

Insulator diaphragm can be fabricated by silicon anisotropic etching. TMAH (tetramethyl ammonium hydroxide) solution is used as etchant. The main advantage of TMAH-based solutions is their full compatibility with IC technologies. The etch rate of (100) oriented silicon crystal planes was increased linearly with decreasing the TMAH solution concentration and increasing TMAH solution temperature. And etch pits of silicon surface were decreased with increasing TMAH solution concentration.

Mask pattern layout and process design of the micro thermal sensor are performed by using standard nMOS process techniques. The chip, size is 1.5mm×2.1mm, is composed of a heater and a temperature detector.

Micro heater and temperature detector were fabricated using platinum thin films deposited by R.F. sputtering and patterned by lift-off method. And the operational characteristics of the heater and temperature detector are measured. Finally, micro gas-flow sensor and vacuum sensor are fabricated and their operational characteristics were measured.

I. 서 론

센서란 각종 화학량이나 물리량을 신호로 받아들여 우리가 측정할 수 있는 양 (전기적 신호 등)으로 바꾸어 이들 양을 검지하고 정량할 수 있는 소자를 말한다. 센서는 우리 인간이 갖고 있는 오감의 감각기관이 하는 일을 대행해 주는 장치로서 오감기능을 보완하고 확장하며 오감으로 느낄 수 없는 육감의 영역 즉 적·자외선 및 전자파 등을 감지해 내는 소자로서도 주목을 받고 있다.

최근 수십년 동안 센서가 모든 산업분야에서 마이크로 컴퓨터와 접속되어 산업 기계, 자동차 엔진제어 시스템, 가전기기 및 진단용 의료기기와 같은 첨단 기기에 사용됨으로 인하여 그 중요성이 높아지면서, 집적회로 제조공정 기술과 미세가공 (micromachining) 기술을 활용한 반도체 마이크로 센서에 대한 연구는 괄목할 만한 성장을 거듭해 왔다.

센서 기술은 반도체 집적회로 제조공정 기술에 미세가공 기술이 첨가되어 실리콘 식각 속도의 이방성이나 불순물 농도차이 등을 이용하여 웨이퍼 상에 구멍이나 홈 및 피라미드 등과 같은 여러 가지 형상의 기계 소자를 조립할 수 있게 되었으며 힘, 압력 및 가속도 센서 등에 이용되고 있다. 또한 실리콘을 이용한 센서는 반도체 일괄 제조공정의 장점을 활용할 수 있고 실리콘 미세가공 기술을 이용하여 단일 기관 상에 지능화 센서 혹은 다기능 센서를 구현할 수 있는 등의 여러 가지 장점을 가지고 있다.

근래에 표준 CMOS 공정기술이나 표준 바이폴라 공정기술과 호환성이 있는 열트랜스듀서의 연구·개발을 위한 시도가 빈번히 이루어지고 있다(Moser 등 1991). 이러한 소자들은 다이아프램, 브릿지 및 캔틸레버 형태의 산화막이나 단결정 실리콘 구조로 되어있다. 열적으로 잘 격리되고 열용량이 매우 작은 구조가 가능하다면 이러한 구조는 국부적인 온도변화를 감지할 수 있으며 적외선 센서, 가스유량 센서, 진공 센서 및 교류전력 센서 등의 열센서 응용에 중요한 역할을 할 수 있다(Lenggenhager 등 1992), (Qiu 등 1995), (Kalvester 등 1994), (Baltes and

Moser, 1993), (Jaeggi 등 1992).

일상생활뿐만 아니라 모든 산업분야에 있어서 열의 역할은 매우 중요하기 때문에 온도를 정확히 측정하기 위한 노력은 오랫동안 지속되어 왔으며, 현재 널리 사용되고 있는 히터 및 온도감지 요소들은 측정 원리에 따라 써미스터, 열전대, 측온저항체(RTD : resistance thermometer device), 트랜지스터 등 여러 가지 종류가 있다. 이 중에서도 온도에 따른 금속의 전기저항 변화를 측정하는 측온저항체는 다른 형태들에 비해 호환성, 안정성, 감도, 선형성 및 사용 가능한 온도 범위가 넓지만 소형화가 어렵고 기계적 충격이나 진동에 약하며 고가라는 단점을 갖고 있다. 특히 백금-측온저항체는 저항의 온도계수가 크고 직선성이 우수하고 넓은 온도 범위에서 안정하기 때문에 백금 코일을 이용한 운모형, 세라믹형 및 유리형 등이 실용화되고 있지만, 고순도의 백금 코일을 이용하기 때문에 기계적 특성이 나빠져, 코일제작 및 볼딩에 많은 시간이 소요되고, 소형화가 불가능하며 고가인 단점이 있다. 그러나 박막형 백금-측온저항체는 이와 같은 문제점을 해결할 수 있으며 소형화, 고속응답 및 저가격화가 가능하다(Meijer and Voorwinder, 1991), (Regtien, 1990), (McGee, 1988).

현재까지 개발된 유량 센서에는 여러 가지 종류가 있지만 열막유량 센서는 반도체 재료와 공정을 이용하여 가장 쉽게 제작할 수 있는 유량 센서이다. 이러한 이유로 열막유량 센서는 마이크로 센서와 미세가공 분야에서 제작되는 유량 센서의 대부분을 차지하며 자동차와 의료기 및 반도체 공정 등의 고부가가치 분야에 주로 응용된다. 또한 열막유량 센서는 최근에 연구가 시작된 것으로 집적회로 공정기술과 미세가공 기술의 발달로 여러 가지 구조의 센서가 제작되었다(Esashi, 1991), (Yoon and Wise, 1992). 열식 공기유량계는 열선 및 반도체를 이용하여 유량계의 크기, 응답속도 및 전력소모를 낮추기 위해서 많이 연구되고 있다. 열식 공기유량계의 발전단계를 보면 1982년, Joham H. Huijsing 등이 유체가 가열된 칩상을 지날 때 칩의 양단 지점의 온도차를 기초로 하여 BJT를 이용한 검출회로를 사용해서 유속을 측정할 수 있는 측정기를 발표했다. 또한 일본의 Nobuyuki Tanaka 등이 1987년에 일반적으로 사용되는 실리콘 기판 대신에 열전도도가 낮

은 유리를 사용해서 히터의 열이 유체의 온도를 측정하는 온도 센서에 영향이 거의 미치지 않도록 측정계를 제작하였다. 1987년, 중국의 Tong Qin-Yi 등이 CCT(constant chip temperature)원리를 이용한 CMOS 유속측정계를 소개하였다. 이것은 칩온도를 일정하게 하기 위해 필요로 되는 가열 트랜지스터의 전력 소비 변화를 측정함으로써 가열된 칩상의 유속을 측정하는 것이다. 1991년 M. Esashi는 미세가공 기술을 이용하여 제작한 유속 및 유량측정기를 연구 발표한 바 있다. 그리고 최근에는 1993년 D. Moser 등이 CMOS 공정 기술과 미세가공 기술을 이용하여 n-poly/p-poly 열전대를 제작하고 제벡효과를 이용한 가스유량 센서에 대한 연구를 발표하는 등 열전대를 이용한 연구들이 활발히 진행되고 있다.

마이크로 히터의 열용량을 줄여 작은 전력으로 높은 온도를 유지하며, 센서의 열감응도를 높이기 위하여 실리콘의 이방성 식각이 요구된다. 지금까지 가장 많이 이용된 식각용액인 EDP(ethylene diamine pyrocatechol)용액 및 KOH(potassium hydroxide)용액은 센서 제조 시 마스크 패턴의 후면정렬이 필요하고 이미 형성된 금속 박막을 식각용액으로부터 보호해야 하므로 일반적으로 알려진 표준 CMOS공정이나 표준 바이플라공정을 활용하는데 커다란 문제가 되고 있다. 이러한 문제를 능동적으로 해결하기 위하여 모든 공정이 마무리된 후에 후면 마스크 정렬과 금속 박막을 보호하기 위한 추가적인 막이 없이 실리콘 식각을 할 수 있는 TMAH(tetramethyl ammonium hydroxide)용액에 대한 활용이 최근 보고되고 있다(Lenggenhager 등 1994).

본 논문에서는 제조 공정이 비교적 단순하고 응답시간이 빠르며, 고온에서도 화학적으로 안정하여 오랜 시간 사용하여도 저항값이 변하지 않는 장점을 갖고 있는 백금을 사용하여 실리콘 미세가공 기술과 반도체 집적회로 제조 공정기술을 활용한 마이크로 열센서를 제조하였다. 단열 특성과 기계적인 안정성이 우수한 NON($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$) 구조의 절연막을 LPCVD 및 APCVD법을 이용하여 실리콘 기판상에 형성하고 기계적 및 열적 특성을 측정하였다. 또한 실리콘 미세가공을 위한 실리콘 이방성 식각용액으로써 최근에 빈번히 사용되고 있는 TMAH 용액의 특성에 대한 기초 실험을 하였다. 위의 실험을 통해 본 논문에서 센서 제

작 시 이방성 식각을 위한 TMAH 식각액의 조건을 제시하였다. 그리고 백금박막을 이용하여 마이크로 히터 및 온도감지기를 제작하고 그 동작 특성을 측정하였다. NON 구조의 절연막 다이아프램과 백금박막 히터와 온도감지기를 조합하여 마이크로 열센서를 제조하고 이를 가스유량 센서와 진공 센서에 응용하여 보았다.



II. 기초이론

1. 열센서(Thermal Sensors)

열센서들은 크게 자기-발생 센서(self-generating sensor)와 변조 센서(modulating sensor)로 분류할 수 있다. 자기-발생 센서의 경우, 입력신호로부터 열 전력 P 가 발생되어 이로부터 출력신호 ΔT 를 얻게된다. 측정된 온도차 ΔT 의 산출과 알고 있는 열 컨덕턴스 G 로부터 입력신호의 양을 알게된다. 그러므로 이러한 센서들을 동작하는데 어떠한 전력도 필요하지 않으며 오프셋(offset) 없이 동작한다. 대표적인 자기-발생 센서로는 적외선 복사 센서, 순수 실효치(true rms) 변환기 및 마이크로 열량계 등이 있다. 변조 센서의 경우, 입력신호는 센서 변환을 결정하는 열 컨덕턴스 G 로 변조된다. 출력신호 ΔT 를 발생하는 열 전력 P 는 센서에 의하여 공급되며 입력신호는 알려진 공급전력 P 와 측정된 온도차 ΔT 의 비율로부터 생긴다. 변조 센서의 예로서 비 열적인 신호가 열 흐름에 영향을 주는 유량 센서와 진공 센서를 들 수 있다.

미소부위를 가열하여 특정온도를 유지하는 일은 집적화된 다양한 마이크로 센서들의 응용에서는 중요한 일이다. 이는 백금박막 히터나 다결정 실리콘에 Joule 열을 발생함으로써 쉽게 얻어진다. 열센서로서 변조 센서의 일종인 유량 센서와 진공 센서는 물리적인 양들을 입력 신호로 받아들여 그 신호를 열적인 양들로 변환하고, 다시 열적인 양들을 측정 가능한 전기적인 신호로 변환시키는 기능을 한다. 즉, 열센서들은 다음의 세 가지 과정을 거쳐서 동작한다. 먼저 비 열적인 신호가 열 흐름으로 변환되고, 둘째 열 흐름의 변화는 열적 신호 내에서 온도 차이로 바뀐다. 마지막으로 이 온도 차이는 온도감지기와 측정 장비에 의해 전기신호로 나타난다(Sze, 1994).

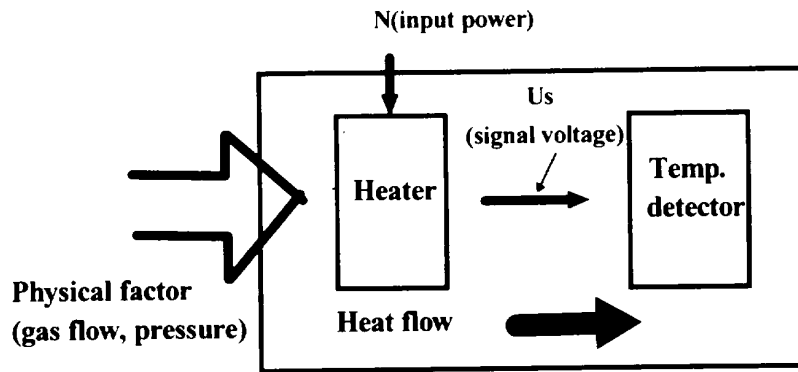


Fig. 1. Block diagram of thermal sensor system.

그림 1은 마이크로 히터 및 온도감지기로 구성된 열센서의 블록 다이어그램으로써 열센서의 동작원리를 도식적으로 보여주고 있다. 여기서 특성 파라미터들은 두 개의 단계로 분류된다. 즉, 시스템의 에너지 평형으로부터 흡수된 열에 의해 발생하는 온도 증가가 결정되며, 이 온도 증가로부터 발생하는 검출 출력인 열전압 U_s 를 끌어낸다.

정상상태에서의 열센서의 감도 S 는 신호 전압 U_s 와 입력 전력 N 의 비율인

$$S = U_s / N \quad (\text{V/W}) \quad (1)$$

과 같이 나타낼 수 있으며 센서의 감지 특성을 알 수 있다.

집적회로 제조공정과 미세가공 기술을 이용하여 실리콘 다이아프램이나 멤브레인 등에 열센서를 구현한 경우에는 전도열에 의한 열손실로 인해 감도에 많은 영향을 주게 된다. Oudheusden와 Huijsing(1990), Oudheusden와 Herwaarden(1990) 등에 의해 연구된 실리콘 박막(또는 후막)구조의 단점인 전도열 손실에 따른 낮

은 감도를 개선하기 위해 $\text{NO}(\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2)$ 또는 $\text{NON}(\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4)$ 등과 같은 구조의 복합 절연체 다이아프램 또는 멤브레인 등을 이용하고 있다(Völklein, 1990), (Klonz and Weimann, 1989). 열전도율이 낮은 절연막으로 된 복합 구조의 다이아프램 상에 가열부(heater) 및 온도감지부를 집적함으로써 센서의 감도를 높일 수 있다.

위와 같은 절연막 다이아프램은 빠른 열응답을 위한 작은 열용량을 갖기 위해서는 두께가 얇을수록 좋다. 하지만 다이아프램은 열차단막으로서의 역할뿐만 아니라 가열부 및 온도감지부를 지탱하는 기계적인 지지대 역할도 해야 하므로 두 가지가 상반되는 조건을 만족하는 두께로 제작하여야 한다.



2. 열전달 이론

열전달은 온도차에 의하여 일어나는 에너지의 이동이라고 할 수 있다. 하나의 물질에서나 두 물질 사이에 온도차가 존재하면 반드시 열전달이 일어난다 (Incropera and Dewitt, 1993). 열은 가스 감지와 유량 측정 등과 같이 많은 집적화된 마이크로 센서에 중요한 요소이다. 이것은 샌드위치 형태를 이룬 다결정 실리콘 저항(가열요소)에서의 Joule열 발생에 의해 쉽게 이를 수 있다. 그리고 적절하게 단열 하여 커다란 전력 소모 없이 원하는 온도를 얻을 수 있다.

