

ISDG 를 이용한 다결정실리콘의 기계적 물성값 측정법

오충석[#], William. N. Sharpe, Jr.*

Techniques for Measuring Mechanical Properties of Polysilicon using an ISDG

Chung-Seog Oh[#] and William. N. Sharpe, Jr.*

ABSTRACT

Techniques and procedures are presented for measuring mechanical properties on thin-film polysilicon. Narrow platinum lines are deposited 250 μm apart on tensile specimens that are 3.5 μm thick and 600 μm wide. Load is applied by a piezo-actuator and by hanging weights. Strain is measured by an ISDG at temperatures up to 500 °C. Measurements of the elastic modulus with jig modifications, loading speed and temperature change are presented first. And then, the preliminary data for the coefficient of thermal expansion and creep behavior are presented as a reference.

Key Words: MEMS(미세기계전자시스템), Thin-film (박막), Polysilicon (다결정실리콘), Tensile specimen (인장시험편), ISDG (레이저간섭변형률계이지), Elastic modulus (탄성계수), CTE (열팽창계수), Creep (크리프)

기호설명

α = coefficient of thermal expansion

ϵ = engineering strain

σ = engineering stress

E = Young's modulus

T = temperature

1. 서론

Norton¹ 은 그의 저서에서 일반적인 기계 구조물의 설계에 있어서 가장 기초적인 시험으로 인장 시험 (tensile test)을 들고 있다. 설계자는 이 시험

으로부터 얻어진 탄성계수, 인장강도, 항복강도, 프와송비 등을 이용하여 구조물을 설계할 수 있게 된다.

최근 기초적인 연구단계를 넘어 발전단계로 도약하고 있는 MEMS (MicroElectroMechanical System) 분야와 고집적 및 고성능화로 치닫고 있는 반도체 분야에서 수 마이크로 이하의 박막 (thin films) 재료에 대한 물성 평가가 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히, MEMS 구조물들은 반도체와 달리 여러 가지 기계 구조물들로 구성되어 있어, 이를 설계하기 위해서는 이들 구조물과 그 크기가 유사하고, 제조 공법이 동일한 시험편을 제작하여 시험하는 것이 가장 좋다.

¹ 접수일: 2003 년 11 월 11 일; 게재승인일: 2004 년 4 월 9 일

[#] 교신저자: 금오공과대학교 기계공학부

E-mail ocs@kumoh.ac.kr Tel. (054) 467-4373

* The Johns Hopkins University, Dept. of Mechanical Engineering

박막에 대한 인장 시험은 응력-변형률 곡선으로부터 기초적인 기계 물성값을 직접적으로 얻을 수 있다는 큰 장점이 있으나, 거시적 (bulk)인 시험편과 달리 시험편 제작, 가진기와 시험편 연결 (gripping), 하중 및 변형률 측정에 있어서 상당한 어려움이 따르고 있다. Johnson² 은 굽힘시험과 인장시험을 비교하였는데, 인장시험의 경우 굽힘시험에 비해 큰 하중이 필요한 반면 변형률이 극히 작음을 알리고 있다. 따라서, 수 마이크로 이하의 시험편에 대한 변형률을 정확히 측정하는 것이 가장 어려워 이에 대한 연구가 많이 행해지고 있다.

변형률 측정은 크게 접촉식과 비접촉식으로 나눌 수 있는데, 접촉식은 측정 결과에 영향을 줄 수 있어 비접촉식 측정법이 선호되고 있다. Huh³ 는 ESPI (electronic speckle pattern interferometer)를 이용하여 두께 22 μm , 폭 500 μm , 게이지 길이 3 mm 의 구리 박막에 대한 인장 물성값을 평가하였고, Sutton⁴ 에 의해 시작된 디지털 화상 상관 법 (digital image correlation method)도 많이 사용되고 있다. Read⁵ 는 1 μm 두께의 알루미늄 박막의 변형률을 광학 현미경 사진을 판독하여 측정하였다. 완전한 비접촉식 측정법은 아니지만 Chasiotis⁶ 는 원자 현미경 (atomic force microscope)을 이용하여 인장 시험시의 변형률을 측정하여 좋은 결과를 주고 있다. 최근 Xie⁷ 는 광학 모아레 (optical M \acute{o} ire) 방법을 박막 시험편에 성공적으로 적용하였다. Sharpe^{8,9} 는 마이크로 시험편에 레이저 간섭을 일으킬 수 있도록 작은 표시 (markers)를 만들어 거시 시험편의 표점 거리 (gage length) 역할을 할 수 있도록 한 뒤, 이의 변화를 레이저 간섭 변위계 (ISDG; interferometric strain/displacement gage)로 검출하여 응력-변형률 곡선을 얻는 독특한 방법을 사용하여 인장시험¹⁰, 고온 물성 시험¹¹ 등 다양한 시험을 수행하여 MEMS 재료들에 대한 기초 비교 데이터를 제공하였다.

