

마이크로 게이지를 이용한 다결정 실리콘 박막의 열팽창 계수 측정

채정현 · 이재열 · 강상원
한국과학기술원 재료공학과

Measurement of Thermal Expansion Coefficient of Poly-Si Thin Film Using Microgauge

Jung-Hun Chae, Jae-Youl Lee and Sang-Won Kang

Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejeon 305-701

(1997년 7월 30일 받음, 1997년 11월 26일 최종수정본 받음)

초 록 인이 높은 농도로 도핑되어진 LPCVD 다결정 실리콘 박막의 열팽창 계수를 마이크로 게이지법을 이용하여 측정하였다. 기존의 박막의 열팽창 계수 측정 법에서는 박막이 기판에 증착되어진 상태에서 측정이 이루어지므로, 기판의 탄성계수와 열팽창 계수를 미리 알고 있어야 한다. 이에비해 마이크로 게이지법에서는 박막의 열팽창 계수를 도출하기 위하여 기판의 탄성계수 값과 열팽창 계수 값을 필요로 하지 않는다는 장점이 있다.

마이크로 게이지법에서는 전류를 가할 경우 줄 발열에 의해 발생한 마이크로 게이지에서의 변위를 측정하고, 그 때 계산된 마이크로 게이지의 평균 온도의 관계에서 열팽창 계수를 계산한다.

다결정 실리콘 박막의 열팽창 계수는 $2.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었으며, 이 값들의 표준편차는 $0.24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 였다.

Abstract The thermal expansion coefficient of heavily doped LPCVD polycrystalline silicon (poly-Si) thin film was measured by microgauge method. In commonly used techniques, it is necessary to know the thermal expansion coefficient and Young's modulus of the substrate in order to investigate the thermal expansion coefficient of thin film. But it is not needed to know the thermal expansion coefficient and Young's modulus of the substrate in microgauge method because all measured parts are free standing above the substrate.

In this paper, the thermal expansion coefficient of poly-Si thin film was computed from the relation between measured displacement at the microgauge and calculated average temperature of the microgauge.

The experimental value for the thermal expansion coefficient of heavily doped poly-Si thin film was $2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, with standard deviation of $0.24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

1. 서 론

정보처리, 제어 시스템 등이 계속 소형화, 다기능화 되면서 전자소자 이외의 주변 소자들이 소형화, 지능화 될 필요가 있다. 수 μm 이하의 미세 구조를 형성할 수 있는 반도체 기술을 전자 소자 및 새로운 소자 개발에 응용하는 분야를 미소기전집적시스템(Microelectromechanical system, MEMS)이라고 하며 미국, 일본, 유럽 등에서 활발히 연구가 진행되고 있다.

마이크로 머신의 능동적 소자(Actuator)나 센서(Sensor) 구조체들은 소자의 전기적, 자기적, 열적 특성의 상호연관을 통해 그 기능을 수행한다. 예를 들어 기존에 연구되고 있는 구조체들은 정전기력, 전자기력, 열팽창력 등을 구동력으로 사용하고 있다. 특히 열팽창력은 긴 이동거리가 필요하거나 큰 힘을 필요로 하는 구조체에서 많이 사용되고 있다¹⁻³⁾.

박막의 열팽창 계수 값은 이러한 열구동형 미소 구동 소자를 설계하거나, 증착 과정에서 생긴 박막의 잔류응력을 측정하는데 있어서 반드시 필요하다⁴⁻⁵⁾. 기존의 경우에는 박막이 기판 위에 증착되어 붙어 있는 상태에서 레이저 등

을 이용한 광학적 측정방법이 연구되어 왔다⁴⁻⁵⁾.

기판에 박막을 증착한 후에는 박막과 기판의 열팽창 계수의 차이로 인해 응력이 생기고, 이 응력으로 인해 기판에 곡률이 생기며 구부러지게 된다. 이때 기판의 곡률을 온도에 따라 측정, 해석하여 박막의 열팽창 계수를 계산할 수 있다. 이 방법은 기판의 열팽창 계수와 박막의 탄성계수, 박막의 열팽창 계수 등을 변수로 사용하기 때문에 최소한 종류가 다른 두 개 이상의 기판에 대해 각각 동일한 조건의 박막을 증착하여 온도에 따른 응력을 측정해야 한다. 또한 박막의 열팽창 계수를 계산하기 위해서는 박막이 증착되는 기판의 열팽창 계수 값과 탄성계수 값을 알아야 한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하여 기판의 탄성계수 값과 열팽창 계수 값을 필요로 하지 않고, 전도성 박막의 열팽창 계수 값을 측정할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 그림 1은 박막의 열팽창 계수를 측정하기 위해 사용된 마이크로 게이지의 개략도이며, 다결정 실리콘 박막에 대하여 열팽창 계수 값을 측정하였다.