마이크로 열센서들에 있어서 열전달의 기본적인 형태는 전도, 대류 및 복사에 의한 열전달로 나누어 설명할 수 있다. 실질적으로 한 매질내의 온도분포는 이 세 가지 형태의 열전달에 의해 복합적으로 제어되며, 따라서 한 형태의 열전달을 다른 형태와의 상호작용으로 부터 완전히 분리시킬 수는 없다(Swart and Nathan, 1994), (Sze, 1994), (Crary, 1987).

1) 전도(Conduction)

전도는 정지하고 있는 유체의 경우에는 분자의 운동 또는 직접 충돌에 의하여, 금속의 경우에는 전자의 이동에 의하여 고온에서 저온 구역으로 에너지 교환, 즉 온도 구배에 의한 에너지 전달을 전도라 한다. 열전도의 기본법칙은 실험적 관찰에 근거하여 Biot로부터 유래되었으나 일반적으로는 그것을 열의 이론적 해설에 사용한 프랑스 수리물리학자 Joseph Fourier에 의하여 성립되었다. 전도(에너지 확산)을 방정식, 즉 Fourier법칙에 의하면 한 방향으로의 전도에 의한 열전달률은 열류에 수직한 면적과 그 방향의 온도기울기의 곱에 비례한다. 예를 들면, x 방향으로의 열흐름은 Fourier법칙에 의하여

$$Q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{kcal/h 또는 } W \quad (2)$$

$$\text{또는 } q_x = \frac{Q_x}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{kcal/h} \cdot \text{m}^2 \text{ 또는 } \text{W/m}^2 \quad (3)$$

로 주어진다(Chapman, 1984). 여기서 Q_x 는 면적 A 를 통한 양의 x 방향으로의 열 전달률이며, q_x 는 양의 x 방향으로의 열플럭스(heat flux)라고 한다. 비열상수 k 는 물질의 열전도율(thermal conductivity)이라 하며 항상 양의 값을 갖는다. 식 (2)와 (3)에 포함된 음의 부호는 열전달이 양의 x 방향으로 일어날 때 q_x (또는 Q_x)가 양의 값을 갖게 하기 위해서이다. 즉, 열이 양의 x 방향으로 일어나면 그 방향으로 온도가 감소되어야 하므로 $\partial T/\partial x$ 가 음의 값을 갖게 되어 위의 식에 포함된 음의 부호와 함께 q_x (또는 Q_x)가 양의 값을 갖게 된다.

고체 물질 내에서 전도에 의한 열전달은 다음과 같은 일반적인 열전도 방정식에 의해 주어진다.

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + q' = c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.a)$$

또는

$$\nabla^2 T + \frac{q'}{k} = \frac{c \rho}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.b)$$

여기서 k , q' , ρ 및 c 는 모두 온도함수이며, k 는 물질의 열전도율(W/mK), q' 는 단위체적당 열 발생(W/m³), c 는 단위 질량당 비열(J/kg·K), ρ 는 밀도(kg/m³), T 는 온도, 그리고 α 는 열전도율이 열용량에 대한 비를 나타내는 열확산율(m²/s)을 나타낸다(Swart and Nathan, 1992).

식 (4.b)에서 α 가 크다는 것은 열전도율이 크며, 에너지 이동속도가 빠르거나 물질의 열용량이 작다는 것을 말한다. 열용량이 작다는 것은 물체내를 이동하는 열량 중에서 작은 양이 그 물질에 흡수되어 그 부분의 온도를 상승시키는데 쓰이

며, 그외의 많은 양의 열은 멀리 전달되게 된다.

2) 대류(Convection)

유체가 고체 위 또는 유로 내를 흐를 때 유체와 고체표면의 온도가 다르면 표면에 대한 유체의 상대운동의 결과로 유체와 고체표면 사이에 열이 전달되는데 이 열전달 기구를 대류라고 한다. 대류 열전달은 유동체의 운동으로부터 일어나는 에너지 전달을 나타내는 것으로써 에너지는 전도에 의해서 유동체 입자들 사이에서 전달된다. 만일 유체의 흐름이 팬 또는 펌프와 같은 외부의 힘에 의해 인위적으로 발생한다면, 이 열전달 기구를 강제대류(forced convection)라고 부른다. 반면에, 유체의 흐름이 온도 구배에 의해 발생한 유체의 밀도 차에 의한 결과 또는 유체의 열손실이 완전히 전도된다면 그때의 열전달 기구를 자연대류(natural convection)라고 한다(Swart 등 1991).

이 두 경우의 대류에 의한 열전달의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$Q = hA(T_s - T_f) \quad (W) \quad (6)$$

여기서 h 는 열전달 계수(heat-transfer coefficient)이며, 대류형태를 포함하는 몇 가지 파라미터들에 의존한다. A 는 온도가 T_s 인 평판의 표면적(m^2)이며 T_f 는 유체의 온도를 나타낸다.

중요한 무차원 파라미터로서 Nusselt 수가 종종 대류에 의한 열전달을 계산하기 위해 사용되며, 다음과 같이 정의된다.

$$N_u = hL_c/k \quad (7)$$

여기서 L_c 는 물체의 특성을 나타내는 길이이다. 계수 h 는 유체와 디바이스 모두

에서 나타나는 파라미터들의 변화에 의존한다.

등온으로 유지된 평판을 따라 흐르는 층류(laminar flow)내의 열전달 계수;

$$h(x) = 0.332 \frac{k(P_r)^{1/3}}{x} (Re_x)^{1/2} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (8)$$

여기서 P_r 은 프란틀(Prandtl) 수, Re_x 는 x 방향 성분의 레이놀즈(Reynolds) 수, k 는 열전도율을 나타낸다.

표면이 등온이 아닌 경우, 열전달 계수는 보다 복잡하다. 유체가 x 방향으로 흐른다고 가정하면, 표면을 따라 임의의 점에서의 국부적인 열전달 비율은 다음과 같다(평판의 시작점은 $x=0$ 이다).

$$q(x) = \int_0^x h(x, \tau) \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (\text{W/m}^2) \quad (9)$$

평판을 가로지르는 층류에 대하여, 위의 적분에 대한 열전달 계수 $h(x, \tau)$ 는

$$h(x, \tau) = 0.332 \frac{k(P_r)^{1/3}}{x} (Re_x)^{1/2} \frac{1}{[1 - (\tau/x)^{3/4}]^{1/3}} \quad (10)$$

난류(turbulent flow)에 대하여, 열전달 계수 $h(x, \tau)$ 는

$$h(x, \tau) = 0.0296 \frac{k(P_r)}{x} (Re_x)^{0.8} \frac{1}{[1 - (\tau/x)^{3/4}]^{1/3}} \quad (11)$$

으로 나타낼 수 있다.

가열된 물체로부터 자연대류는 세 가지 단계로 나누어지는데, 대류(여기서 넓은 범위에 퍼져있는 유체에 대한 대류 열 손실을 의미한다), 층류 및 난류이다. 하나의 단계에서 또다른 단계로의 진행은 다음의 Grashof 수라고 알려진 무차원 양에 의존한다.

$$Gr_{L_c} = g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3/\nu^2 \quad (12)$$

Grashof 수는 점성에 대한 부력의 비율을 의미하며, L_c 는 표면의 특성 길이, g 는 중력상수[kg/m·s], ν 는 동점성 계수[m²/s] 및 β 는 가스의 열팽창 계수(K⁻¹)를 나타낸다.

3) 복사(Radiation)

복사를 통한 열손실은 Stefan-Boltzmann 법칙에 의하여 결정되는데, 흑체 표면에 대해서는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q_{rad} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (13)$$

여기서 ϵ 은 표면 복사율, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수를 나타낸다.

온도 T_1 과 T_2 에서 두 표면 사이의 순수 복사교환은 다음과 같다.

$$q_{rad,1,2} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} \quad (14)$$

Ⅲ. 실리콘 미세가공 기술

실리콘 미세가공 기술은 마이크로 센서, 마이크로 구조 및 마이크로 시스템의 디바이스 제작을 위해 중요하다. 미세가공 기술은 다양한 화학적 식각을 이용한 사진식각 공정 기술과 박막증착 공정의 조합이라고 할 수 있으며 매우 작은 크기를 가지는 삼차원적이고 기계적인 구조 제작이 가능하다. 일반적으로 미세가공 기술은 벌크(bulk) 미세가공 기술과 표면 미세가공 기술로 분류할 수 있다. 미세가공 기술에서 사용되는 물질들은 단결정 실리콘, 폴리머(polymers), 유리, 금속, 그리고 세라믹(ceramics) 등 다양하다(Hesketh and Harrison, 1994).

벌크 미세가공 기술은 특별한 방법으로 형성된 웨이퍼로부터 실리콘을 제거하여 3차원 구조를 만드는 기술로서 단결정 실리콘 식각에 기초를 두고 있다. 이 기술은 이방성 식각용액을 개발하면서부터 시작되었으며 이와 함께 발전해 온 미세가공 구조는 실리콘 결정 또는 실리콘에 증착되거나 성장된 층사이에 형성되었다. 반면, 표면 미세가공 기술은 기판의 표면에 증착되거나 성장된 박막층을 이용하여 미세기계(micromechanical) 디바이스들을 제작하는 기술로서 빔(beam), 베어링(bearing) 및 회전자(rotor) 등을 형성하였다(Sze, 1994).

1. 실리콘 이방성 식각

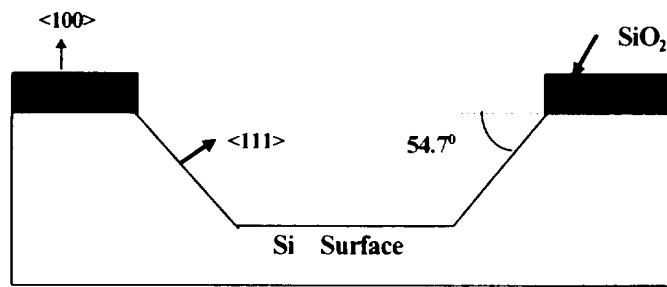
벌크 미세가공 기술로써 미세구조의 개발에 가장 중요하고 광범위하게 사용되는 것이 식각 기술이며 크게 습식식각과 건식식각으로 나눌 수 있다. 습식식각에서 실리콘에 사용되는 식각용액은 등방성(isotropic) 식각용액과 이방성(anisotropic) 식각용액으로 나눌 수 있으며 불순물의 농도와 식각용액의 온도에 따라서 식각률이 변화된다.

등방성 식각은 결정축의 면에 관계없이 어느 면으로도 동일한 속도로 식각되지만 실리콘 이방성 식각은 방향성을 갖고 실리콘을 선택적으로 습식식각하는 공정으로 1960년대 말부터 1970년대 초에 보고되었다. 그러나 이 기술의 무한한 잠재력에 대한 인식은 1970년대 말에서 1980년대 초에서야 비롯되었다(Ristic, 1994), (Gardner, 1994).

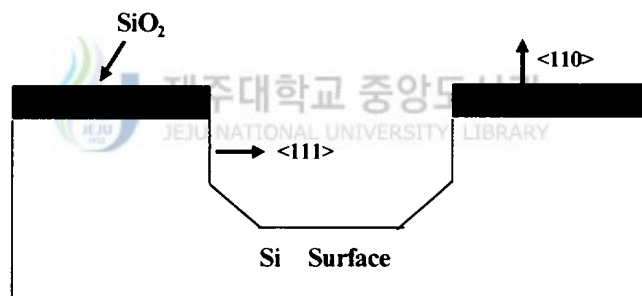
습식 실리콘 이방성 식각 기술은 잘 확립된 기술이며, 여러 가지 소형 센서들의 제작에 필요한 미세가공 구조를 실현하는데 사용되는 가장 중요한 공정 중의 하나이다.

실리콘 이방성 식각은 (1) 결정면 방향에 대한 실리콘 식각률, (2) 불순물 도핑 정도에 따른 식각률, (3) 외부 바이어스(bias)의 적용 등에 의존하며 자동적인 식각정지 메카니즘으로써 사용할 수 있다. 이방성 식각액은 식각률이 실리콘의 결정 방향에 크게 의존하는 기본적인 성질을 가지고 있으며, 실리콘의 결정에서 (111)면의 식각률은 다른 모든 결정면들 보다 낮은 식각률을 가지고 식각된다. 이것은 용해율이 실리콘 웨이퍼의 결정 방향에 대한 함수이기 때문이라고 알려져 있다. 정량적으로 이방성 식각은 원자의 단위면적에 대한 밀도의 함수이다 (Hesketh and Harrison, 1994), (Merlos 등 1993).

그림 2는 두 종류 웨이퍼의 식각 모양을 보여주고 있다. 웨이퍼의 일부는 식각 마스크로 보호되고, 노출된 영역이 식각된다. <100>방향을 가지는 웨이퍼에 있어서 식각은 그림 2(a)에서 처럼 (111)면을 따라 진행되며, <100>과 <111>방향 사이의 경사도는 54.74° 의 기울기를 가지고 식각이 진행된다. <110>방향을 가지는 웨이퍼의 경우는 그림 2(b)에서 처럼 (111)면은 수직 방향이며 높은 종횡비 (aspect ratio)를 가지고 식각된다. 위와 같은 결과가 생기는 이유로는 실리콘이 다이아몬드 결정 구조를 가지며 <100>방향에 대한 식각률은 <110>방향에서 보다 조금 높으며 이 두 방향은 공히 <111>방향에서 보다 적어도 10배 이상의 아주 높은 식각률을 가지기 때문이다(Ristic, 1994).



(a)



(b)

Fig. 2. Anisotropic etching of silicon. (a) $\langle 100 \rangle$ wafer surface orientation, (b) $\langle 110 \rangle$ wafer surface orientation.

또한 실리콘 이방성 식각은 실리콘 센서의 구조 제작을 위해서 매우 중요하며, 집적회로 제조공정에서 사용되는 재료의 이방성 식각 기술에서 시스템의 집적을 모두 가능하게 하기 위하여 기존 공정기술과의 호환성은 필수적인 요건이다. 그러나 이러한 조건은 현재 사용되고 있는 이방성 식각액으로는 항상 가능하지는 않다.

실리콘 이방성 식각용액으로는 hydrazine수용액, EDP(ethylenediamine pyrocatechol)용액, KOH(potassium hydroxide)용액, CsOH(cesium hydroxide)용액, NH₄OH용액 및 TMAH(tetramethyl ammonium hydroxide)용액 등이 있다(Wu and Ko 1987), (Wu 등 1986), (Seidel 등 1990).

KOH용액은 좋은 식각 표면과 낮은 독성을 지니고 있어서 가장 광범위하게 사용되고 있지만 Si/SiO₂의 식각률 비가 낮고, 이동성 이온(K⁺)의 오염 때문에 습식 이방성 식각 후 몇 가지 열 공정을 수행해야 하는 등 집적회로 공정과의 호환성에 문제가 있다(Camon and Mektadir, 1995). Hydrazine용액과 EDP용액의 경우는 용액의 특성이 불안정하고 인체에 유해한 성질을 지니고 있으며, CsOH용액의 경우는 높은 가격 때문에 어려움이 있다(Yam 등 1991). 또한 NH₄OH용액은 이온에 무관하고 집적회로 공정과 호환성이 있는 이방성 식각액으로 제안되었으나 특성이 좋고 힐록이 없는 표면을 얻기가 어렵다는 단점을 가지고 있다. TMAH용액은 EDP와 유사한 특성을 지니면서, 보다 안전하고 시간에 따라 균일한 식각률을 가지며 집적회로 공정과 뛰어난 호환성을 가지지만 가격이 높다는 단점을 가지고 있다(Merlos 등 1993), (Acero 등 1995). 하지만 이들 식각용액들은 실리콘 이방성 식각공정에 모두 빈번히 사용되고 있으며, 제각기 특징을 지니고 있다.