본 연구에서는 MEMS 구조물의 구조 재료 (structural material)로서 널리 사용되고 있는 재료 중의 하나인 다결정 실리콘 (polycrystalline silicon) 박막 시험편에 대한 단축 시험 시의 변형률을 ISDG 를 이용하여 측정함으로써 응력-변형률 곡선을 얻고, 이로부터 하중 부하용 지그 (jig) 수정, 하중 부하 속도 및 온도 변화에 따른 탄성계수의 변화를 측정하는 데 그 목적을 두고 있다. 또한 본 연구에서 사용한 측정 시스템을 이용하여 얻을

수 있는 기계 물성값인 열팽창계수 (coefficient of thermal expansion) 및 크리프 (creep) 특성 측정에 관해서도 간단히 언급하고자 한다.

2. 시험편 및 실험장치

2.1 시험편

시험편은 일차적으로 Read¹² 가 사용한 방법을 따라 제작하였으며, 상세한 시험편 제작 기법은 Sharpe¹³ 의 결과를 활용하였다. 먼저 3.5 μm 두께의 다결정실리콘을 0.5 mm 두께의 실리콘 웨이퍼 위에 저압화학증착 (low pressure chemical vapor deposition)으로 2 회에 걸쳐 증착한 뒤, 600 μm 폭의 시험편만 남기고 식각 (etching)한다. 이를 1 cm \times 1 cm 로 자른 후 뒤 면에서 식각 (bulk etching)하여 Fig. 1 과 같이 제작한다. 다음으로, ISDG 를 이용하기 위해 시험편에 폭 10 μm , 길이 200 μm 의 백금선을 FIB (focused ion beam) 장비를 이용하여 부착하였다. 이를 Fig. 2 에 나타내었다. 백금선 사이의 거리 (gage length)는 250 μm 로 하였다. 백금선을 사용한 이유는 종전^{8,10} 에 사용하던 금선 (gold wire)의 경우 200 $^{\circ}\text{C}$ 가 넘으면 다결정실리콘으로 확산되어 고온에서의 측정이 어려웠기 때문이다. 이후 시험편을 시험기에 연결한 뒤 양단의 지지대 (supporting strips)를 다이아몬드 절단기를 이용하여 절단한 뒤 시험을 수행한다. 식각을 제외한 시험편 준비는 미국 MEMScAP 사의 PolyMUMPs 공정을 이용하였다.

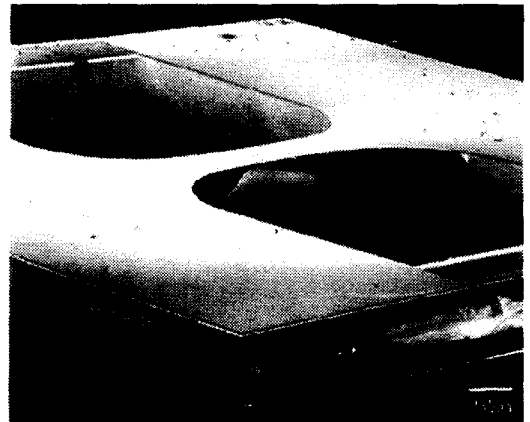


Fig. 1 A polysilicon specimen on a supporting silicon frame

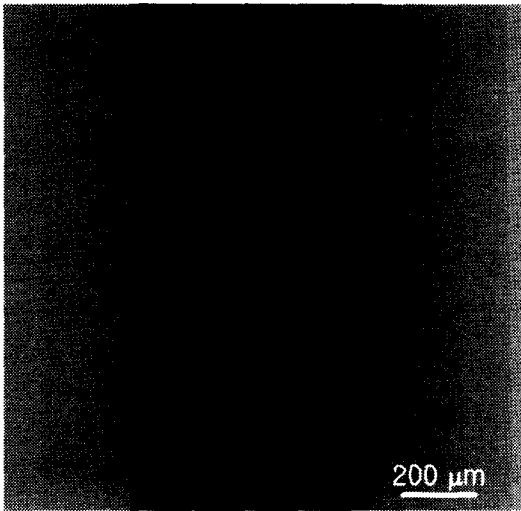


Fig. 2 Two platinum strain markers on a specimen

2.2 레이저 간섭 변형률 게이지 (ISDG)