2. 소자의 제작 및 측정방법

소자의 제작은 4인치, n형 (100) 웨이퍼 위에 이루어졌

다. 실리콘 웨이퍼 표면에 열산화막을 1000Å 두께로 만들어 다음에 증착될 실리콘 질화막에 대한 응력 버퍼층으로 쓰일 수 있도록 하였다. 소자가 기판과 전기적으로 절연될 수 있도록 LPCVD 실리콘 질화막을 1000Å 두께로 증착하였다. 실리콘 질화막 위에 2μm 두께로 PSG (Phosphosilicate glass)를 증착하였는데, 이 PSG 층은 이후에 증착되어질 다결정 실리콘 박막 구조체를 기판 위에 띄우기 위한 희생층의 역할과, 구조체가 충분한 전도성을 갖도록 도핑될 인의 소스 역할을 동시에 하게 된다. 구조체로 쓰일 다결정 실리콘 박막을 3μm 두께로 증착하였고, 다결정 실리콘 박막 위에 2μm 두께의 PSG를 증착하였다. 1000°C에서 10시간 동안 열처리하여 다결정 실리콘 박막층 위와 아래의 PSG 층으로부터 인이 다결정 실리콘 박막 층으로 충분히 도핑될 수 있도록 하였다. 그림 2(a)는 이 상태에서의 구조적 그림을 나타낸다. BOE (Buffered Oxide Etch)로 습식 에칭하여 다결정 실리콘 박막 윗부분의 PSG를 모두 제거하고 6000Å의 APCVD silicon undoped oxide를 증착하였다. APCVD undoped silicon oxide은 다결정 실리콘 박막을 건식 에칭하는데 하드 마스크로서 사용되어진다. APCVD undoped silicon oxide에 포토 리소그래피 작업을 한 후 건식 에칭하여 다결정 실리콘 박막에 대한 하드 마스크를 제작하였다. 이 마스크를 이용하여 다결정 실리콘 박막의 건식 에칭 작업을 하였으며 그림 2(b)에 이를 나타내었다. 다결정 실리콘 박막을 건식 에칭한 후 마스크로 쓰였던 APCVD undoped oxide를 건식 에칭하여 모두 제거하였다. 외부와의 전기적인 연결을 위해 Al을 증착하고 포토 리소그래피 작업을 통하여 contact pad 패턴을 제작하였다. 마지막으로 구조체를 기판 위에 띄우기 위해 희생층을 습식 에칭하였으며 그림 2(c)에 이를 나타내었다. 만들어진 소자는 외부에서 전류를 가하고 측정할 수 있도록 25.4μm (1mil) 두께의 알루미늄 와이어를 contact pad에 연결하였다.

그림 1은 이러한 방법으로 제작되어진 마이크로 게이지

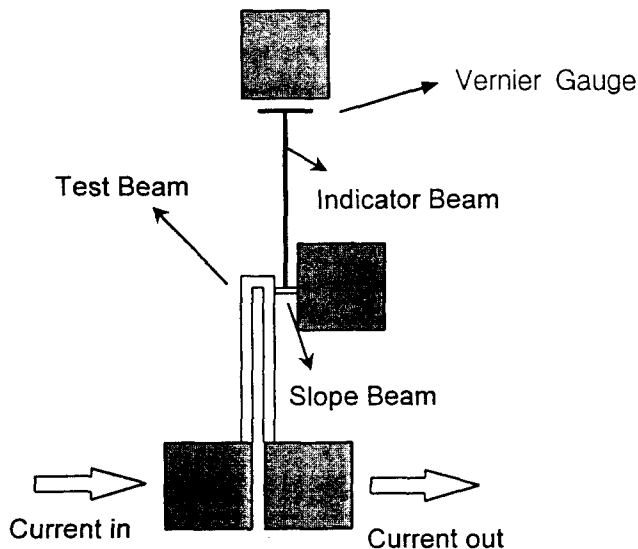


Fig. 1. Schematic diagram of the microgauge. (plain figure)

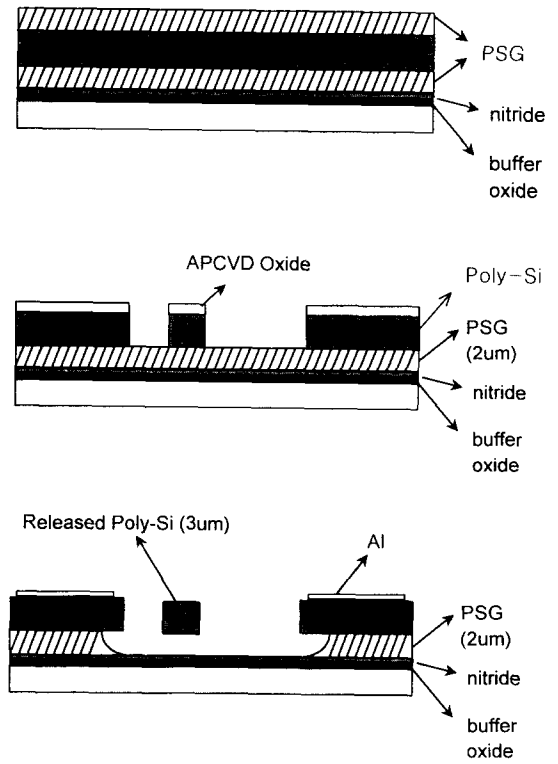


Fig. 2. Fabrication sequences of microgauge and microbridge. (cross section)

- (a) Annealing at 1000°C for 10 hours after PSG deposition for phosphorus doping to the poly-Si layer.
- (b) Dry etching of poly-Si with APCVD undoped oxide hard mask.
- (c) Released poly-Si structure after time control wet etching of PSG layer.