2. TMAH용액을 이용한 실리콘 이방성 식각

TMAH용액은 KOH용액에 비해서 용액의 pH가 감소하며 힐록이 거의 형성되지 않으면서 (100) 식각면에서의 수소발생을 무시할 수 있다. 또한 TMAH용액에 실리콘을 도핑 하면 알루미늄을 식각하지 않는 성질 때문에 후면 정렬과 같은 공정 없이 모든 공정이 끝난 반도체 소자의 이방성 식각이 가능하다. 또한 EDP용액의 경우 가열시 발생하는 증기가 매우 유해하므로 안전에 유의해야 하는 단점이 있으나 TMAH용액의 경우는 EDP용액과 거의 같은 특성을 지니면서도 EDP용액보다 안전하다는 측면에서 TMAH용액이 유리하다. 그러므로 EDP용액과 유사한 특성을 지니면서 보다 안전하고 시간에 따라 균일한 식각률을 가지며 집적 회로 공정과 뛰어난 호환성을 가지는 TMAH용액을 선택하여 실리콘 이방성 식각을 하였다(Ristic, 1994).

이방성 식각 실험은 결정면이 (100), p형, 4~6 $\Omega \cdot \text{cm}$ 의 저항률을 가지는 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 실리콘 웨이퍼는 고온(1000 $^{\circ}\text{C}$)에서 습식산화 공정을 통해 약 6200Å의 산화막을 성장시켰다. 산화막 위에 사진식각 공정을 통해 패턴을 형성하고, 25wt.% 농도의 TMAH수용액(Aldrich 화학사)을 이용하여 농도변화와 온도변화에 따른 이방성 식각 특성을 실험하였다. 그림 3은 TMAH수용액의 식각 특성을 관찰하기 위해 설계한 시험용 패턴으로 전체 크기는 3000 $\mu\text{m} \times 3000\mu\text{m}$ 이며, 다이아프램 구조와 캔티레버 구조 등 다양한 형태와 크기를 갖고 있는 마스크 패턴을 보여주고 있다.

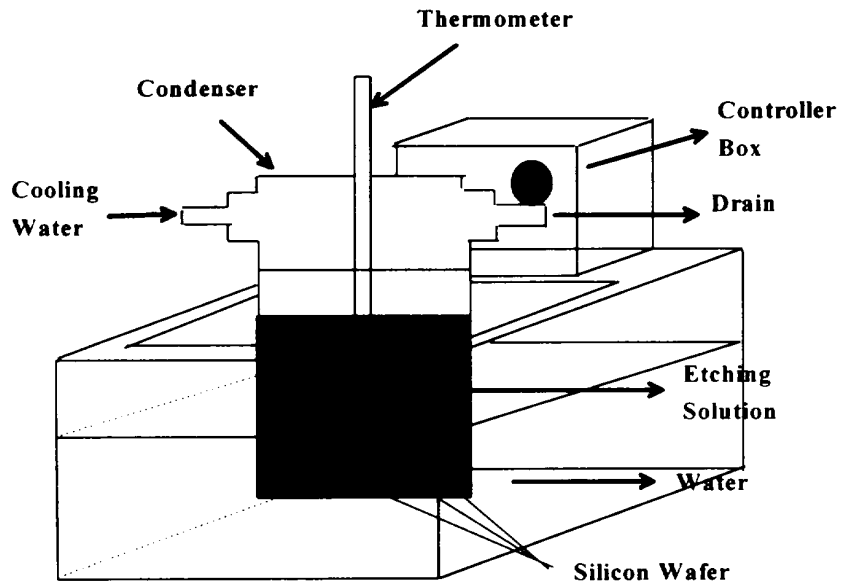


Fig. 4. Apparatus of silicon anisotropic etching system.

그림 4와 같이 제작한 이방성 식각장치를 이용하여 TMAH용액에 대한 실험을 행하였다. 먼저 TMAH용액의 농도를 일정하게 유지한 상태에서 온도변화에 따른 식각률 변화를 측정하였고, 둘째 온도를 일정하게 유지한 상태에서 TMAH용액의 농도변화에 따른 시험용 패턴의 식각률 변화를 측정하였다. 측정 장치로는 광학 현미경(Polarization Microscope, Vickers Co.) 및 전자 현미경(S-2460N, Japan) 등을 사용하였고, 식각된 표면의 특성 및 식각 깊이를 측정하였다. 최종적으로 위의 실험 결과들을 토대로 제작하고자 하는 열센서에 대한 TMAH수용액의 식각 조건을 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 5는 일정한 TMAH wt.%농도에 대해 온도를 80℃, 85℃, 90℃로 각각 변화를 주었을 때 실리콘의 식각률 변화를 보여주고 있다.

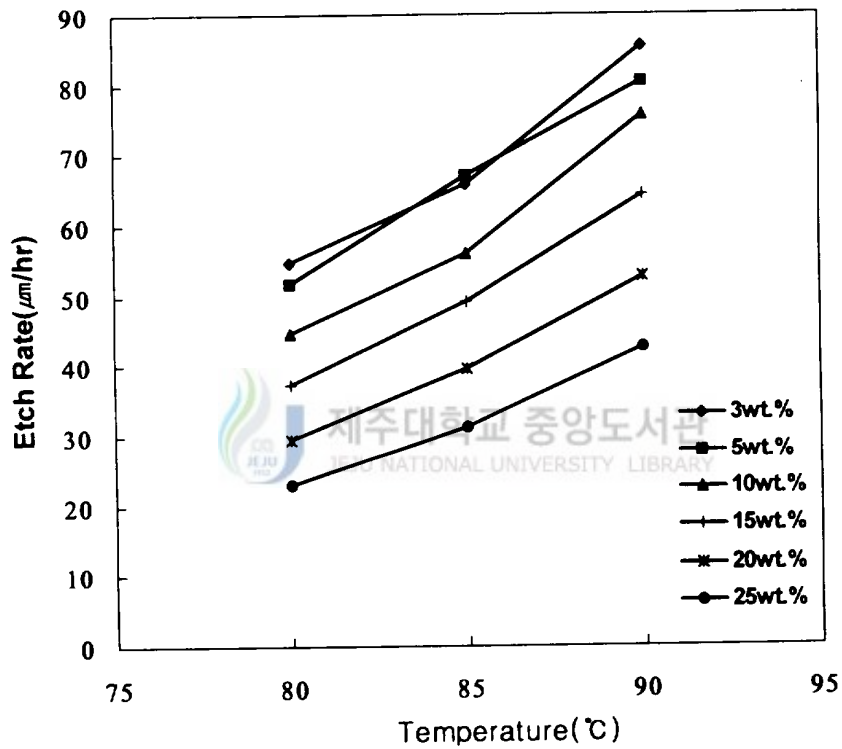


Fig. 5. Etch rate vs temperature characteristics of p-type (100) silicon for various TMAH concentration(wt.% in water).

그림 5에서 “◆” 표시는 TMAH 3wt.%농도에서의 온도변화에 따른 식각률의 변화, “■” 표시는 TMAH 5wt.%농도에서의 온도변화에 따른 식각률의 변화, “▲” 표시는 TMAH 10wt.%농도에서의 온도변화에 따른 식각률의 변화를 보여주고 있다. 또한 “+”, “*” 및 “●” 표시는 각각 TMAH수용액의 농도를 15~25wt.%까지 변화를 주었을 때 온도변화에 따른 실리콘의 식각률을 보여주고 있다.

위의 실험에서 TMAH수용액의 농도를 일정하게 유지하고 온도를 변화시키면서 실리콘 식각률을 측정한 결과, 온도가 증가함에 따라 식각률이 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

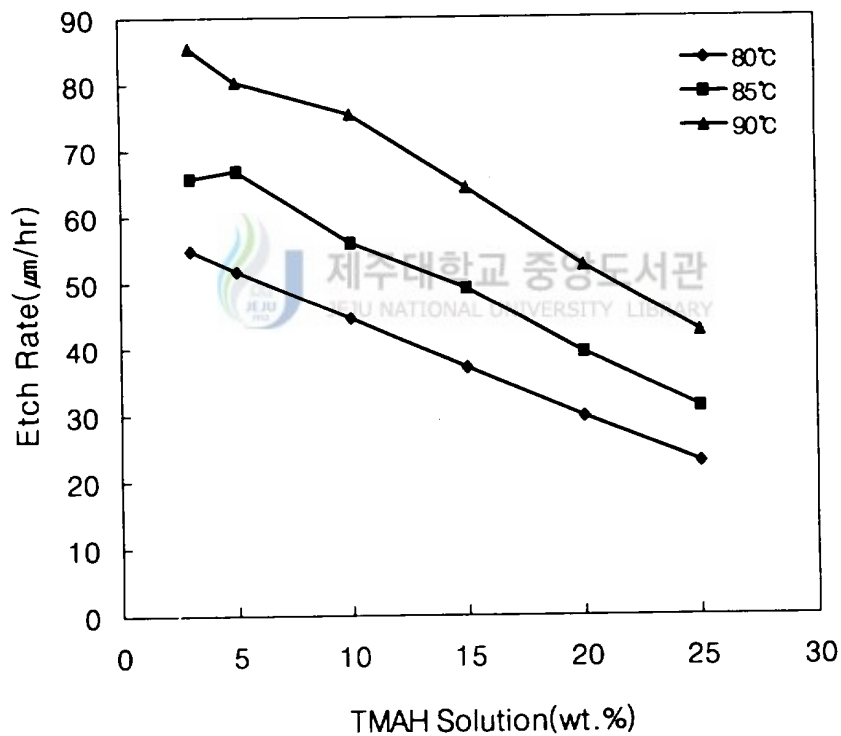


Fig. 6. Etch rate vs TMAH concentration characteristics of p-type (100) silicon at various etch temperature.

그림 6은 온도를 일정하게 유지하고 TMAH수용액의 농도를 3wt.%와 5~25wt.%까지 5wt.% 간격으로 변화를 주면서 시험패턴의 식각률에 대한 측정 결과를 보여주고 있다. 여기에서 “◆” 표시는 80℃로 일정하게 유지한 상태에서의 TMAH수용액의 농도변화에 따른 식각률의 변화를 보여주고 있으며, “■” 표시는 85℃에서의 TMAH수용액의 농도변화에 따른 식각률의 변화를 보여주고 있다. 또한 “▲” 표시는 90℃로 일정하게 유지한 상태에서의 TMAH수용액의 농도변화에 따른 식각률의 변화를 보여주고 있다.

위의 실험에서 온도를 일정하게 유지한 상태에서 TMAH수용액의 농도변화에 따른 식각률을 측정된 결과, 온도가 일정할 때 실리콘 (100)면에 대한 식각률은 TMAH수용액의 농도가 3wt%까지 감소함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

Hesketh 등은 80℃, TMAH 4wt.%농도에서 54 $\mu\text{m/hr}$ 의 식각률을 보인다고 보고한 바 있다(Hesketh and Harrison, 1994). 또한 Merlos 등은 70~90℃까지의 온도 변화와 15~25wt.%까지 TMAH수용액의 농도변화에 따른 식각률을 실험한 결과, 식각률이 약 12~44 $\mu\text{m/hr}$ 정도이고, 온도가 증가함에 따라 그리고 농도가 감소함에 따라 식각률이 증가한다고 보고한 바 있다(Merlos 등 1993).

본 실험에서는 80℃, 3wt.%까지 TMAH수용액의 농도를 낮추어서 실험한 결과, TMAH 3wt.%농도에서 식각률이 약 55 $\mu\text{m/hr}$ 로 Hesketh 등이 보고했던 TMAH 4wt.%농도에서의 결과보다 약간 높은 식각률이 측정되었다. 또한 온도를 80℃로 유지한 후 15~25wt.%까지 농도변화에 따른 식각률은 23~37 $\mu\text{m/hr}$ 로 Merlos 등이 보고한 23~32 $\mu\text{m/hr}$ 과 거의 일치함을 알 수 있었다.

위의 결과들은 Ristic, Hesketh, Merlos 등이 보고했던 TMAH수용액의 농도 및 온도변화에 따른 측정 결과와 식각률은 다소 차이가 있었지만 거의 일치하는 특성을 얻어낼 수 있었다(Ristic 등 1994).

그림 7은 그림 3의 시험용 패턴을 사용하여 90℃, 10wt.%의 TMAH수용액에서 3시간 동안 식각한 NON 절연막의 식각패턴에 대한 전자 현미경 사진을 보여주고 있다. 다이아프램, 브릿지 및 켈티레버 구조 등 절연막 위의 식각패턴들은 식

각을 행한 결과가 모두 기계적인 변형이 거의 없는 양호한 구조를 나타내었다.

다음은 TMAH 수용액의 농도변화에 따른 실리콘 식각표면의 상태를 관찰하기 위한 실험을 행했다. 그림 8은 85℃, 3wt.% TMAH 수용액에 의해 실리콘을 식각했을 때 웨이퍼 표면층에 나타나는 힐록현상을 보여주는 SEM 사진이다. 또한 그림 9는 온도를 85℃로 일정하게 유지한 후 TMAH 수용액의 농도변화에 따른 실리콘이 식각된 표면상태를 보여주는 SEM 사진들이다. 이 SEM 사진을 통해서 관찰해 본 결과, 농도가 증가함에 따라 식각된 표면 상태는 바닥이 매우 매끄럽고 힐록이 거의 생기지 않았지만(그림 9(f)), TMAH 수용액의 농도가 감소함에 따라 (100) 식각표면의 상태는 좋지 않으며 힐록이 증가하는 것을 관찰(그림 9(a))할 수 있었다.

위의 결과들로부터 (100) 실리콘에 대한 식각률과 식각된 표면의 특성은 TMAH 수용액의 wt.% 농도 및 온도에 의존함을 알 수 있었다. 즉, 낮은 TMAH 수용액 농도에서 식각을 했을 때 식각률은 높지만 식각 표면이 좋지 않으며, 반대로 높은 TMAH 수용액 농도에서 식각을 했을 때 식각률은 낮지만 식각 표면의 상태가 좋으며 힐록이 거의 생기지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한 온도가 증가함에 따라 식각률이 높음을 알 수 있었다.

TMAH 수용액을 이용하여 절연막 다이아프램을 형성할 때 온도 및 시간에 따른 식각률과 힐록에 대한 영향 등을 고려하여 TMAH 수용액의 농도 및 온도와 시간 등을 결정하여야 한다. 그러므로 본 논문에서는 실험 결과를 토대로 힐록현상이 심하지 않으면서 식각률이 다소 큰 10wt.% TMAH 수용액을 사용하여 90℃에서 이방성 식각을 행하여 절연막 다이아프램을 제작하였다.

