

**MEMS용 Si 소재의 온도에 따른 탄성 특성 변화에 관한 연구**

정성훈\*, 이세호, 이성훈, 권동일  
 서울대학교 재료공학부

**A Study on the Elastic Property Change with Temperature in Si Materials for MEMS**

Sung-hoon Jung, Se-ho Lee, Sung-hun Lee, Dongil Kwon  
 School of Materials Science and Engineering, Seoul National University

**Abstract** - Electrostatically actuated test devices were designed to evaluate the elastic modulus of single crystalline Si (100) materials for MEMS device. Elastic modulus was calculated from resonant frequency by applying Rayleigh's energy method. Temperature effect on elastic properties was evaluated by detecting the resonant frequency change with increasing temperature to 600°C. The elastic modulus was decreased with heating and then increased with cooling, but specimen with thermal cycle showed a permanent change which is lower than the initial value. This phenomenon was explained by the change of interatomic force and the formation of SiO<sub>2</sub> layer on Si. The thickness of oxide layer was estimated by considering the change of mass and stiffness, and the formation of oxide layer was observed by the SEM photograph.

의 길이,  $M_{shuttle}$ ,  $M_{truss}$ 는 shuttle과 truss부분의 질량,  $m_b$ 는 빔의 단위길이당 질량을 의미한다.

**2. 본 론**

**2.1. 평가소자의 제작**

Si 소재의 온도에 따른 탄성계수 변화 측정을 위해 본 연구에서는 기존의 미세가공기술을 응용하여 평가소자를 제작하였다. 단결정 Si (100) 기판을 양극접합기술(anodic bonding)을 이용하여 corning glass 7740과 접합한 후 chemical-mechanical polishing(CMP)을 사용하여 원하는 두께로 깎아내었다. 제작된 기판 위에 마스크(mask)를 이용한 사진식각(photolithography) 방법으로 평가소자의 형태를 패터닝 하였다. 패터닝된 Si 기판위의 감광층(photoresist)을 마스크로 사용하고 deep reactive ion etching장치를 이용하여 Si 층을 수직으로 식각하였다. 이때의 식각속도는 1.2 $\mu$ m/min이었다. 정전기력을 통한 구동을 위해 유리 기판과 접촉되지 않은 부분을 기판과의 접촉면적 차이를 이용하여 유리 기판을 불산(HF)용액에 10 $\mu$ m/min의 에칭 속도로 아래부분을 에칭함으로써 제작하였다. 이와 같은 방법으로 제작된 평가소자를 그림 1에 나타내었다.

**1. 서 론**

박막 및 후막 등의 마이크로 소재를 응용한 MEMS 구조물이 미세화, 고집적화 됨에 따라 기계적 특성 평가를 통한 신뢰성의 확보가 매우 중요시되고 있다. MEMS용 마이크로 소재의 중요한 기계적 특성으로는 잔류응력, 탄성계수, 항복강도, 파괴강도, 파괴인성, 피로특성 등이 있으며, 이에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다[1]~[3]. 최근에는 MEMS 구조물이 고온센서 등의 분야에 응용되고 있어 고온에서의 특성변화에 관한 관심이 높아지고 있다[4]. 그러나 기존의 기계적 특성 평가법은 실험이 실온상태에서 행해진 경우가 대부분이어서 고온에 적용되는 소재의 특성 평가에는 많은 한계가 있다. 탄성계수와 같은 탄성성질의 변화는 고온에 적용되는 MEMS 구조물의 디자인이나 구동특성에 매우 중요한 영향을 주기 때문에 그 분석이 매우 중요하다. 본 연구에서는 단결정 Si을 소재로 평가소자를 제작하여 온도 변화에 따른 탄성계수의 변화를 분석하고자 탄성계수 측정을 위한 MEMS 구조물을 설계, 제작하고, 이 구조물에 정전기력을 가하여 구동시키면서 이때 측정되는 공진주파수를 분석하였다. 측정된 공진주파수를 이용하여 Si 소재의 탄성계수를 구하기 위해 최대위치에너지와 최대운동에너지의 등가를 이용한 Rayleigh's energy method를 적용하였다[3].

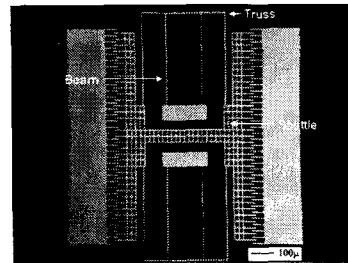


Fig. 1. Photograph of test specimen.