의 구조적인 평면도를 나타낸다. 마이크로 게이지의 구동은 게이지에 흐르는 전류에 의한 테스트 빔의 줄 발열로 이루어진다. 줄 발열에 의해 테스트 빔에서 발생한 열팽창의 정도를 버어니어 게이지를 이용하여 증폭하여 측정할 후, 측정된 열팽창의 크기와 가해진 전류 및 전압의 관계에서 다결정 실리콘 박막의 열팽창 계수 값을 도출해 내었다.

3. 이 론

(1) 역학적 이론

그림 1은 마이크로 게이지 구조의 개략도를 나타낸다. 테스트 빔, 슬로프 빔, 인디케이터 빔 부분은 기판과 독립적으로 기판 위에 떠 있으며, 같은 색으로 나타낸 패드 부분은 기판에 붙어있다. 테스트 빔에 전류를 흐르게 하면 전류의 제곱과 저항의 곱에 비례하는 크기의 줄 발열이 발생한다. 이때 발생하는 테스트 빔의 열팽창은 슬로프 빔에 변형을 일으키고, 이 변형은 버어니어 게이지에서 증폭되어 측정된다. 그림 3(a)과 그림 3(b)은 전류를 가하기 전과 후의 슬로프 빔을 나타내는 그림이다. 마이크로 게이지의 버어니어 게이지는 최소 0.2μm의 변위를 측정할 수 있도록 설계되어 있다. Linwei Lin⁶⁾ 등에 의하면 이러한 원리를 갖

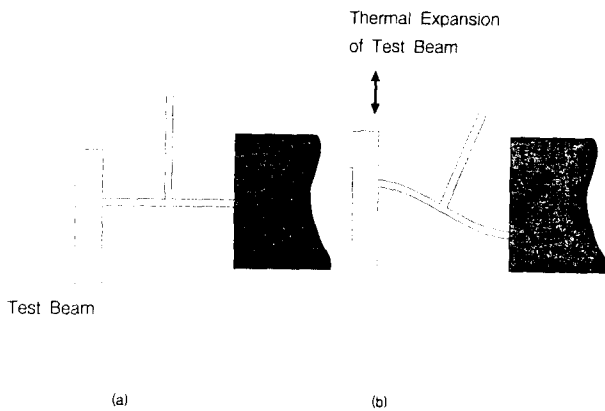


Fig. 3. Detail View near the slope beam.

(a) no bending of the slope beam if no current was applied.

(b) bending of the slope beam due to thermal expansion of the test beam.

는 마이크로 게이지에서의 변위는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\delta = \frac{3L_i L_s c_f \varepsilon}{2L_s} \quad (1)$$

δ : 버어니어 게이지에서 측정된 변위

L_i : 인디케이터 빔의 길이

L_s : 슬로프 빔의 길이

L_t : 테스트 빔의 길이

ε : 마이크로 게이지의 테스트 빔에 나타나는 변형

슬로프 빔은 그림 3에 나타난 것처럼 변형을 일으키나 그림 3(b)에 나타난 슬로프 빔의 변형은 빔 이론에 의한 연속적인 곡선의 형태로 나타나지 않는다. 이는 슬로프 빔 중앙에 붙어있는 인디케이터 빔의 존재로 인해 슬로프 빔 중앙 부분은 곡선의 형태로 변형이 일어나지 않기 때문이다. 이러한 점을 보정하기 위해 보정 요소로서 c_f 를 정의하고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$c_f = \frac{1-d^2}{1-d^4} \quad (2)$$

$$d = \frac{w_i}{L_s}$$

w_i : 인디케이터 빔의 폭

L_s : 슬로프 빔의 길이

마이크로 게이지에 전류를 가할 경우 생기는 열팽창에 의해 발생하는 변형은 다음과 같이 주어진다.

$$\varepsilon = \alpha \Delta T = \alpha(T_{avr} - T_0) \quad (3)$$

α : 박막의 열팽창 계수

T_{avr} : 마이크로 게이지의 전체의 평균 온도

T_0 : 기판의 온도

식 (1) ~ (3)을 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\alpha = \frac{2L_s \delta}{3L_i L_s c_f (T_{avr} - T_0)} \quad (4)$$

즉, 전류를 가할 경우에 마이크로 게이지에서 측정되는 평균 변위 (δ)와 전류로 인해 상승된 마이크로 게이지의 평균 온도 (T_{avr})를 알고 있다면 식 (4)의 나머지 변수는 모두 값을 알고 있는 실험변수이므로 박막의 열팽창 계수 α 를 도출할 수 있다.

(2) 전기적 이론

식 (4)에 의하면 박막의 열팽창 계수를 측정하기 위해서는 마이크로 게이지 구동시의 평균 온도를 알아야 한다. 마이크로 게이지의 평균 온도를 계산하기 위해서는 마이크로 게이지를 구성하는 다결정 실리콘 박막의 온도에 따른 비저항 특성을 알아야 한다. 특히, 매우 높게 도핑되어진 다결정 실리콘 박막의 경우 비저항의 온도에 따른 특성은 다음과 같은 선형적 관계를 따른다고 알려져 있다⁷⁾.

$$\rho_0 = \rho_0 [1 + \xi(T - T_0)] \quad (5)$$

ρ_0 : 온도 T_0 에서 박막의 비저항

ξ : 비저항의 온도 비례계수

이후에 기술할 실험을 통하여 ρ_0 값, ξ 값, T_0 값을 결정하였으며, 식 (5)의 선형적 관계도 확인하였다.