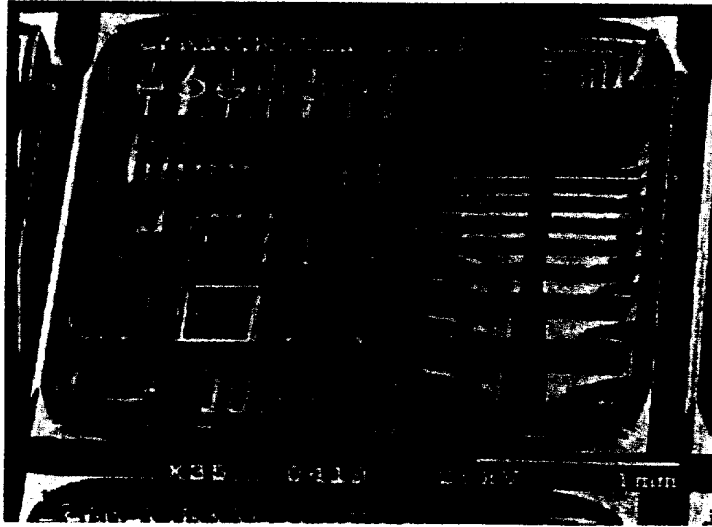


Fig. 7. SEM photograph of etching patterns of insulation film (90°C, 10wt.% TMAH water solution).

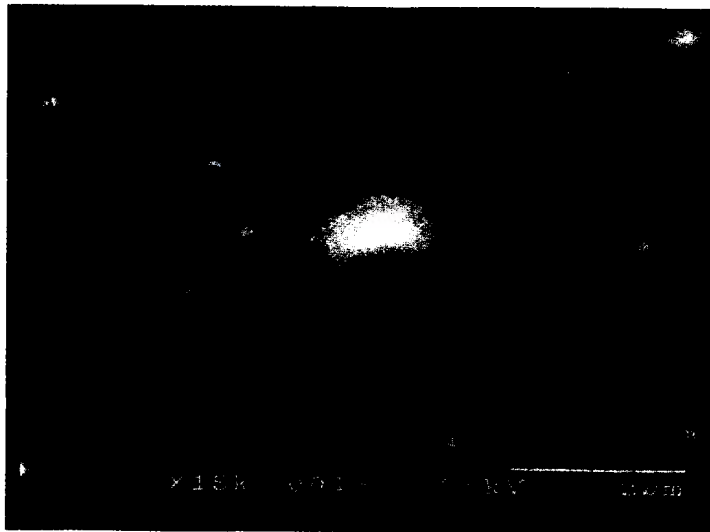
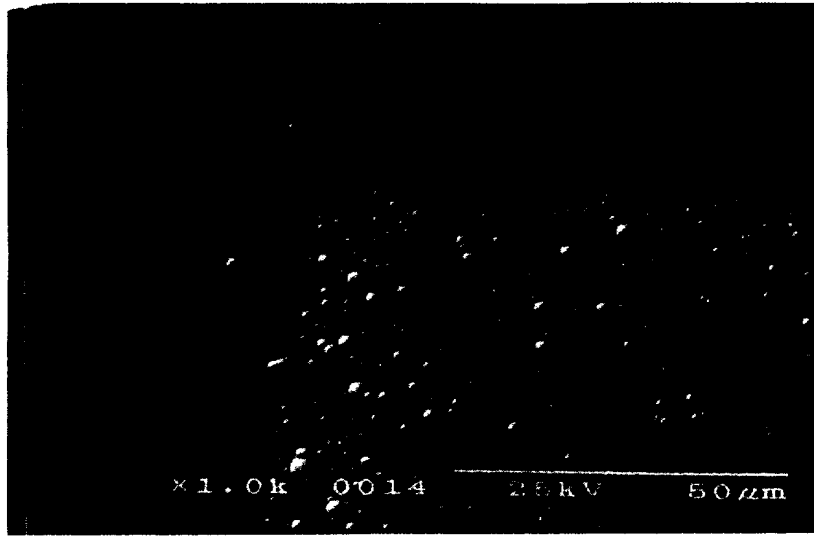
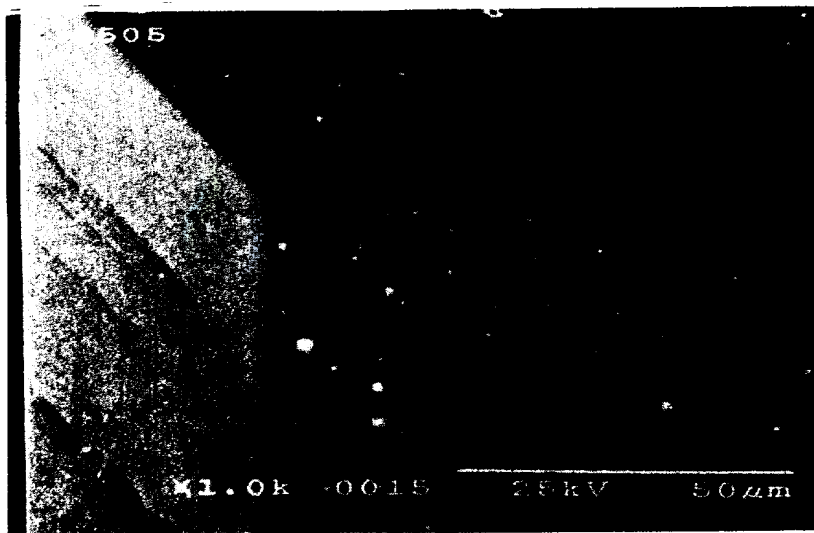


Fig. 8. SEM photograph of top view of a silicon hillock which appeared after etching using 3wt.% of TMAH solution in water.

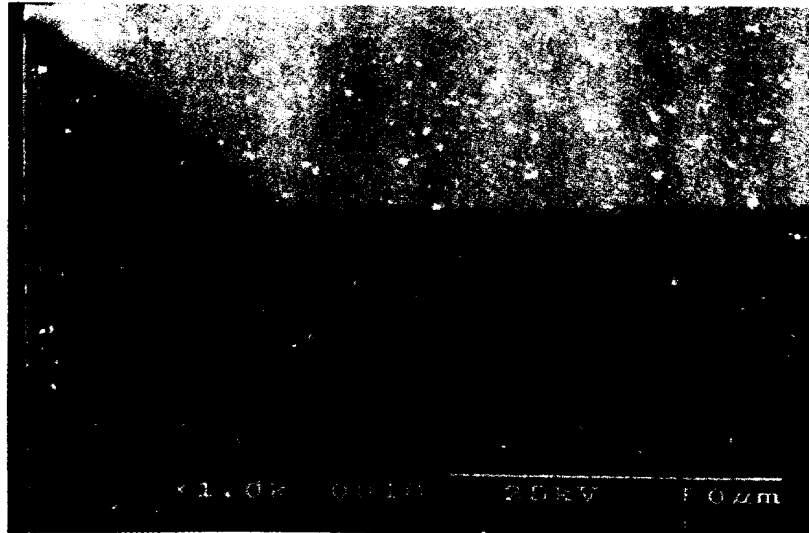


(a)

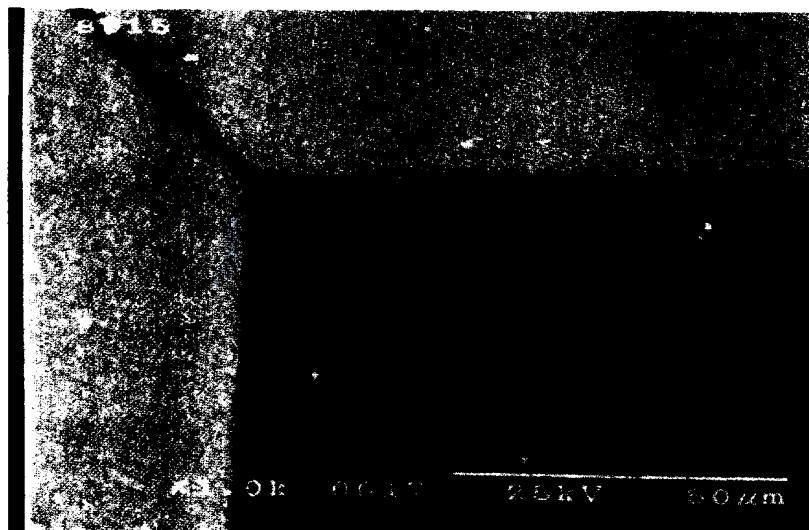


(b)

Fig. 9. SEM photographs of p-type silicon (100) surface etched at 85°C with various TMAH concentration: (a)3wt.% ;(b)5wt.% of TMAH solution in water.

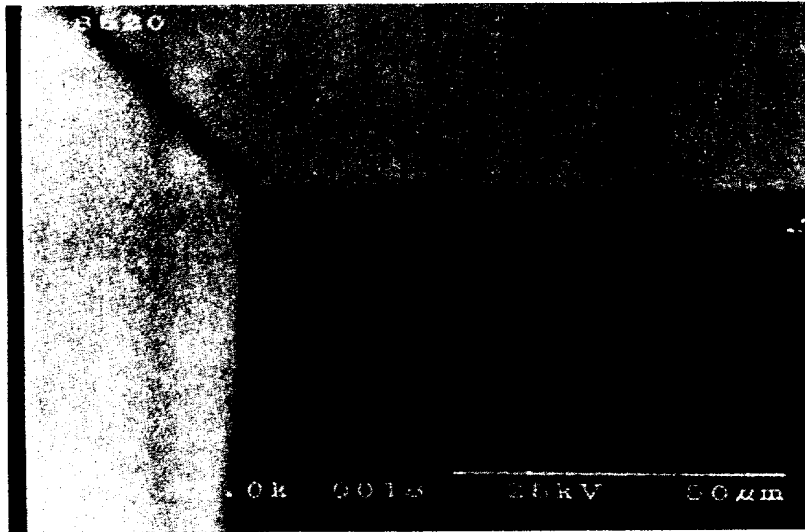


(c)

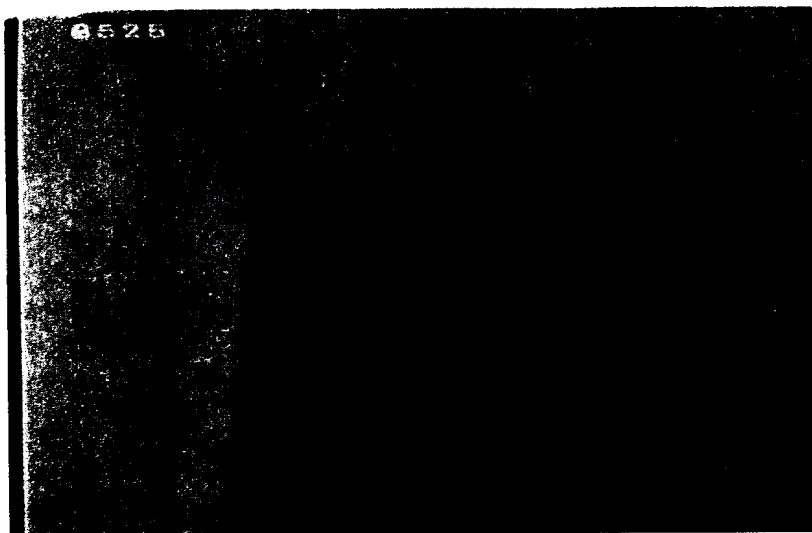


(d)

Fig. 9. SEM photographs of p-type silicon (100) surface etched at 85°C with various TMAH concentration: (c)10wt.% ;(d)15wt.% of TMAH solution in water.



(e)



(f)

Fig. 9. SEM photographs of p-type silicon (100) surface etched at 85°C with various TMAH concentration: (e)20wt.% ;(f)25wt.% of TMAH solution in water.

IV. 마이크로 열센서의 제조와 동작특성

1. NON 구조의 다이아프램 형성

마이크로 히터(발열부)와 열전소자를 이용한 열센서 시스템은 히터에서 발생된 열로부터 주변환경 요인(가스의 유량, 압력 등)에 따른 열량 변화분이 온도감지기에 의해 감지되어야 한다. 히터에서 온도감지기로의 열전달원리를 이용하는 마이크로 열센서들의 감도를 증가시키기 위해서는 히터와 패키지 혹은 기판사이의 열적 차단이 매우 중요하다. 그러나 대부분의 경우 다이아프램 구조의 실리콘 멤브레인을 이용하는 열센서들은 실리콘의 높은 열전도율 및 비교적 두꺼운 멤브레인의 사용 때문에 히터의 열적 차단이 우수하지 못하여 낮은 센서의 감도 및 높은 소비전력이 문제가 된다. 즉, 히터에서 발생된 열이 실리콘 기판이나 패키지 등을 통하여 외부로 유실되기 때문에 실제 온도감지기에 전달되는 양이 감소하게 되어 열전소자의 감도나 성능에 심각한 영향을 미치게 된다. 또한 낮은 전력으로 히터의 동작온도를 유지하기 위해 열용량이 상대적으로 적은 소자재료와 소자구조를 필요로 하게 된다. 이러한 외부와의 열적 차단과 열용량을 줄이기 위한 방법으로 약 $140 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 의 열전도도를 갖는 실리콘 기판 대신에 열전도도가 훨씬 낮은 Si_3N_4 막과 SiO_2 막이 주로 사용되고 있다. 그러나 Si_3N_4 및 SiO_2 막은 실리콘 기판에 인장스트레스 및 압축스트레스를 각각 나타내므로 이들 유전체의 단일막만으로는 기계적으로 안정된 멤브레인의 제조가 어렵다. 센서 응용을 위한 열차단막의 기계적 안정성을 개선하기 위하여 Si_3N_4 막과 SiO_2 막의 조합으로 이루어진 NO 혹은 NON 구조의 절연막 등이 제안되어 왔다(Dintner 등 1993), (Völklein, 1990). 그리고 이의 열용량을 줄이기 위하여 절연막이 형성된 실리콘 기판 부분을 이방성 식각법을 이용하여 완전히 식각하고 절연막 다이아프램만 남게 하여, 소자의 활성영역을 실리콘 기판과 완전히 격리시키는 방법이 보고된 바 있다(Klonz and Weimann, 1989), (Völklein and wiegand, 1990).

본 논문에서는 센서의 내부 또는 실리콘 기판과의 열적 차단을 위한 소자들에 널리 이용되고 있으며 열전도도가 약 $2.4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로서 실리콘 보다 훨씬 낮은 NON 구조의 절연막을 LPCVD 및 APCVD법으로 형성하고, 이방성 식각 기술을 이용하여 절연막 다이아프램을 형성하였다. 또한 이들 NON 구조의 절연막과 다이아프램에 대해 측정시스템(FLX 2300, Tencor)을 이용하여 기계적인 응력 및 열적 응력을 측정하였다.

1) NON 구조의 절연막 및 다이아프램 형성

NON 구조의 절연막을 형성하기 위한 기판으로 결정면이 (100), 비저항이 $2 \sim 3 \Omega \cdot \text{cm}$, 직경이 5인치, 두께가 $610 \sim 640 \mu\text{m}$ 인 붕소가 도핑된 p형 실리콘 웨이퍼를 사용하였다.