**2.2. 탄성계수의 측정**

제작된 단결정 Si의 평가소자에 정전기력을 가하기 위해 기본적인 전기신호를 function generator에서 발생시키고 이를 전압증폭기로 증폭하였다. 이 전기신호를 manipulator의 probe tip을 통해 시편에 전달함으로써 MEMS 소자에 전압을 인가할 수 있었다. 광학현미경과 CCD 카메라를 장착하여 모니터를 통해 구동되는 소자를 관찰하고 공진주파수를 측정할 수 있었다. 온도를 증가시키며 공진주파수와 이에 따른 탄성계수의 변화를 관찰하기 위해 시편의 아래쪽에 hot chuck을 장치하여 온도의 증감을 제어하였다.

**2.3. 온도에 따른 탄성계수 변화**

**2.3.1. 온도 상승에 따른 탄성계수의 변화**

그림 2는 빔의 길이가 각 500, 600 $\mu$ m인 평가소자를 상온(25°C)에서부터 600°C까지 상승시키며 구동시켰을

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{24EI/L^3}{m}} = \sqrt{\frac{Eh(w/L)^3}{2\pi^2 m_{eff}}} \quad (1)$$

$$(m_{eff} = M_{shuttle} + 0.5M_{truss} + 96/35m_b)$$

여기서,  $f_R$ 는 공진주파수,  $k$ 는 강성도,  $m$ 은 질량,  $E$ 는 탄성계수,  $h$ 는 구조물의 두께,  $w$ 는 빔의 폭,  $L$ 은 빔

때 Si 소자의 공진주파수 변화 그래프이다. Si 층의 두께는 20 $\mu\text{m}$ 이었고 전압은 AC 8V를 20배 증폭시켜 소자에 가해주었다. 온도의 증가 속도는 100 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 이었으며, 각 온도에서 20분간 유지시켰다.

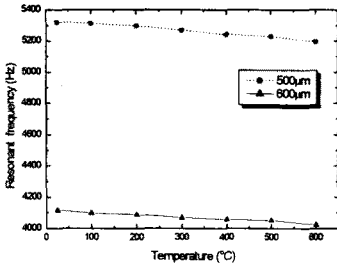


Fig. 2. The change of resonant frequency by heating to 600 $^{\circ}\text{C}$ .

이와 같은 공진주파수의 변화를 식 (1)에 의하여 탄성계수의 값으로 변환할 수 있었으며 결과를 그림 3에 나타내었다.

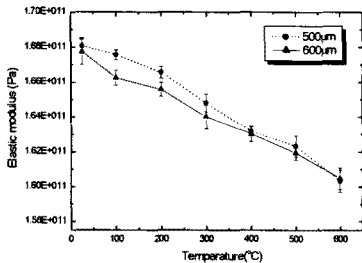


Fig. 3. The change of elastic modulus by heating to 600 $^{\circ}\text{C}$ .

이 결과로부터 온도의 상승에 따라 Si 구조물의 탄성계수가 감소함을 알 수 있었고, 빔의 길이에 따라서는 큰 변화를 발견할 수 없었다. 이러한 감소 경향은 재료의 내, 외적인 요인으로 설명이 가능하다. 재료의 내적인 요인은 열적 진동(thermal vibration)으로 인한 Si 내부 원자간의 결합 거리(lattice constant) 증가로 Si 원자간 에너지 곡선의 모양이 바뀔 때 따라 전체 소재의 탄성계수에 영향을 주었다고 할 수 있다(6). 또한 재료 외적인 요인으로는 온도 증가에 따라 Si 표면에 산화막( $\text{SiO}_2$ )이 형성되는데, 이로 인해 전체의 질량이 변화되고, 또한 형성된  $\text{SiO}_2$ 의 탄성계수가 Si 보다 작기 때문에 전체 구조물의 탄성계수를 낮추는 효과를 가져왔다고 예측할 수 있다.

### 2.3.2. 온도 상승 후 하강에 따른 탄성계수의 변화

온도 상승에 따른 탄성계수의 변화 원인을 분석하기 위해서 온도를 600 $^{\circ}\text{C}$ 까지 상승시키며 공진주파수를 측정 한 후 다시 실온까지 하강시키면서 측정을 계속하였다. 이때 변화된 온도에서는 모두 20분간 유지시킨 후 실험을 수행하였고 이 결과를 그림 4에 나타내었다.

온도 상승에 따라 감소한 탄성계수는 온도가 하강함에 따라 그 값이 다시 증가하는 경향을 볼 수 있었으나 가열시 같은 온도에서 측정된 값보다는 작게 측정되었다. 이는 탄성계수 감소에 재료 외적 요인이 영향을 미치고 있음을 의미한다. 즉, 산화막이 존재하지 않는다면 온도의 하강시에 탄성계수의 값은 가열시 같은 온도에서의 값과 같게 나와야 한다. 그러나 형성된 산화막이 온도가 하강해도 제거되지 않고 남아있으므로 전체 구조물의 탄

성계수를 낮추는 결과를 가져왔다고 볼 수 있다. 또한 온도 하강시에 탄성계수가 일정하지 않고 증가하는 원인은 재료 내적인 요인이 함께 작용하고 있다고 하는 분석을 가능하게 한다.