(3) 열전도 방정식

그림 1과 같은 마이크로 게이지의 테스트 빔에 전류를 가하면 테스트 빔에서는 줄 발열이 생겨 마이크로 게이지에 발열이 생기게 된다. 이때 발생하는 열은 마이크로 게이지의 테스트 빔을 통해 전도되어 contact pad로 빠져나가며, 공기 중으로의 대기와 복사 등에 의해서도 방출되어진다. 전류가 흐를 경우 상승되어진 마이크로 게이지의 평균 온도를 계산하기 위해 그림 4와 같은 폭 w , 두께 t , 길이 Δx 의 크기를 가지는 마이크로 브리지의 미세 요소를 고려하였다. 이러한 미세요소에서의 열평형 방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$Q_{total} = P_g + Q_{convection} + Q_{convection} + Q_{radiation} \quad (6)$$

Q_{total} = 미세 요소의 내부 에너지 변화율

Q_i = i 에 의해 손실되거나 얻어지는 에너지

P_g = 줄 발열에 의한 발열량

식 (6)에서 Q_{total} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{total} = c \rho_m w t \Delta x \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (7)$$

c = 다결정 실리콘 박막의 비열

ρ_m = 다결정 실리콘 박막의 밀도

w = 미세 요소의 폭

t = 미세 요소의 높이

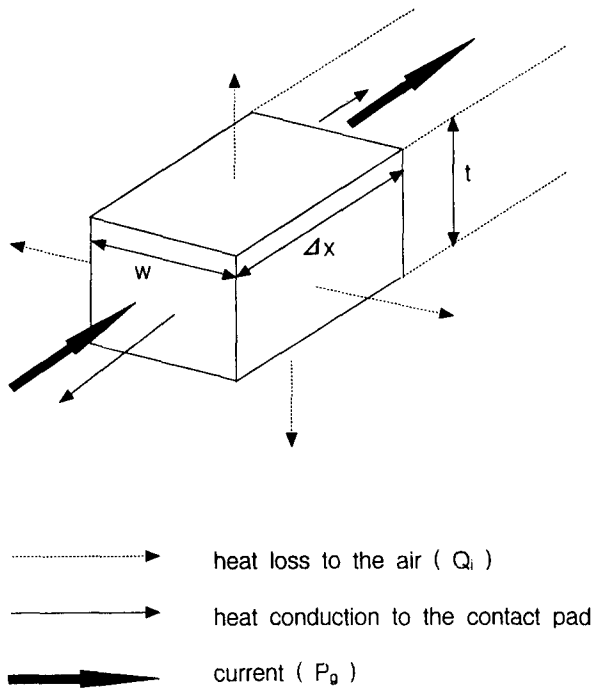


Fig. 4. Differential element of the microbridge structure.

Δx = 미세 요소의 x 방향으로의 길이
 u = 미세 요소의 평균 온도

전류에 의해 발열되는 양 P_g 는 다음과 같다.

$$\rho_0(u) = \rho_0[1 + \xi(u - T_0)] \quad (8)$$

$$P_g = J^2 \rho_0(u) w t \Delta x = J^2 \rho_0 w t \Delta x [1 + \xi(u - T_0)] \quad (9)$$

J = 미세 요소에 흐르는 전류 밀도

ρ_0 = 온도 T_0 에서의 비저항

ξ = 비저항의 온도에 대한 선형 비례상수 (TCR)

미세 요소의 열손실은 크게 두 가지가 존재한다. 첫 번째는 공기로의 열전달과 복사에 의한 열손실이고, 두 번째는 발열이 생기는 테스트 빔을 따라 contact pad를 통해 기관으로 빠져나가는 열손실이다. 미세 요소에서 열전달에 의해 빠져나가는 열량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{conduction} = -kwt \left(\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_x - \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{x+\Delta x} \right) \quad (10)$$

k = 테스트 빔을 구성하는 박막의 열전도도

$u[x, t]$ = 어떤 시간 t 에서 좌표 x 의 온도

본 연구에서 실험한 바와 같이 10mtorr 정도의 진공 챔버 안에서 마이크로 게이지를 구동하면 공기 중으로의 열손실의 정도는 발열량에 비해 무시할 수 있는 정도가 된다. 또한 전류에 의한 발열 정도가 작아 마이크로 게이지의 평균 온도가 600°C 이하라면 복사에 의한 열손실도 테스트 빔에서의 발열량에 비해 무시할 수 있다. 이러한 점들을 고려하고 식 (6) ~ (10)을 정리하면 다음과 같다.

$$c\rho_m w t \Delta x \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) = J^2 \rho_0 w t \Delta x [1 + \xi(u - T_0)] - kwt \left(\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_x - \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{x+\Delta x} \right) \quad (11)$$

정상상태 (steady state)를 고려하면 식 (11)은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{J^2 \rho_0 \xi}{k} u + \frac{J^2 \rho_0}{k} (1 - \xi T_0) = 0 \quad (12)$$

위 식 (12)은 정상상태에서 마이크로 게이지의 열 분포를 나타내는 편미분 방정식이며, 이 편미분 방정식에 적절한 경계조건을 대입하여 마이크로 게이지의 열분포를 계산할 수 있다.

마이크로 게이지의 평균 온도를 계산하기 위하여 마이크로 게이지를 그림 5과 같이 T형 마이크로 브리지로 모델링하였다. 여기서 L 은 마이크로 게이지 테스트 빔의 전체 길이, L_3 은 슬로프 빔의 길이, w_1 과 w_2 는 각각 테스트 빔과 슬로프 빔의 폭을 나타낸다. L_1 부분의 온도 분포식을 $u_1[x]$, L_2 부분의 온도 분포식을 $u_2[x]$ 라 한다.