우선, 실리콘 기판위에 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 구조의 절연체 박막을 적층하기 위하여, 780°C 에서 LPCVD법으로 Si_3N_4 층을 상하 각각 1500 \AA 씩 증착하였고, 중간층의 SiO_2 층은 APCVD법을 이용하여 3000 \AA 증착하였다. SiO_2 층과 Si_3N_4 층 두께의 합을 각각 3000 \AA 으로 동일하게 하여 샌드위치 형태로 적층된 절연체의 전체 두께가 6000 \AA 이 되도록 하였다. 이와 같이 형성된 NON 절연막을 이용하여 기계적인 응력을 측정하였으며, NON 절연막 위에 사진식각 공정을 통해 패턴을 형성하였다. 패턴이 형성되지 않은 NON 절연막은 식각한 후 실리콘 이방성 식각을 행하여 NON 절연막 다이아프램을 제작하고 열적 응력을 측정하였다.

그림 10은 $\text{Si}_3\text{N}_4(1500 \text{ \AA})/\text{SiO}_2(3000 \text{ \AA})/\text{Si}_3\text{N}_4(1500 \text{ \AA})$ 적층 절연체 박막을 실리콘 기판위에 CVD공정을 이용하여 증착한 NON 절연막 및 다이아프램 제조 공정을 보여주고 있다.

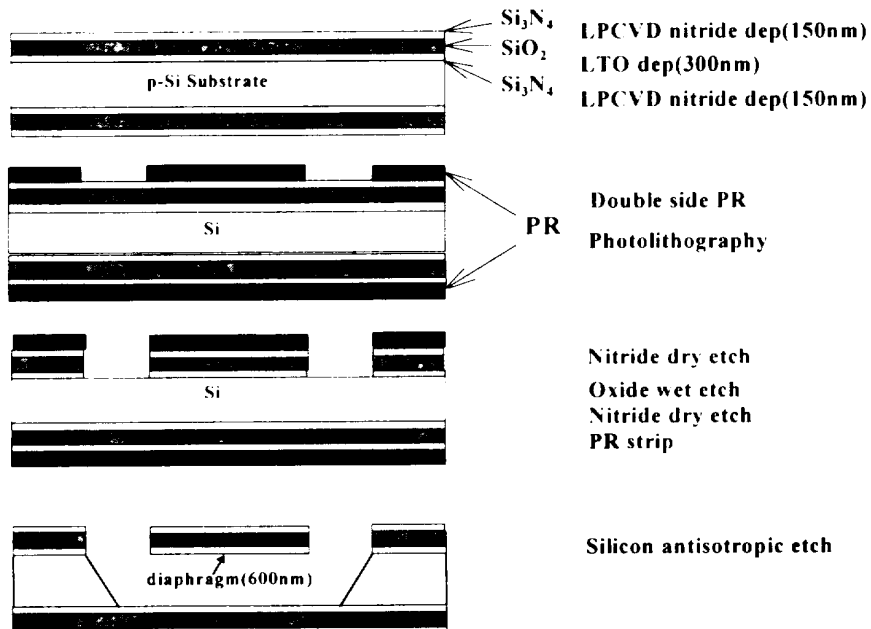


Fig. 10. Cross-sectional structure of insulator diaphragm using front-side silicon anisotropic etching techniques.

2) NON 절연막의 기계적 응력 측정

본 논문에서 측정된 박막에서의 응력은 박막과 기판의 경계면에 대해 수직방향으로 나타나는 수직응력(normal stress)과 경계면에서의 전단응력(shear stress)이 함께 포함된 평균응력이다.

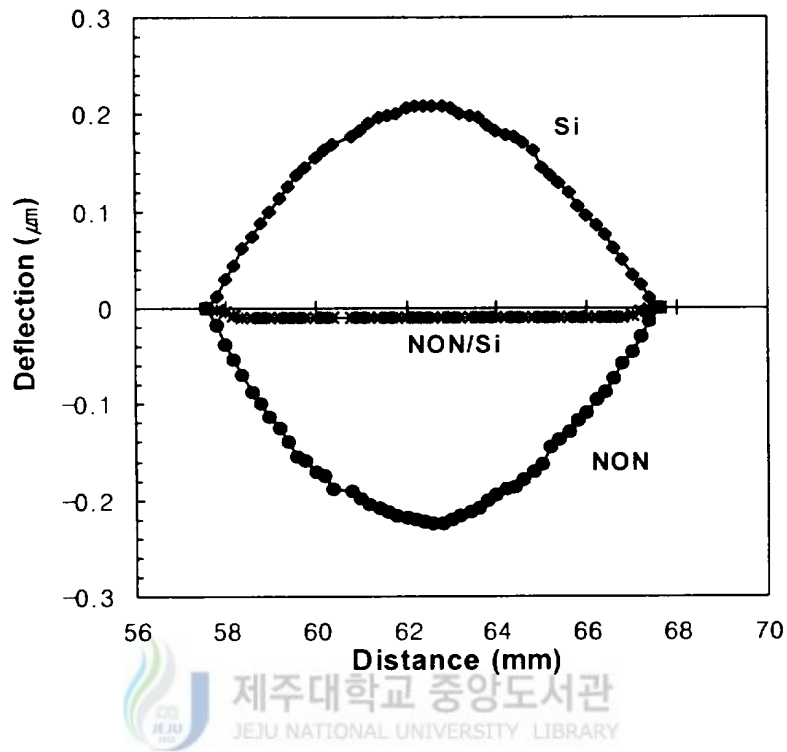


Fig. 11. Stress-deflection characteristics of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{LTO}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ substrate after wet oxidation.

그림 11에서 '*'표시는 산화처리를 한 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{LTO}(\text{low temperature oxide})/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 기판 전체의 최종적인 휨(deflection)을 측정한 결과이고, '◆'표시는 전체 휨을 측정한 경우와 동일한 위치에 있는 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{LTO}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 적층 절연체 박막을 제거한 후 실리콘 기판만의 휨을 측정한 결과이며, 또한 '■'표시는 앞의 두 결과의 차이.

즉 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{LTO}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 절연막 자체의 휨을 나타낸 것이다.

위의 결과로부터 실리콘 기판위에 NON 절연막을 적층했을 때가 거의 균일한 휨 특성을 보였다. 그러므로 습식 산화법으로 실리콘 기판위에 샌드위치 구조의 적층 절연막을 구성하는 경우 Si_3N_4 에서 나타나는 인장응력과 SiO_2 에서 나타나는 압축응력의 균형을 이루게 하여 결과적으로 평탄한 절연체 다이아프램을 형성할 수 있는 것으로 생각된다.

3) NON 절연막 다이아프램의 열적 응력 측정

실리콘 기판위에 적층 절연막을 형성할 때 두께 3000Å의 SiO_2 층을 APCVD법으로 증착하여, 기판 온도에 따른 적층 절연체 박막에 나타나는 수직응력과 전단응력이 함께 포함된 평균 인장응력의 변화를 측정하였다. 시편의 온도를 실온에서 400°C까지 상승시키면서 절연체 박막이 증착된 최종적인 휨을 측정하였고, 박막의 열 안정성을 고려하여 약 1시간 동안 400°C로 시편의 온도를 유지시켰다가 다시 실온까지 온도를 강하시키면서 온도 상승시의 경우와 동일한 위치의 표면에서 휨을 측정하였으며, 앞의 응력-휨(stress-deflection) 특성에서 언급한 것과 동일한 방법으로 적층 절연체 박막에 나타나는 응력을 측정하였다.

그림 12는 SiO_2 층을 APCVD법의 LTO로 증착하였을 때 기판 온도에 따른 적층 절연체 박막에 나타나는 인장응력 변화를 측정한 것이다. 여기서 '●'표시는 온도상승시, '■'표시는 온도강하시 측정한 결과이다.

측정한 결과 온도상승 및 온도강하시 응력의 변화범위가 각각 1 cm^2 당 약 4×10^9 dyne정도로써 거의 일정하였다.

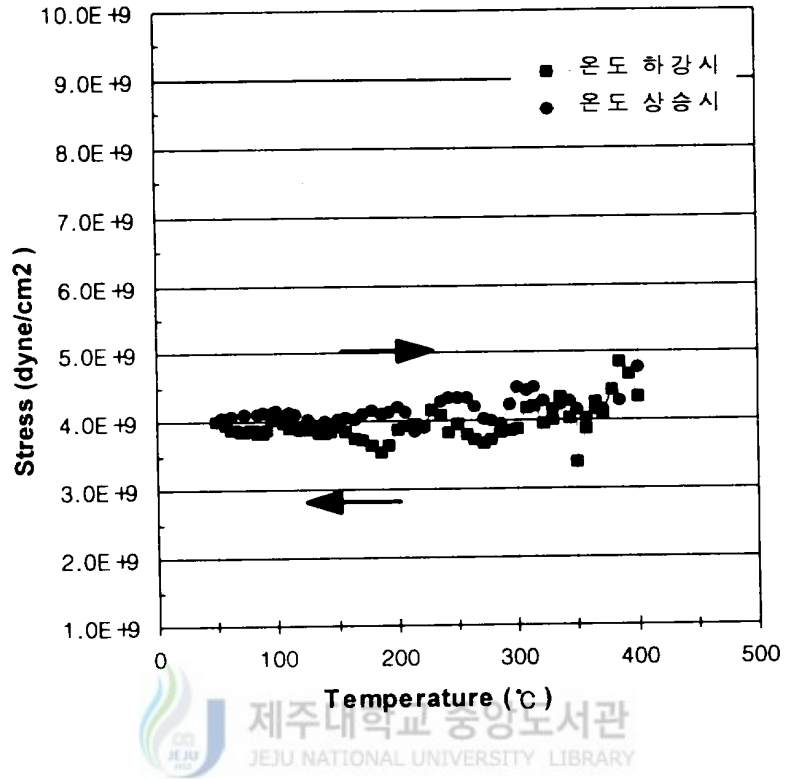


Fig. 12. Stress-temperature characteristics of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{APCVD}$ -deposited $\text{LTO}/\text{Si}_3\text{N}_4$ insulator.

본 논문에서는 스트레인 진단용 시험패턴 제작을 통하여 실리콘 기판에 $\text{Si}_3\text{N}_4(1500 \text{ \AA})/\text{SiO}_2(3000 \text{ \AA})/\text{Si}_3\text{N}_4(1500 \text{ \AA})$ 적층 절연체 박막을 형성하고 절연체 박막에 나타나는 응력 특성과 다이아프램의 열적 응력 특성에 대해 고찰하였다.

응력-휨 특성을 측정한 결과, 절연막의 위·아래층에 있는 Si_3N_4 박막의 전체 두

계와 중간층에 있는 SiO_2 박막의 두께를 동일하게 3000 Å으로 하였을 때, 적층 절연체 박막의 중간에 있는 SiO_2 층의 증착방법과는 거의 무관하게 Si_3N_4 박막에서 나타나는 인장응력이 SiO_2 박막에서 나타나는 압축응력보다 더 크다는 것을 알 수 있었고, 또한 이 적층 절연체 박막을 1,150 °C로 습식산화하여 결과적으로 다이아프램에 나타나는 인장응력과 압축응력의 균형을 SiO_2 층의 증착방법과 무관하게 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

응력-온도 특성을 측정한 결과, 적층 절연체 박막 중간에 있는 SiO_2 층을 APCVD법으로 도핑하지 않은 LTO로 하였을 경우가 LPCVD, PECVD법으로 SiO_2 층을 형성하였을 경우보다 산화처리전 기판의 온도변화에 대한 적층 절연막에서의 인장응력 변화범위가 가장 작게 나타나서, 중간의 SiO_2 층을 LTO로 하는 것이 기판의 온도변화에 따른 적층 절연막의 응력 안정성을 개선할 수 있다고 생각한다.

적층 절연체 박막에 작용하는 응력 특성을 기초로 하여, 실리콘 미세가공 기술로 적층 절연체 박막이 형성된 기판 뒷면의 실리콘을 이방성 식각하고, 적층 절연체 박막과 실리콘 기판 사이에 작용하는 응력의 균형을 얻기 위하여 이것을 1,150 °C에서 습식산화하여, 다이아프램 구조를 하는 전체두께 6000 Å의 평탄한 절연체 박막을 제작할 수 있었다.



2. 백금박막 히터와 온도감지기의 제조

1) 백금박막의 증착과 패턴 형성

고주파 스퍼터링법을 이용하여 백금박막을 증착하였다. 표 1은 이 때의 증착조건을 나타내고 있다. 증착비는 25Å/min, 증착된 막 두께는 약 5000Å, 증착시 기판의 온도는 상온으로 유지하였으며, 증착 후 500℃의 질소 분위기에서 30분 동안 열처리하였다.

Table 1. RF sputtering conditions for platinum thin films

Deposition conditions	Remarks
Working Pressure	2×10^{-4} torr
Ar/O ₂ Ratio	Pure Ar
RF Power	1kV, 15mA
Deposition Rate	25Å/min
Substrate Temperature	no heating

식각시 높은 온도조건(일반적으로 90℃ 이상)과 강력한 화학 작용으로 인해 패턴을 보호하고 있는 포토레지스트가 장시간 잘 견뎌내지 못하기 때문에 습식 식각을 통한 백금박막의 패턴 형성이 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 lift-off법을 이용하여 백금박막 패턴을 형성하였다(Elliott, 1982).

2) 백금박막 히터와 온도감지기의 동작 특성

표 1과 같은 조건으로 증착된 on-chip 백금박막 히터와 온도감지기의 저항은 5,000Å의 두께에서는 각각 약 35Ω 및 84Ω이었다. 백금박막 히터와 백금박막 온도감지기는 양호하게 동작하였으며 약 6,000Å의 절연막 다이아프램 위에 형성한 경우 히터 전력을 0.4W까지 공급하면서 동작시켰다.

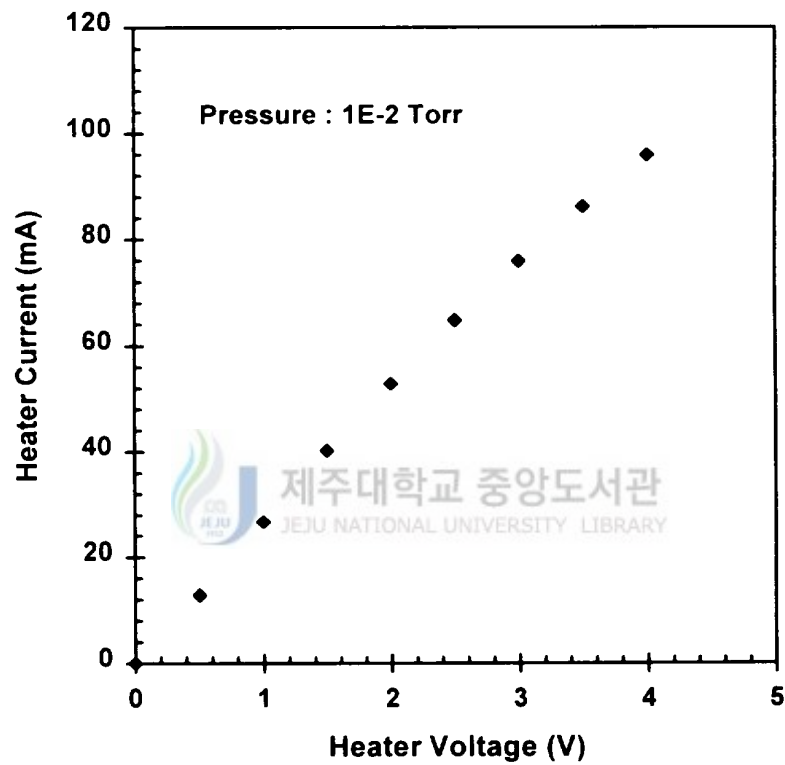


Fig. 13. Current-voltage characteristics of platinum thin film heater with applied voltage of 0~4V at 1×10^{-2} torr.