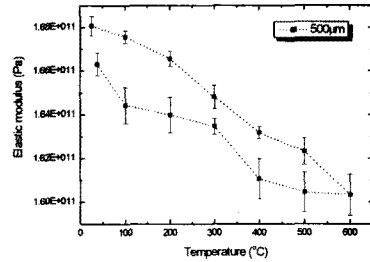


Fig. 4. The change of elastic modulus by heating and cooling.

### 2.4. 산화막의 존재 분석

앞에서 설명한 산화막의 존재를 실험적으로 확인하기 위해 500 $^{\circ}\text{C}$ 까지 온도를 상승시킨 후 유지시간을 다르게 하여 탄성계수를 측정하였고, 이 결과를 그림 5에 나타내었다.

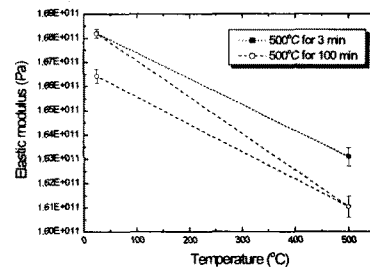


Fig. 5. The change of elastic modulus by heating in different dwell time.

온도 상승속도는 100 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 같게 하고 유지시간을 3분과 100분으로 달리 하여 실험한 결과, 유지시간이 짧은 경우에는 500 $^{\circ}\text{C}$ 까지 가열 후 냉각하여 실온에서 다시 측정 한 값이 가열 전 측정값과 같게 나왔으며, 이에 반해 유지시간이 긴 경우에는 처음값보다 작은 값이 측정되었다. 고온에서 유지시간이 짧은 경우에는 산소가 확산될 수 있는 시간이 충분하지 않아 산화막이 거의 생성되지 않았으나, 유지시간이 길어지면 표면에 산화막이 생성되어 이러한 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

산화막이 탄성계수에 미치는 영향을 분석하기 위해 산화막 생성 전후의 시편을 그림 6과 같이 단순화하고,  $\text{SiO}_2$ 의 두께를 대략적으로 계산하였다. 일반적으로 Si( $t_0$ )이 산화되어  $\text{SiO}_2(t_{\text{SiO}_2})$ 가 생성되면 44%정도의 Si를 소비하여( $t_{\text{Si}}$ ) 전체적인 부피는 증가하는 것으로 알려져 있다(7). 전체 부피는 증가하나  $\text{SiO}_2$ 의 밀도( $\rho_{\text{SiO}_2}$ )는 2220 $\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 Si( $\rho_{\text{Si}}$ )의 2330 $\text{kg}/\text{m}^3$ 보다 작기 때문에 이를 보정한 질량( $M_{\text{eff}}$ )을 식 (2)와 같이 계산하였다.

산화막이 형성되면 질량 증가 뿐만 아니라  $\text{SiO}_2$  형성으로 인해 그림 6과 같은 이종재료의 복합층이 형성되므로 공진주파수에 영향을 주는 강성도 역시 변화하게 된다. 빔이론을 적용하여 산화층 생성 이후 복합층의 탄성계수를 식 (3), (4)와 같이 유도하여  $\text{SiO}_2$ 의 두께를 계산하였다. 이상의 계산에서 Si 빔의 표면에 생성되는  $\text{SiO}_2$  두께는 위, 아래가 모두 일정하다고 가정하였다.

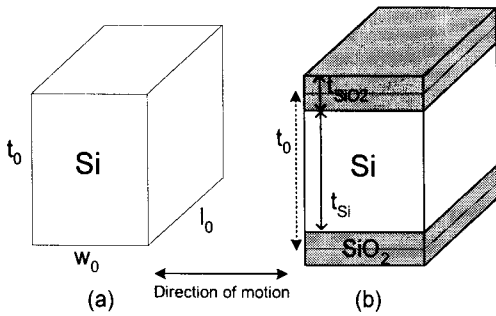


Fig. 6. Schematic diagram of Si beam (a) before oxidation (b) after oxidation.

$$M_{\text{eff}} = \frac{\{(t_{\text{Si}} \times w_0 \times \rho_{\text{Si}}) + (2t_{\text{SiO}_2} \times w_0 \times \rho_{\text{SiO}_2})\} \times m_{\text{eff}}}{t_0 \times w_0 \times \rho_{\text{Si}}} \quad (2)$$

$$(EI)_{\text{tot}} = \frac{(2\pi f_R)^2 t_0^3 M_{\text{eff}}}{24} \quad (3)$$

$$(EI)_{\text{tot}} = E_{\text{Si}} \frac{t_{\text{Si}} w_0^3}{12} + 2E_{\text{SiO}_2} \frac{t_{\text{SiO}_2} w_0^3}{12} \quad (4)$$