이후에 기술할 실험 결과에서 ξ 값이 음의 부호를 갖는 것으로 측정된 것을 고려하고 위의 식 (12)을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} - Au_i + B = 0 \quad (13)$$

$$A = \frac{J^2 \rho_0 |\xi|}{k_b}, \quad B = \frac{J^2 \rho_0 |\xi|}{k} [1 + |\xi| T_0]$$

식 (13)은 다음과 같은 경계 조건을 갖는다.

$$u_1[x=0] = u_2[x=L] = T_s \quad (14)$$

$$-kwt \left[\frac{\partial u_1}{\partial x} \right]_{x=L_1} - kwt \left[\frac{\partial u_2}{\partial x} \right]_{x=L_1} = \frac{kwt}{L_3} (u_1[x=L_1] - T_s) \quad (15)$$

여기서 T_s 는 기관의 온도이며 상온과 같다고 생각할 수 있다.

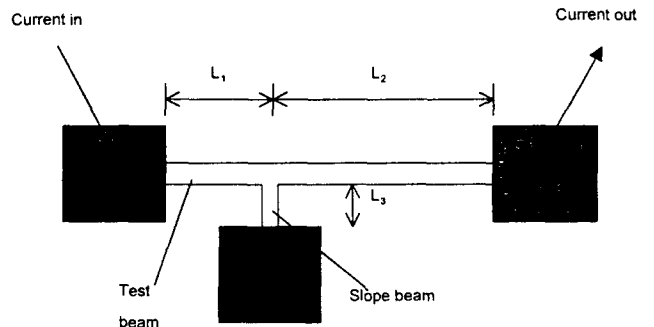


Fig. 5. Simple modeling of microgauge as T-shaped microbridge.

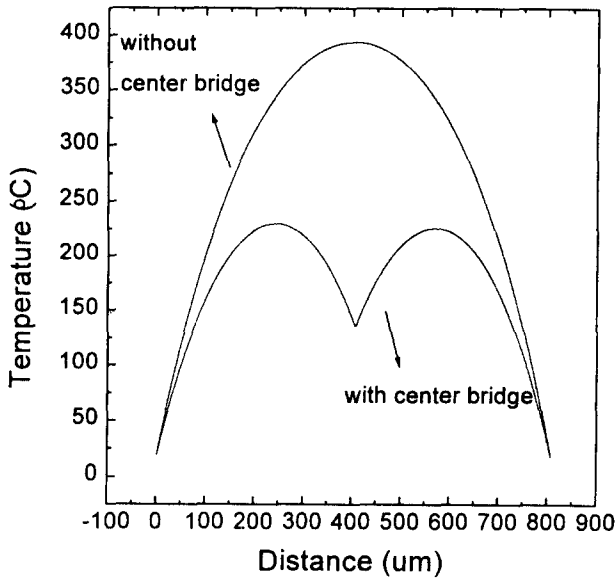


Fig. 6. Temperature profile of the microgauge. Temperature profile is lowered due to the presence of the slope beam (center bridge).

위의 경계조건을 이용하여 식 (13)을 풀면 마이크로 게이지 테스트 빔의 길이 방향에 따른 온도를 알 수 있으며, 계산된 온도 분포식을 거리에 따라 적분하고 테스트 빔의 전체 길이로 나누면 마이크로 게이지의 평균 온도를 알 수 있다. 다음의 그림 6은 실제 제작된 마이크로 게이지중 하나인 $L=800\mu\text{m}$, $L_1=407.5\mu\text{m}$, $L_2=400\mu\text{m}$, $L_3=20\mu\text{m}$, $t=3\mu\text{m}$ 인 마이크로 게이지에 전류 $500\mu\text{A}$ 를 가할 경우에 대해 마이크로 게이지의 온도분포를 모의실험한 결과이다. 슬로프 빔을 통해 빠져나가는 열손실로 인해 슬로프 빔이 없을 경우에 비해 전체적인 온도 분포가 낮아졌음을 알 수 있다.

4. 실험 및 결과

(1) 비저항의 온도 의존성

다결정 실리콘 박막 비저항의 온도 의존성을 측정하기 위

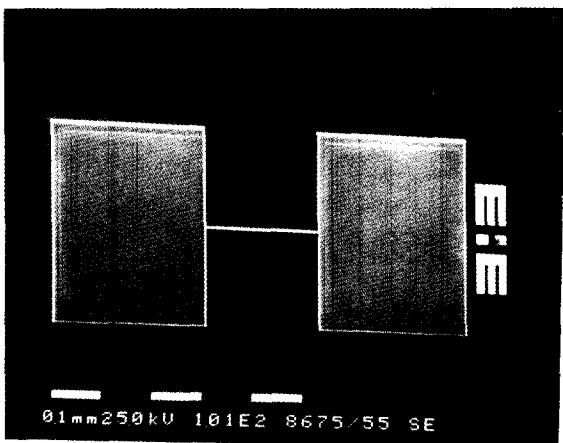


Fig. 7. SEM image of microbridge; bridge length = $300\mu\text{m}$, bridge width = $3\mu\text{m}$.