그림 13은 백금박막 히터에 공급된 전압과 히터전류의 상관관계를 보여주고 있는데, 히터전압을 4V까지 증가함에 따라 히터전류가 증가하는 좋은 선형성을 가짐을 알 수 있다. 그림 14는 백금히터에 공급된 전력과 백금박막 히터의 저항과의 상관관계를 보여준 것이다. 이 결과는 거의 직선관계를 보여주고 있으나 직선과의 편차는 백금저항이 양의 값을 갖는 저항의 온도계수(TCR : temperature coefficient of resistance)에 의한 것이라 생각된다. 히터에 공급된 전력과 온도와 상관관계는 다이아프램의 재질과 두께에 따라서 그리고 센서칩의 단열상태에 따라 현저한 차이가 있었다.

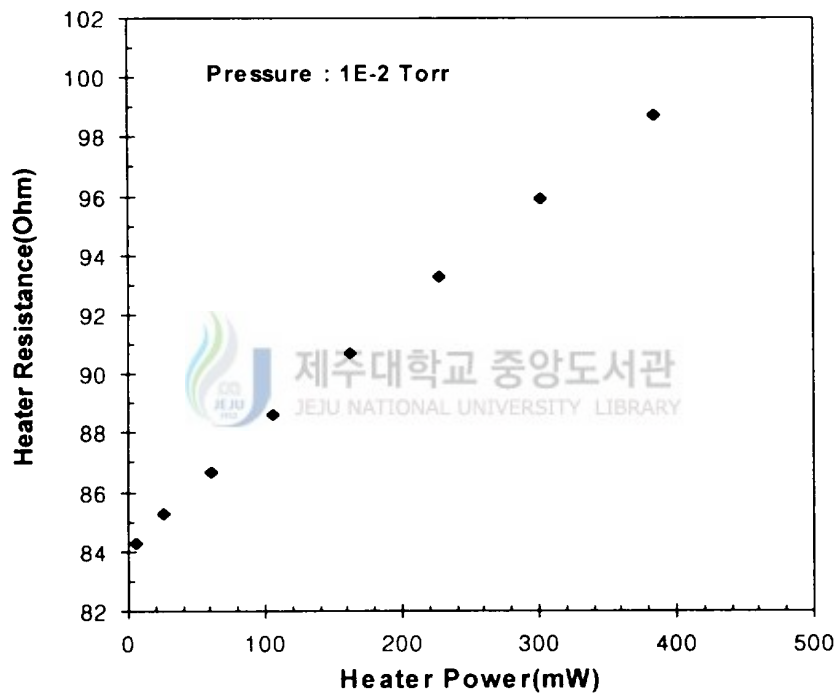


Fig. 14. Resistance of platinum thin film temperature detector as a function of heater input power up to 400mW at pressure of 10^{-2} Torr.

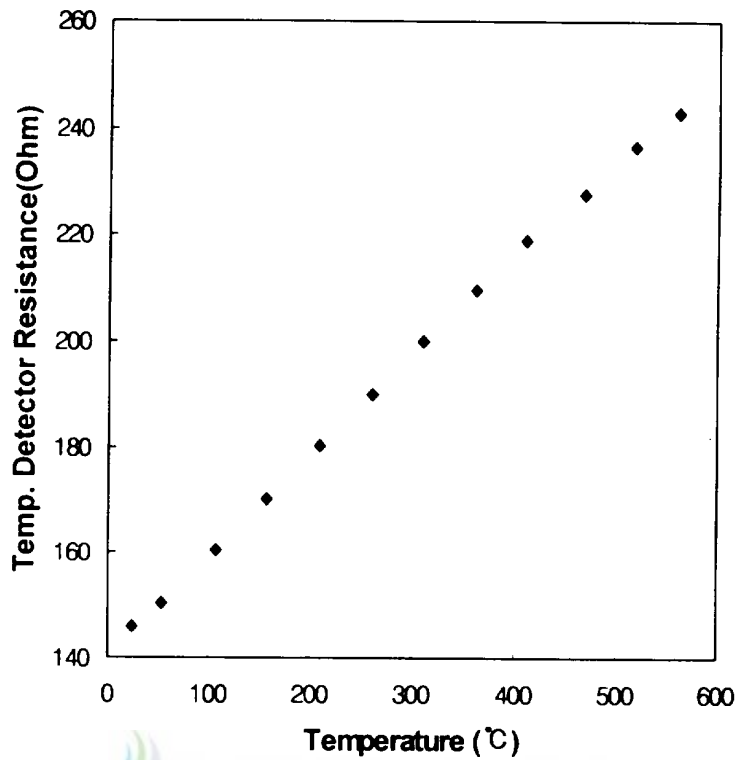


Fig. 15. Relationship between temperature and resistance of a platinum thin film temperature detector.

그림 15는 절연체 다이아프램 위에 형성한 백금박막 온도감지기의 온도 특성을 온도와 저항의 상관관계로 나타내었다. 백금박막 온도감지기의 동작 특성을 측정하기 위하여 백금 리이드선을 칩에 연결하고 열전대와 함께 고온로에 넣은 후 질소분위기에서 로의 온도 상승에 따른 온도감지기의 저항변화를 측정하였다.

측정한 온도 범위는 실온에서 600°C 사이였으며 백금박막 저항은 약 146Ω에서 243Ω까지 변화하였으며 그림 14에서 처럼 온도변화에 따른 저항변화는 직선성이 양호하였다.

저항의 온도계수(TCR : temperature coefficient of resistance)는 다음 식과 같이 정의된다.

$$TCR = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR(T)}{dT} \quad (15)$$

이 식에서 R_0 는 기준 온도(0°C)일 때의 저항값을 나타낸다.

백금저항의 온도계수의 특성은 백금저항이 벌크 특성을 나타내기 위해서는 백금박막의 두께가 최소 $1\mu\text{m}$ 이상이어야 하며(Baxter, 1980), 열처리 온도가 증가하면 저항의 온도계수도 증가하고 열처리 시간이 길어지면 박막의 특성이 벌크 성질에 가까워지는 특성이 있다.

위의 (15)식을 이용하여 계산한 백금박막 저항의 온도계수는 약 $0.00133^\circ\text{C}^{-1}$ 로 나타났으며 이는 벌크 백금저항의 온도계수 $0.0039^\circ\text{C}^{-1}$ 보다 약 3배 정도 작게 나타났다. 실험 결과 백금저항의 온도계수가 작은 이유는 백금박막의 두께가 $5,000 \text{ \AA}$ 으로 얇은 금속박막 내부의 구조적 결함이나 결정입계의 존재, 또한 박막 표면 자체의 전자 산란으로 인한 영향과 낮은 열처리 온도와 시간 때문이라고 생각된다. 그리고 백금선 결선으로 인한 측정 저항값의 변화에 따른 온도계수의 변화도 무시할 수 없을 것으로 생각된다.

3. 마이크로 열센서의 제조

마이크로 열센서는 발열부인 히터와 온도감지부인 온도감지기로 구성되어 있다. 히터는 얇은 절연막 위에 형성된 금, 백금 및 니크롬과 같은 금속박막을 이용하거나 다결정 실리콘막 내에 형성된 확산저항을 이용하여 제작할 수 있다. 온도감지기의 경우도 백금박막 저항을 이용하거나 다결정 실리콘을 이용한 n-poly Si/p-poly Si 열전대를 이용할 수 있다(Moser and Baltes, 1993). 본 논문에서는 미세가공 기술 및 박막형성 기술과 실리콘 공정기술을 활용하여 마이크로 가스유량 센서 및 진공 센서를 제작하였다.

그림 16은 본 논문에서 제조한 열센서의 제조 공정을 나타낸 것이다. 먼저 붕소가 도핑된 p형, (100), $4\sim 6\Omega\cdot\text{cm}$ 의 실리콘 웨이퍼를 기판으로 하여 제 4장 1 절에서와 같이 $\text{Si}_3\text{N}_4(1500\text{\AA})/\text{SiO}_2(3000\text{\AA})/\text{Si}_3\text{N}_4(1500\text{\AA})$ 의 적층 절연체 박막을 실리콘 기판위에 LPCVD 및 APCVD법을 이용하여 NON 구조의 절연막을 형성하였다. 그 다음 절연막 위에 백금박막을 약 5000Å 두께로 증착한 후 lift-off법을 이용하여 백금박막 패턴을 형성하였다. 백금박막 패턴을 형성한 후 500°C의 질소 분위기에서 30분 동안 열처리를 하였다. 표준 반도체 제조 공정이 끝난 웨이퍼를 이방성 식각액을 이용하여 전면 식각을 행하여 절연막 다이아프램을 형성하므로써 마이크로 열센서를 제조하였다. 이때 식각용액으로는 10wt.%의 TMAH수용액으로 90°C에서 식각을 행하였다.

그림 17은 제조한 얇은 절연막 다이아프램 위에 형성된 백금박막으로 이루어진 마이크로 열센서의 다이아프램 부위의 전자 현미경 사진이다. 이 다이아프램의 크기는 $1.5\text{mm}\times 2.1\text{mm}$ 이고 두께는 약 $1\mu\text{m}$ 정도였다.

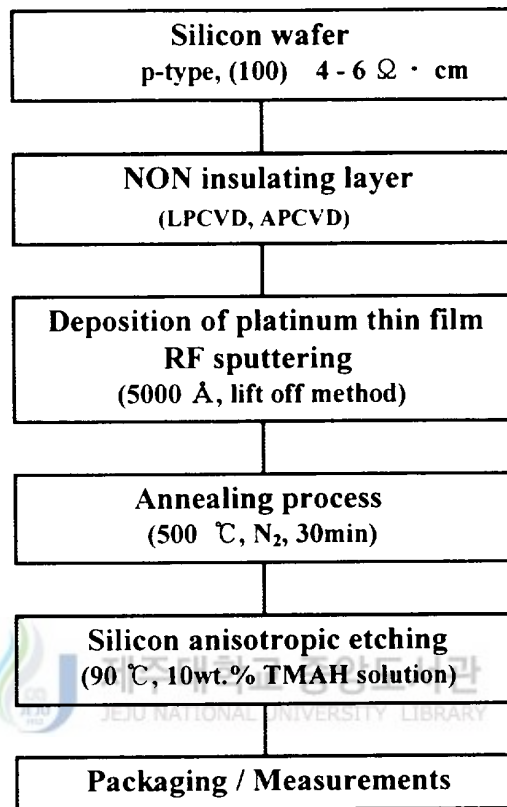


Fig. 16. Fabrication process of a thermal sensors

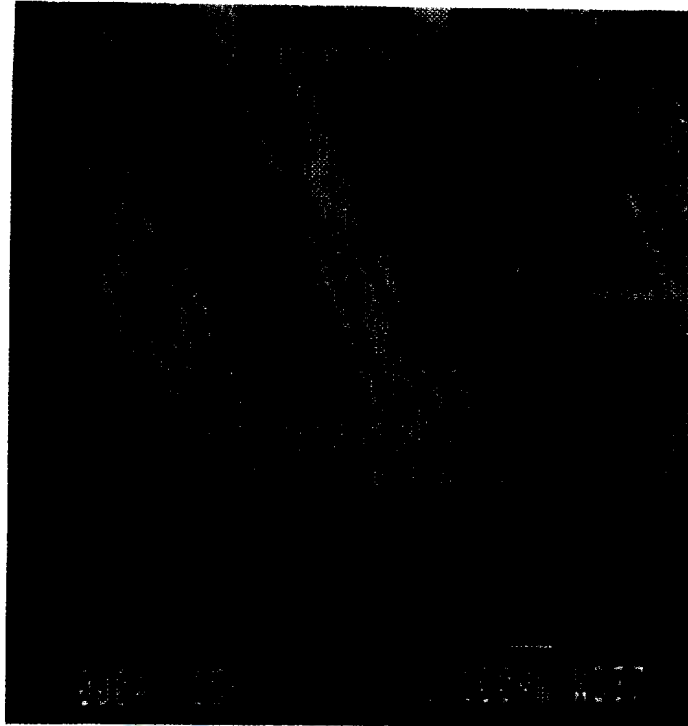


Fig. 17. SEM photograph for the thin insulating diaphragm of micro thermal sensor using platinum thin film.

4. 마이크로 열센서의 동작특성

그림 18은 본 논문에서 제작한 마이크로 가스유량 센서 및 진공 센서의 동작 특성을 측정하기 위한 측정시스템이다. 이 시스템은 가스유량 센서의 동작 특성을 측정하기 위한 flow-cell, 또는 진공 센서의 동작 특성을 측정하기 위한 진공 챔버와 진공펌프, 그밖에 가스공급기, MFC(mass flow controller) 및 계측시스템으로 구성되어 있다.

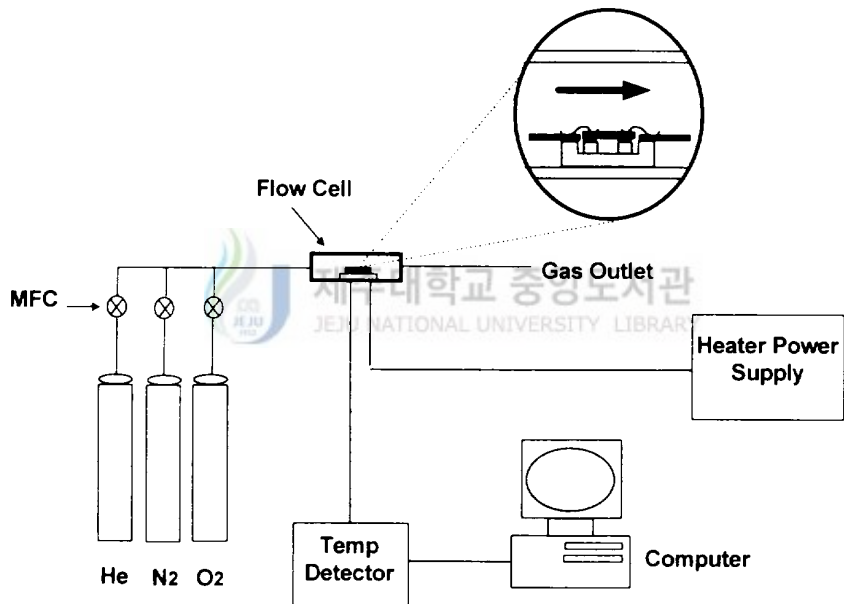


Fig. 18. Measurement system for micro thermal sensors.

제작한 열센서를 가스유량 센서 및 진공 센서에 적용하기 위해 패키징화 하여 측정 시스템의 flow-cell 또는 진공 챔버내에 장착하였다. 백금박막 히터에 공급된 전압은 히터저항의 크기에 따라 수볼트에서 십여볼트까지 인가하였고, 히터에는 약 1W 내외의 작은 전력을 공급하였다. 위와 같은 시스템을 구성하여 가스유량 센서 및 진공 센서의 동작 특성을 측정하였다. 추가로 헬륨가스에 산소의 양을 변화시키면서 첨가하여 산소량의 변화에 따른 가스유량 센서의 동작 특성을 측정하여 혼합가스의 함량에 따른 영향을 분석하였다.