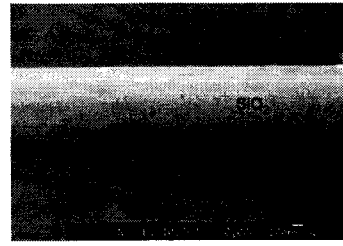
$$(t_{\text{Si}} = t_0 - 2 \times 0.44 t_{\text{SiO}_2})$$

여기서  $(EI)_{\text{tot}}$ 은 산화 이후 측정된 전체 구조물의 강성도이고,  $E_{\text{Si}}$ 는 산화되지 않은 구조물에서 측정된 탄성계수이며,  $E_{\text{SiO}_2}$ 는 문헌에 나와 있는 25 °C에서 72.66GPa 값을 이용하였다[5]. 이와 같이 계산한  $\text{SiO}_2$ 의 두께는 480nm였으며, 이 결과를 그림 7의 SEM 사진과 비교하였다. SEM사진에서 측정된 결과 630nm와 370nm 정도 측정되었고 윗면의  $\text{SiO}_2$ 가 더 두껍게 생성되었음을 확인하였다.

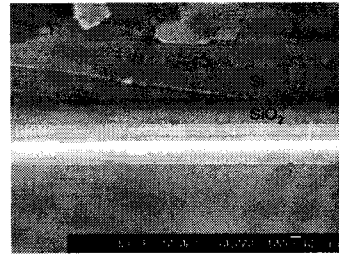
이러한 두 층의 두께 차이는 소자의 구조상 아래 부분은 공기와의 접촉이 윗면보다 어렵기 때문에 산화층이 적게 생성된 것으로 생각된다. 비록 예상과 달리 위, 아래의 산화막 두께에 차이가 발생하였으나 본 모델에서는 산화막의 전체 두께만이 의미가 있으며 예측값은 측정값의 1/2과 잘 일치하고 있다. 따라서 산화막의 형성이 탄성계수에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 나아가 이러한 효과를 보정하고 온도에 따른 산화막의 형성 두께 등을 정량화 하여 계산식에 적용시킴으로써 Si 소재로 제작된 MEMS소자가 고온에서 사용될 경우 본 연구를 바탕으로 구동특성 분석이 용이해질 것이라 예상된다.

### 3. 결 론

Si 재료의 온도변화에 따른 탄성계수 측정을 위해 미세가공기술을 응용하여 평가소자를 제작하였으며, 정전기력을 가함으로써 구동시켰다. 온도변화에 따른 영향을 알아보기 위해 hot chuck을 통해 600°C까지 변화시키면서, 소자의 공진주파수를 측정하여 탄성계수를 계산하였다. 온도변화에 따른 탄성계수의 감소현상이 뚜렷이 나타났으며 이를 Si 재료의 내, 외부적인 요인으로 분석하였다. 온도 상승으로 원자의 진동에너지가 증가하고 원자간의 간격이 증가하여 원자결합의 강성도를 감소시키는 원인과 산화가 잘되는 Si 재료의 특성으로 인해 온도가 상승됨에 따라 생성되는 산화층이 평가소자의 질량과 강성도를 변화시키는 효과를 가져와 전체 탄성계수가 감소하는 것으로 판단되며 벌이론을 적용하여 계산한 산화막의 두께 결과와 사진으로 관찰한 결과를 비교하여 이를 검증하였다.



(a)



(b)

Fig. 7. Cross-section image showing  $\text{SiO}_2$  layer formed at (a) top and (b) bottom of the resonator beam(500°C for 100 min.).

### (참 고 문 헌)

- [1] F. Ericson et al., "High-sensitivity surface micromachined structures for internal stress and stress gradient evaluation", J. Micromech. Microeng., 7, 30, 1997
- [2] F. Ericson et al., "Micromechanical fracture strength of silicon", J. Appl. Phys., 68, 5840, 1990
- [3] H. Kahn et al., "Heating effects on the Young's modulus of films sputtered onto micromachined resonators", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 518, 33, 1998
- [4] H. Tada et al., "Determining the high-temperature properties of thin films using bilayered cantilevers", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 546, 39, 1999
- [5] M. Fukuhara et al., "Effects on High-Temperature -Elastic Properties on  $\alpha/\beta$ -Quartz Phase Transition of Fused Quartz", Journal of Materials Science Letters, 18, 751, 1999
- [6] Y. Isono et al., "AFM bending testing of nanometric single crystal silicon wire at intermediate temperature for MEMS", Proc. the 14th IEEE International Conference on MEMS, 135, 2001
- [7] S. M. Sze, VLSI technology, McGraw-Hill, 132, 1983