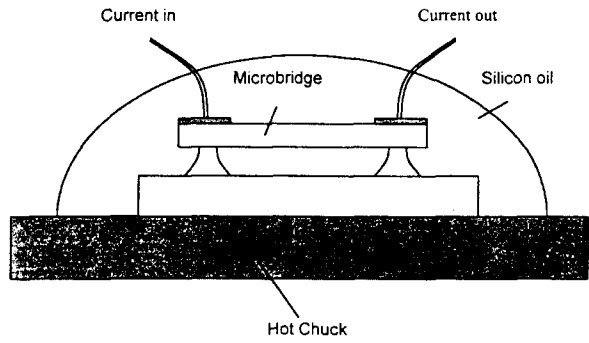


Fig. 8. Measurement of resistivity characteristics of poly-Si as a function of temperature by oil-bath method.

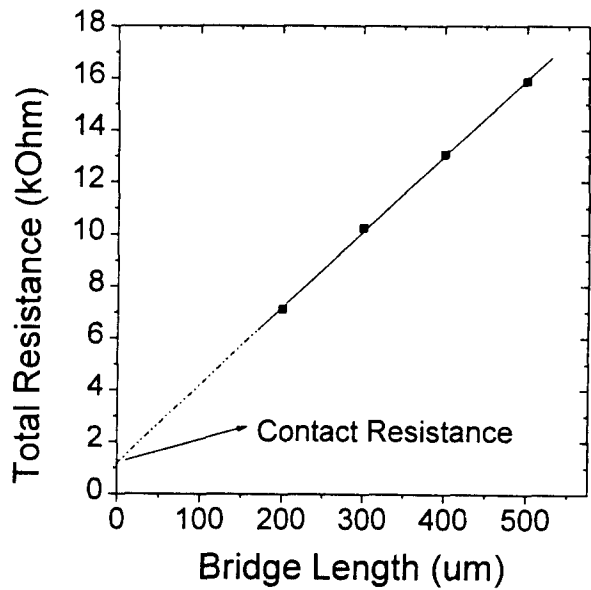


Fig. 9. Total bridge resistance as a function of bridge length. Extrapolating line is described as dotted one.

하여 그림 7와 같은 다결정 실리콘 마이크로 브리지를 사용하였다. 이 마이크로 브리지는 마이크로 게이지와 동일한 공정으로 제작되어 두 소자는 동일한 전기적 특성을 나타낸다. 마이크로 브리지의 크기를 알기 때문에 온도에 따른 저항 변화의 측정으로 다결정 실리콘 박막의 온도에 따른 비저항 특성을 계산할 수 있다. 그림 8에서와 같은 oil-bath 방법을 이용하여 상온에서 200°C 범위까지 다결정 실리콘 박막의 온도변화에 따른 비저항 특성을 측정하였다. 마이크로 브리지는 실리콘 오일에 덮여서 전체가 균일한 온도를 갖는다. 마이크로 브리지와 실리콘 오일은 상온에서 200°C 까지 온도를 변화시킬 수 있는 hot chuck으로 온도가 조절되었다. 일정한 온도에서의 브리지의 저항은 HP 4145B Semiconductor Analyser를 이용하여 측정하였다. 측정 전류의 발열로 인한 마이크로 브리지 온도의 상승을 막기 위해 $10\mu\text{A}$ 이하의 미세한 전류를 흘리면서 저항을 측정하였다. 마이크로 브리지에서 측정된 저항은 크게 두 성분을 갖는다. 첫 번째는 실험에서 측정하고자 하는 다결정 실리콘 마이크로 브리지 저항 성분이며, 두 번째는 소자와 외

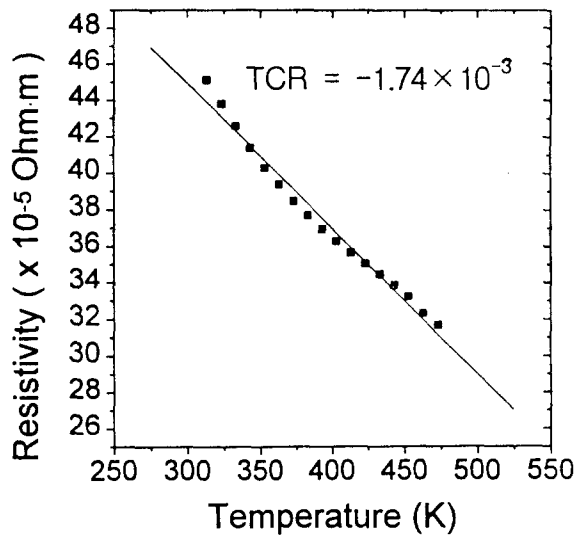


Fig. 10. Temperature characteristics of resistivity of poly-Si

부 전원과의 연결시 생기는 접촉 저항 성분이다. 접촉 저항 성분을 측정하기 위해 길이가 다르고 폭과 두께가 같은 여러 개의 브리지를 이용하여 실험하였다. 그림 9과 같이 마이크로 브리지의 길이에 따른 전체 저항 그래프를 외삽하여 y절편을 구하면, 이 값은 브리지의 길이가 0일 때의 저항, 즉 접촉 저항의 크기가 된다. 이러한 접촉 저항 성분을 고려하면 다결정 실리콘 박막의 온도에 따른 비저항 특성을 측정할 수 있다. 그림 10은 다결정 실리콘 박막의 온도에 따른 비저항을 측정된 그래프이며 상온에서 200°C 이내의