1) 마이크로 가스유량 센서의 응답 특성

마이크로 가스유량 센서의 가스유량에 따른 동작 특성을 측정하였다. 고순도 질소가스(N_2)를 MFC(precision flow devices 501, U.S.A.)를 이용하여 0 sccm~500 sccm의 범위에서 가스 flow-cell로 주입하였으며 주입된 가스는 출구쪽이 대기압으로 유지된 상태에서 배기되었다. 이때 히터에 공급된 전압은 7V였다. 가스유량 센서의 응답 특성은 가스유량이 증가함에 따라 온도감지기의 저항값이 선형적으로 감소함을 그림 19에 나타내었다.

가스 흐름이 없을 때가 가스 흐름을 증가시키면서 측정했을 때 보다 저항값이 감소하는 이유는 가스 흐름이 없을 때는 기체의 강제대류에 의한 히터에서 외부로의 열전달을 거의 무시할 수 있고, 또한 히터에서 발생한 열량의 대부분이 열전도도가 매우 낮은 절연막 다이아프램만을 통하여 전달되어 히터에서 발생한 열량의 손실이 거의 일어나지 않기 때문에 온도감지기의 저항값이 높게 나타난 것으로 생각된다.

그림 20은 히터에 인가하는 전압을 4V에서 10V까지 변화시키면서 전류-전압특성으로부터 인가된 전력에 따른 저항의 상관 관계를 나타내었다. 가스 흐름이 없는 경우가 가스 흐름이 있는 경우보다 적은 전력으로 높은 저항변화를 볼 수 있었다.

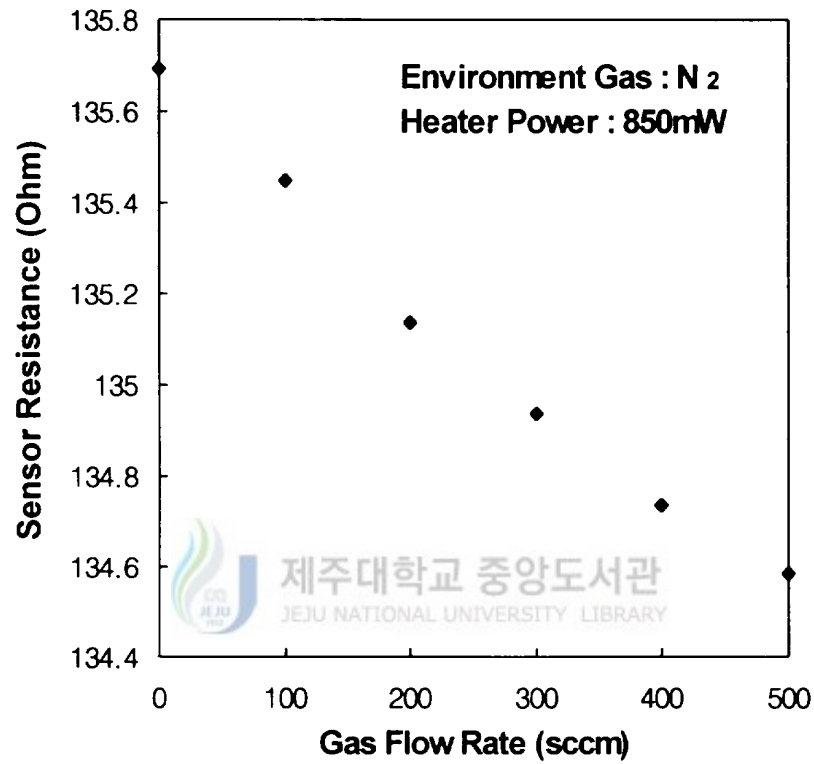


Fig. 19. Resistance response of temperature detector of the micro gas flow sensor on the various gas flow-rate from 0sccm to 500sccm (ambient gas:N₂).

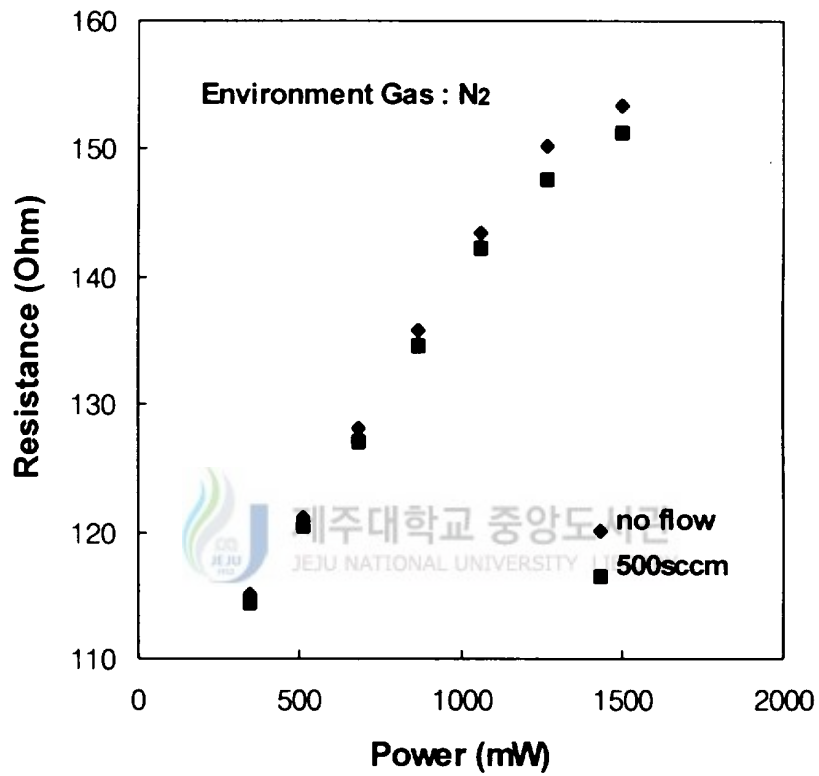


Fig. 20. Resistance response of micro gas-flow sensor on the various heater power.

그림 21은 flow-cell에 주입된 총 가스유량을 225 sccm으로 고정하고 헬륨 내의 산소를 0~18몰%의 범위에서 변화시켜 가면서 온도감지기의 저항변화를 측정 한 것이다. 이때 히터에 인가된 전압을 17, 18, 19V로 변화시키면서 가스유량 센서의 동작 특성을 각각 측정하였다. 측정된 결과로 부터 헬륨내의 산소의 함량에 따라 온도감지기의 저항변화가 선형적인 관계를 얻었다. 이는 헬륨과 산소의 열전도도의 차이에서 오는 결과로 헬륨($360.36 \text{ cal/s}\cdot\text{cm}\cdot^\circ\text{C}$)이 산소($63.64 \text{ cal/s}\cdot\text{cm}\cdot^\circ\text{C}$)보다 6배나 높은 열전도도를 갖기 때문으로 해석된다.

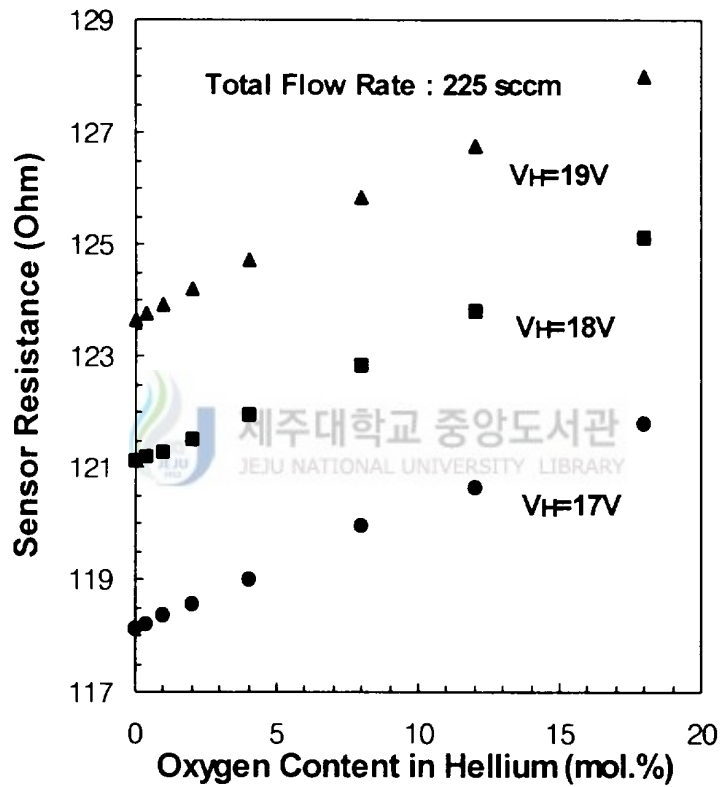


Fig. 21. Response of temperature detector of the micro gas-flow sensor on the various oxygen gas composition to helium gas from 0 mol.% to 18 mol.%.

2) 마이크로 진공 센서의 응답 특성

그림 18의 시스템을 이용하여 본 논문에서 제조한 백금박막을 이용한 마이크로 진공 센서의 진공도에 따른 특성을 측정하였다. 확산펌프 등을 이용하여 초기 진공을 5×10^{-5} Torr 얻은 후 고순도의 질소가스를 MFC와 진공밸브를 병용하여 미량의 가스를 진공챔버로 주입하여 원하는 진공도를 유지하였다. 1×10^{-3} Torr에서 1×10^{-2} Torr의 측정 범위내에서 진공 센서의 동작 특성을 측정하였다.

그림 22는 히터의 공급전력이 400mW일 때, 주입가스로 고순도 질소를 사용하여 진공도에 따른 온도감지기의 저항변화를 나타내었다. 이 결과 진공도가 1×10^{-2} Torr에서 1×10^{-3} Torr의 측정 범위내에서 온도감지기의 저항변화와 진공도 간의 기울기가 $2.3 \Omega/\text{dec}$ 를 가지는 좋은 반대수 관계를 보였다. 이는 복사에 의한 열손실을 무시했을 때, 히터에 의해 발생된 열은 다이어프램과 주위 공기를 통해 기판으로의 열전도에 의해 소실되기 때문이다. 압력이 1×10^{-3} Torr 이하에서는 다이어프램에 의한 열전도만이 작용하지만, 압력이 1×10^{-1} Torr 이상에서는 두 가지 열전달 기구(전도 및 대류)가 작용하여 다이어프램을 통한 열손실 보다 가스 흐름을 통한 열손실이 많아져서 상대적으로 낮은 저항값을 나타낸다.

그림 23은 히터의 공급전력을 25, 50, 75 및 100mW일 때의 온도감지기의 저항변화와 진공도의 상관관계를 보여주고 있다. 공급전력에 따른 효과는 공급전력이 높을수록 진공 센서의 감도, 즉 진공도에 따른 온도감지기의 저항변화가 커지는 경향을 보이고 있다. 또한 같은 진공도에서 온도감지기의 저항변화가 공급전력이 증가함에 따라 선형적으로 증가하며, 높은 진공도에서 더 큰 변화를 보여주고 있다.

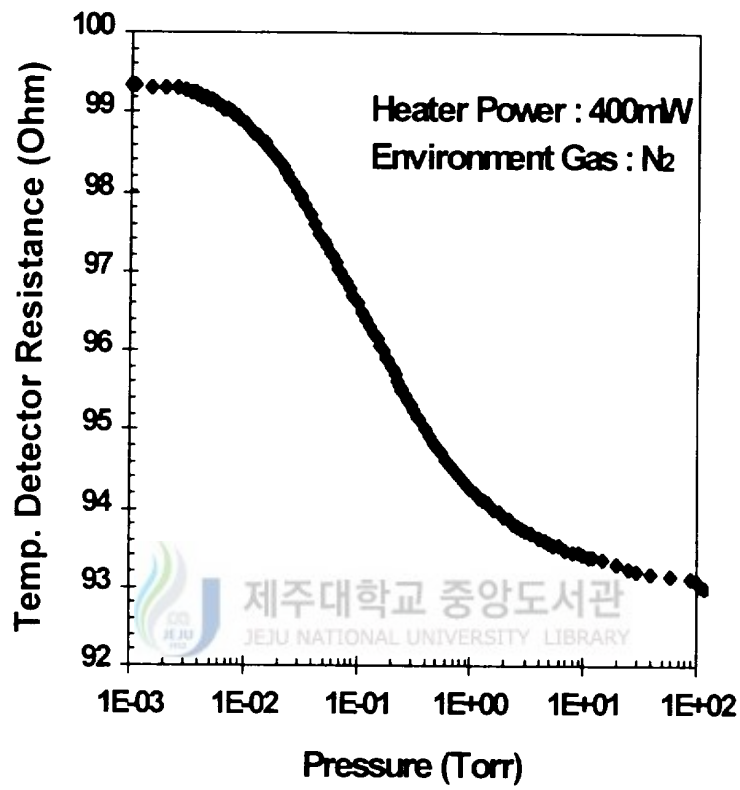


Fig. 22. Response of temperature detector of the micro vacuum sensor on the various chamber pressure with 400 mW heater power.

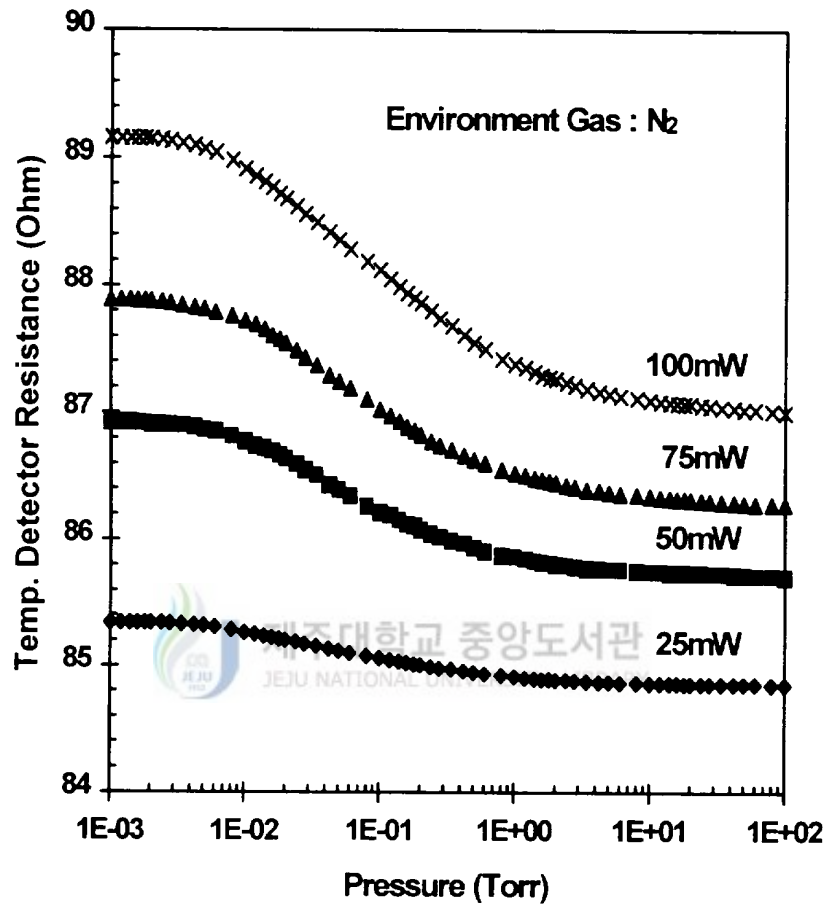


Fig. 23. Response of temperature detector of the micro vacuum sensor on the various chamber pressure with various heater power.

IV. 결 론

백금박막 히터와 온도감지기를 조합한 마이크로 열센서를 제조하고 가스유량 센서 및 진공 센서로서의 특성을 측정·분석하였다.

먼저 TMAH 수용액의 실리콘 이방성 식각 특성을 관찰한 결과 농도가 증가함에 따라 식각률이 감소하고, 온도가 증가함에 따라 식각률도 증가함을 알 수 있었다. 또한 TMAH wt.% 농도가 높은 25wt.%에서 표면이 깨끗하고 힐록이 없는 표면을 얻을 수 있었다. 위의 결과를 토대로 힐록 및 식각물 등을 고려하여 10wt.% TMAH 수용액, 90°C에서 이방성 식각을 행하여 마이크로 열센서를 제작하였다. 또한 $\text{Si}_3\text{N}_4(1500\text{Å})/\text{SiO}_2(3000\text{Å})/\text{Si}_3\text{N}_4(1500\text{Å})$ 구조를 LPCVD 및 APCVD법을 이용하여 절연체 박막 및 다이어프램을 형성하여 기계적 응력과 열적 응력을 측정하였다.

마이크로 가스유량 센서의 특성을 분석하기 위해, 0 sccm에서 500 sccm까지의 질소가스 유량 범위내에서 동작 특성을 측정하였다. 그 결과 가스 흐름이 증가할수록 센서의 저항이 선형적으로 감소함을 나타내었다. 또한 헬륨가스내의 산소함량에 따른 가스유량 센서의 동작 특성을 측정하였다. 총 가스유량을 225 ccm으로 고정시키고 헬륨내의 산소함량 변화에 따른 온도감지기의 저항변화를 측정한 결과 1차 비례하는 양호한 선형성을 보였다. 이는 헬륨 및 산소의 열전도도가 헬륨이 산소에 비해 월등히 큰 열전도도를 가지고 있기 때문으로 해석된다. 이러한 결과로부터 열전도도가 상대적으로 많은 차이를 나타내는 가스들로 혼합된 가스의 함량분석을 요하는 응용분야에 활용가능할 것이다.

진공 센서로써 진공도의 범위에 따른 백금박막 온도감지기의 저항 변화는 $1 \times 10^{-2}\text{Torr}$ 에서 $1 \times 10^0\text{Torr}$ 까지의 범위에서 양호한 반대수관계를 보였다. 또한 공급 전력에 따른 진공 센서에 미치는 영향은 공급전력이 증가함에 따라 진공 센서의 감도가 증가함을 알 수 있었다.

본 논문에서는 백금 박막을 이용한 마이크로 열센서를 제조하고 가스유량 센서

와 진공 센서로써의 동작 특성을 관찰한 결과 좋은 특성을 보였음을 알 수 있었다. 위의 결과로 부터 고정밀, 고성능, 소형, 고감도 열센서가 요구되는 자동차 엔진제어 시스템, 가전기기 및 의료기기 등 다양한 분야에서 활용 가능하리라 생각되며, 향후 신호처리 회로나 구동 회로 등을 동일 칩에 집적하여 스마트(smart) 센서를 구현함으로써 고성능, 다기능 및 높은 신뢰성을 가진 센서 구현이 가능할 것이다.

참고문헌

- Acero. M. C., J. Esteve, Chr. Burrer and A. Götz, 1995, "Electrochemical etch-stop characteristics of TMAH:IPA solutions," Sensors and Actuators A. 46-47. pp. 22-26.
- Baltes, H. and D. Moser, 1993, "CMOS vacuum sensors and other applications of CMOS thermopiles," The 7th Int'l Conf. Solid-State Sensors and Actuators pp. 736-741
- Baxter, R. D. and P. J. Freud, 1980, "Thin Film Resistance Thermometer Device with A Predetermined Temperature Coefficient of Resistance and Its Method of Manufacture", USA patent No. 4375056.
- Camon. H., and Z. Moktadir, 1995, "Atomic scale simulation of silicon etched in aqueous KOH solution," Sensors and Actuators A. 46-47, pp. 27-29.
- Chapman, A. J., 1984, "Heat Transfer," 4th ed., MacMillan, New York.
- Crary, Selden B. 1987, "Thermal Management of integrated Microsensors," Sensors and Actuators, 12. pp. 303-312.
- Dintner, Helmut et al, 1993, "AC-DC-mV-transfer with highly sensitive thin-film multijunction thermal converters," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 42, No. 2, pp. 612-614.
- Elliott, D., 1982, "Integrated circuit fabrication technology," McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 29.

- Esashi, M., 1991, "Micro Flow Sensor and Integrated Magnetic Oxygen Sensor Using It," *Transducers'91*, pp. 34-37.
- Gardner, Julian W., 1994, "Microsensors Principles and Applications," John Wiley & Sons.
- Hesketh, Peter J. and D. Jed Harrison, 1994, "Micromachining: The Fabrication of Microstructures and Microsensors," *The Electrochemical Society Interface*, pp. 21-25.
- Incropera, Frank P. and David P. Dewitt, 1993, "Introduction to heat transfer," John Wiley & Sons.
- Jaeggi, D., H. Baltes and D. Moser, 1992, "Thermoelectric AC power Sensor by CMOS technology," *IEEE Electron Device Letters*, vol.13, no.7, pp. 366-368.
- Kalvester, E., L. Lofdahi and G. Stemme, 1994, "A small-size silicon microphone for measurements in turbulent gas flows," *Sensors and Actuators A*, 45, pp. 103-108.
- Klonz, Manfred and Thomas Weimann, 1989, "Accurate thin film multijunction thermal converter on a silicon chip," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 38, No. 2, pp. 335-337.
- Lenggenhager, R., Henry Baltes, Jon Peer and Martin Forster, 1992, "Thermoelectric Infrared Sensors by CMOS Technology," *IEEE Electron Device Letters*, vol, 13, pp. 454-456.
- Lenggenhager, R., D. Jaeggi, P. Malcovati, H. Duran, H. Baltes, E. Doering, 1994, "CMOS Membrane Infrared Sensors and Improved TMAHW Etchant," *IEEE*, pp. 20.5.1-20.5.4.

-
- Mayer, F., O. Paul and H. Baltes, 1995, "Influence of Design Geometry and Packaging on the Response of Thermal CMOS Flow Sensors," The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX. Stockholm, Sweden, June 25-29, pp. 528-531.
- McGee, T. D., 1988, "Principles and Methods for Temperature Measurement," Wiley, New York.
- Meijer, G. C. and C. H. Voorwinder, 1991, "A Novel BiCMOS Signal Processor for Pt 100 Temperature Sensors with Microcontroller Interfacing," Sensors and Actuators A. 25, pp. 613-620.
- Merlos, A. , M. Acero, M. H. Bao, J. Bausells and J. Esteve, 1993, "TMAH/IPA anisotropic etching characteristics," Sensors and Actuators A. 37-38, pp. 737-743.
- Moser, David and Henry Baltes, 1993, "A high sensitivity CMOS gas flow sensor on a thin dielectric membrane," Sensors and Actuators A. 37-38, pp. 33-37.
- Moser, D., R. Lenggenhager and H. Baltes, 1991, "Silicon Gas Flow Sensors Using Industrial CMOS and Bipolar IC Technology," Sensors and Actuators A. 25-27, pp. 577-581.
- Oudheusden, B. W. van. and J. H. Huijsing, 1990, "An Electronic Wind Meter Based on a Silicon Flow Sensor," Sensors and Actuators, A21-A23, pp.420-424.
- Oudheusden, B. W. van and A. W. van Herwaarden, 1990, "High-Sensitivity 2-D Flow Sensor with an Etched Thermal Isolation Structure," Sensors and Actuators, A21-A23 pp. 425-430.

-
- Parameswaran, M., A. M. Robinson, Lj. Ristic, K. Chau and W. Allegretto,
1990, "A CMOS Thermally Isolated Fas Flow Sensor." Sensors and
Materials, 2. 1, pp. 17-26.
- Paul, O., A. Häberli, P. Malcovati, and H. Baltes, "Novel Integrated Thermal
Pressure Gauge and Read-Out Circuit by CMOS IC Technology," pp.
6.2.1-6.2.4.
- Qiu, Ernst Obermeier Li and Axel Schubert, 1995, "A Microsensor with
Integrated Heat Sink and Flow Guide for Gas Flow Sensing
Applications, "The 8th International Conference on Solid-State Sensors
and Actuators, and Eurosensors IX. Stockholm, Sweden, June 25-29, pp.
520-523.
- Regtien, P. P. L., 1990, "Linearization Circuit and Method," Patent Applic.
PCT IE/89/00865.
- Richard, J. Reay, Erno H. Klaassen and Gregory T. A. Kovacs, 1994,
"Thermally and Electrically Isolated Single Crystal Silicon
Structures in CMOS Technology," IEEE Electron Device Letters, vol. 15,
pp. 399-401.
- Ristic Ljubisa, 1994, "Sensor Technology and Devices," Chap 2-4, Chap 8,
Artech House.
- Seidel, H., L. Csepregi, A. Heuberger, H. Baumgärtel, 1990, "Anisotropic
Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions," J. Electrochem. Soc.,
Vol. 137, pp. 3626-3632.
- Siebe Bouwstra, Paul Kemna and Rob Legtenberg, 1989, "Thermally Excited
Resonating Membrane Mass Flow Sensor," Sensors and Actuators 20. pp.

- 213-223.
- Susumu Sugiyama, Osamu Tabata, Keiichi Shimaoka and Ryouji Asahi, "Micromachined Sensors Using Polysilicon Sacrificial Layer Etching Technology," pp. 6.1.1-6.1.4.
- Swart, N. R and A. Nathan, 1992, "Flow-Rate Microsensor Modelling and Optimization Using SPICE," Sensors and Actuators A. 34, pp. 109-122.
- Swart, Nicholas R. and Arokia Nathan, 1994. "Coupled Electrothermal Modeling of Microheaters Using SPICE," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 41, pp. 920-925.
- Swart, N., A. Nathan, M. Shams, M. Parameswaran, 1991, "Numerical Optimisation of Flow-Rate Microsensors Using Circuit Simulation Tools," pp. 26-29.
- Sze, S. M., 1994, "Semiconductor Sensors," chap2. chap7, JOHN WILEY & SONS.
- Tokudai Neda, Kenichi Nakamura and Tsugihiko Takumi, 1995, "A Polysilicon Flow Sensor for Gas Flowmeters," The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX. Stockholm, Sweden, June 25-29, pp. 548-551.
- Vink, J., H. J. Verhoeven, J. H. Huijsing, 1995, "Response Speed Optimization of Thermal Gas-Flow Sensors for Medical Application," The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX. Stockholm, Sweden, June 25-29, pp.524-527.
- Völklein, F., 1990, "Thermal conductivity and diffusivity of a thin film $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ sandwich system." Thin Solid Films, Vol. 188, pp. 27-33.

-
- Völklein, F. and A. Wiegand, 1990, "High sensitivity and detectivity radiation thermopile made by multi-layer technology," Sensors and Actuators, Vol. A24, pp. 1-4.
- Wu, M. P, Q. H. Wu and W. H. Ko, 1986, " A study on deep etching of silicon using ethylenediamine-pyrocatechol-water," Sensors and Actuators, vol. 9, pp. 333.
- Wu, X. P. and W. H. Ko, 1987, "A study on compensating corner undercutting in anisotropic etching of (100) silicon," Tech. Digest, Transducers 1987, Fourth Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, Tokyo, pp. 126.
- Yam, J. D. Ip, J. J. Santiago-Aviles and J. N. Zemel, 1991, "An Investigation of the Anisotropic Etching of (100) Silicon Using Cesium Hydroxide," Sensors and Actuators A. 29, pp. 121-126.



감사의 글

자신이 하고 싶은 일이면 용기와 자신을 갖고 해야한다고 말씀하시며, 오늘날 까지 저를 위해 모든 고생을 뒤로하신 어머님께 진심으로 감사드리며 이 영광을 돌려 드립니다. 그리고 항상 건강하시길 바랍니다. 또한 저에게 용기와 삶의 지혜를 가르쳐 주신 매형들과 누님들께 감사의 마음을 전합니다.

어려운 여건 속에서도 처음부터 끝까지 격려와 사랑으로 지도해 주시면서, 보다 나은 논문이 될 수 있도록 노력을 아끼지 않고 지도해 주신 이광만 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 교수님의 가르침에도 깊은 감사를 드립니다.

본 논문이 완성되기까지 바쁘신 가운데도 많은 시간을 들여 부족한 점을 지적해 주시고 심사해 주신 김경식 교수님과 고성택 교수님께도 감사를 드립니다. 또한 힘이 들 때마다 도움을 주셨던 도양희 교수님, 김경연 교수님, 강민제 교수님께도 지면으로나마 깊은 감사를 드립니다.

학교생활에 적응을 못해 방황했던 1·2학기 시절, 저에게 많은 충고와 용기를 주었고 어려운 일이 있을 때마다 도움을 주었던 장경훈 군에게도 감사의 마음을 전합니다. 또한 조교생활을 하면서 바쁠때마다 학과 일을 도맡아 처리하면서도 저의 일을 자신의 일처럼 도와주신 김경미 선생님과 김미정 선생님께도 진심으로 감사를 드리며 가정에 화목과 평화가 충만하시길 바랍니다.

대학원 생활동안 연구실에서 동고동락을 같이 하면서 많은 도움을 주었고 본 논문이 만들어지기까지 교정작업을 도와준 고성용 군과 박요섭 군에게도 진심으로 감사를 드리고 남은 대학생활을 잘 마무리하여 좋은 결과가 있기를 바랍니다. 또한 일년 동안 연구실에서 같이 생활하면서 저의 연구에 많은 도움을 주었던 송병철 군과 양정혜 양에게도 고마움을 전하며, 고봉성, 부유준군 등 전자공학과 재학생들에게도 고마움을 표합니다. 그리고 타대학교 대학원에서 연구하고 있으면서도 저의 연구에 많은 도움을 주었던 이석현, 임남주 군에게도 감사의 마음을 전하며 밝은 앞날이 있기를 바랍니다.

대학원 생활동안 힘들 때는 용기와 격려를, 나태할 때는 충고를 아끼지 않았고, 어렵고 힘든 일을 기꺼이 도와주었던 최경은 양에게도 진심으로 고마움을 표합니다. 서울에서 연구 과제를 수행동안 최대한의 배려를 아끼지 않았던 서울대학교 반도체 공동연구소의 박영준 소장님과 실장님 그리고 장비 담당 기사님들께도 진심으로 감사를 드리며 건강을 기원합니다.

끝으로 본 논문이 완성되기까지 불신양면으로 도움을 주신 많은 분들께 진심으로 감사드리며 항상 행복하고 건강하길 기원합니다.

1996. 12.

김 영 민 드림