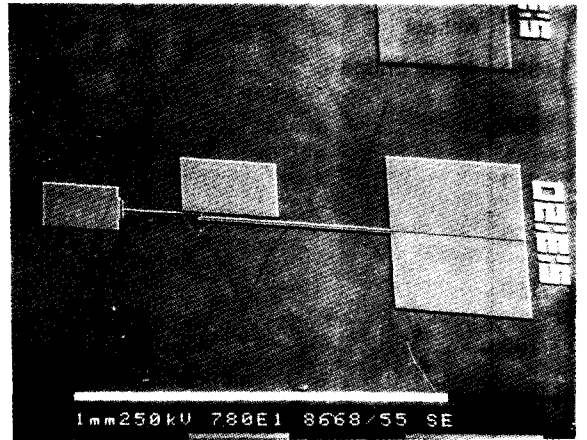


Fig. 11. SEM image of microgauge; length of test beam = 500 μm, width of test beam is 7.5 μm, length of indicator beam is 200 μm, length of slope beam is 20 μm, width of slope beam is 3 μm.

온도 범위에서 직선으로 근사될 수 있음을 볼 수 있다. 이를 식 (5)에 적용하여 식 (5)의 각각의 미지수를 구하면 다음과 같다.

$$\rho_0 = 5.7 \times 10^{-4} \sim 6.4 \times 10^{-4} [\Omega m]$$

$$T_0 = 19^\circ C$$

$$\xi = -1.74 \times 10^{-3} / ^\circ C$$

이 실험에서 ρ_0 값을 측정하는 소자에 따라 약간의 변화를 보였으나, TCR은 항상 일정한 값을 나타내었다.

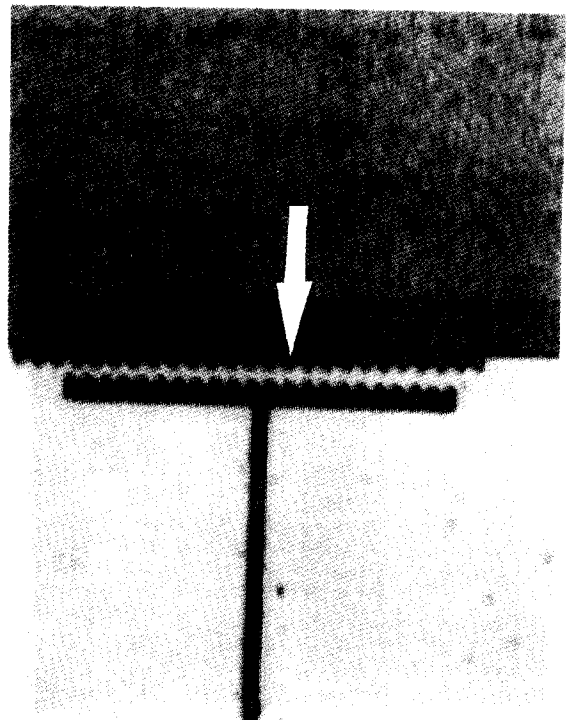
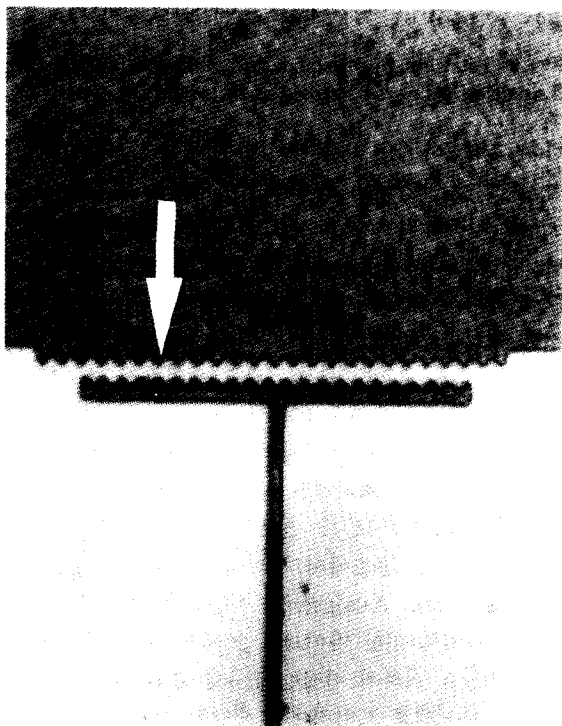


Fig. 12. CCD images of Vernier gauge; (a) no current applied (b) current applied.

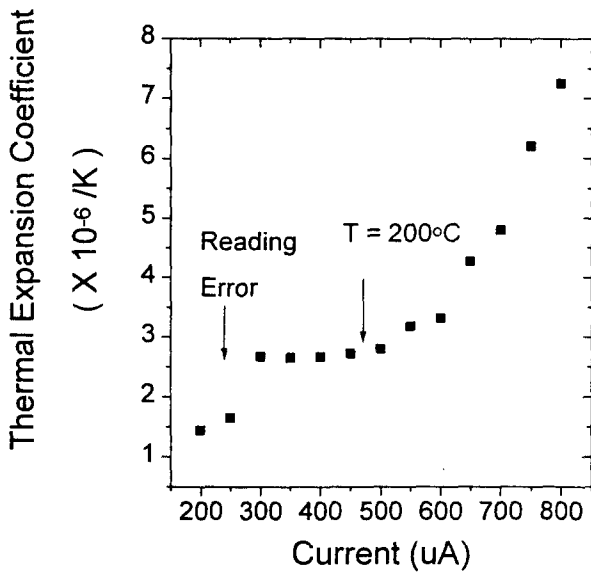


Fig. 13. Calculated thermal expansion coefficient of poly-Si as a function of applied current.

(2) 다결정 실리콘 박막의 열팽창 계수 측정

그림 11과 같은 마이크로 게이지를 이용하여 다결정 실리콘 박막의 열팽창 계수를 도출하였다. 마이크로 게이지는 공기 중으로의 열 손실을 방지하기 위해 10mtorr 정도의 진공에서 구동되었다. 25.4 μ m (1mil) 두께의 알루미늄 와이어를 통해 HP 4145B Semiconductor Analyser로 구동하였으며, 버어니어 게이지의 변위는 현미경과 CCD 카메라를 이용하여 측정하였다. 그림 11은 제작된 마이크로 게이지의 SEM 사진을 나타낸다. 그림 12는 전류가 흐를 경우와 흐르지 않을 경우의 마이크로 게이지에 발생한 변위의 차이를 나타낸다. 버어니어 게이지의 초기 위치는 박막 증착시의 잔류응력으로 인하여 설계 당시의 위치와 다를 수 있으나, 전류를 가하기 전 후 변위의 차이만을 측정하므로 고려할 필요가 없다. 전류를 가할 때의 마이크로 게이지의 평균 온도는 식 (13)을 이용하여 계산하였다. 이들 값과 식 (4)을 이용하여 다결정 실리콘 박막의 열팽창 계수를 계산하였다. 그림 13은 가하는 전류에 따른 측정된 다결정 실리콘 박막의 열팽창 계수를 나타내는 그래프이다. 가하는 전류가 작아 계산된 마이크로 게이지의 평균 온도가 200 $^{\circ}$ C 이하인 경우는 박막의 열팽창 계수 값이 항상 일정한 값을 나타내었지만, 전류가 큰 영역에서는 변하는 것을 볼 수 있다. 이것은 전류의 크기가 너무 커서 마이크로 게이지의 평균 온도가 200 $^{\circ}$ C를 넘는 경우에는 온도에 따른 비저항 특성이 식 (5)과 같은 선형적인 관계에서 벗어나기 때문이다. 본 연구에서 온도에 따른 비저항 특성이 선형적이라는 것을 측정하여 증명한 온도 범위는 상온에서 200 $^{\circ}$ C 까지이

므로, 계산되어진 마이크로 게이지의 평균 온도가 200 $^{\circ}$ C를 넘는 것은 제외하였다. 크기가 다른 여러 개의 게이지들을 이용하여 다결정 실리콘 박막의 열팽창 계수를 측정된 결과 그 값은 $2.9 \times 10^{-6}/^{\circ}$ C로 측정되었으며, 이 값들의 표준편차는 $0.24 \times 10^{-6}/^{\circ}$ C였다. 이 값은 기존에 Murarka⁴⁾ 등이 광학적 측정 방법으로 계산한 $2.95 \pm 0.24 \times 10^{-6}/^{\circ}$ C와 거의 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

마이크로 게이지법을 이용하여 다결정 실리콘 박막의 열팽창 계수를 측정하였다. 본 연구에서 제안한 마이크로 게이지법은 기존에 알려진 방법의 단점을 보완하여, 박막의 열팽창 계수 측정시 반드시 알아야 하는 기관의 탄성계수 값과 열팽창 계수 값을 필요로 하지 않는다는 장점을 지닌다. 마이크로 게이지의 평균 온도를 계산하기 위한 기본 자료를 확보하기 위해 다결정 실리콘 박막의 온도에 따른 비저항 특성을 oil-bath 방법을 통해 상온에서 200 $^{\circ}$ C 범위에서 측정하였다. 마이크로 게이지에 전류를 흘렸을 경우에 버어니어 게이지에 나타나는 변위, 가한 전류의 크기와 그때의 전압을 측정하였으며 측정된 전류와 전압으로부터 그때의 마이크로 게이지의 평균 온도를 계산하여 박막의 열팽창 계수 값을 도출하였다. 본 실험에서 측정된 다결정 실리콘 박막의 열팽창 계수 값은 $2.9 \times 10^{-6}/^{\circ}$ C이었고, 이때의 표준편차는 $0.24 \times 10^{-6}/^{\circ}$ C였다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부에서 시행한 '96 대학기초연구지원 사업에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Yao-Joe Yang, Chang-Jin Kim, Testing, Transducers, 337, (1995)
2. J. Buhler, J. Funk, O. Paul, F. P. Steiner, H. Baltes, Sensors and Actuators, 46-47, 572, (1995)
3. H. J. Quenzer, A. Maciossek, B. Wagner, H. Pott, Transducers, 128, (1995)
4. S. P. Murarka, T. F. Retajczuk, J. Appl. Phys., 54, 2069, (1983)
5. T. F. Retajczyk Jr., A. K. Sinha, Appl. Phys. Lett., 36, 161, (1980)
6. Linwei Lin, Roger T. Howe, Albert P. Pisano, Proc. IEEE MEMS, 201, (1993)
7. C. H. Mastrangelo, Ph. D. Dissertation, UC Berkeley, (1991)