ISDG의 측정 원리를 Fig. 3에 나타내었다. 시험편에 부착되어 있는 가는 표시에 레이저를 조사하면 2개의 표지에서 각각 회절(diffraction)이 생겨 간섭무늬(fringe patterns)가 생긴다. 시험편에 하중이 인가되어 2개의 표지 사이 거리(gage length)가 변화되면 간섭무늬가 움직이게 되고, 이 움직임을 한 쌍의 다이오드 열(diode array)로 감지하고 소프트웨어(Agilent VEE)를 이용하여 실시간으로 변형률로 환산하게 된다. 이에 대한 상세한 내용 및 수식은 Sharpe의 보고서¹⁴에 있다. 본 시험에서는 그림의 금선 대신 백금선을 이용하였다.

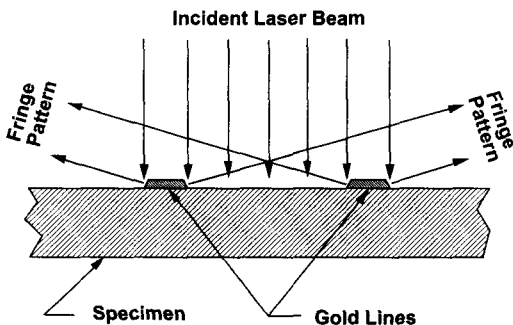


Fig. 3 Schematic of the ISDG

2.3 실험장치

인장 시험용 기본 장치 개략도를 Fig. 4에 나타내었다.¹³ 이 장치를 이용하여 많은 결과를 얻었으나 몇 가지 지그 수정을 통하여 보다 좋은 결과를 얻고자 아래와 같이 변경하였다.

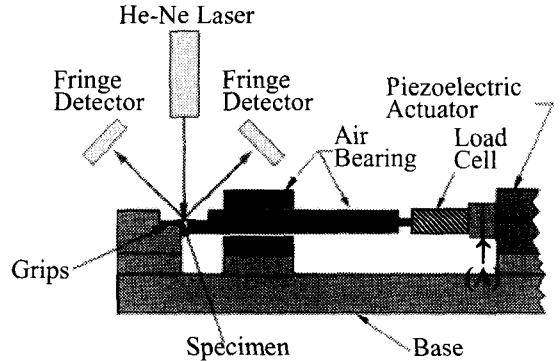


Fig. 4 Schematic of the measurement system

2.3.1 유연 연결 지그 삽입

Fig. 4의 경우 공기 베어링 축, 로드셀 및 압전 가진기(piezo-actuator)가 직결되어 있어 이들을 일렬로 정확히 맞추는 것이 매우 어려웠다. 이를 해결하고자 Fig. 5와 같은 유연 연결 지그를 제작하여 로드셀과 압전가진기 사이, Fig. 4의 (A)점, 에 삽입하였다.

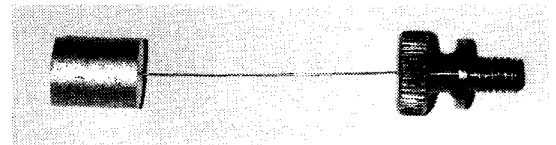


Fig. 5 Flexible connection jig

2.3.2 시험편 가열 방법

온도 변화에 따른 물성값들의 변화를 관찰하기 위하여 저항 가열법(resistive heating)을 이용하였다. 이 방법은 다결정 실리콘의 비저항(resistivity)이 약 3 mΩ·cm 정도이므로, 본 시험편의 경우 시험편 양단 저항값이 약 60 Ω정도가 되어 양단에 전류를 흘리면 저항 열이 발생하는 원리를 이용하는 것이다. 이를 위해 Fig. 6과 같이 시험편의 고정단과 이동부에 2개의 전선을 전도성 니켈 접착제(nickel print)를 이용하여 고정된 다음 전류를 흘려 시험편 중앙 부분을 가열하였다. 시

험편의 온도는 100~300 °C (초점거리 1 inch, 점 직경 400 μm) 및 400~2,000 °C (초점거리 7 inch, 점 직경 260 μm)의 측정 범위를 갖는 2 종류의 비접촉식 온도계 (optical pyrometer)를 이용하여 실험도중 연속적으로 측정하였다. 시험편에 인가하는 전류는 D/A 변환기를 통하여 나온 신호를 전력 증폭기 (power amplifier)를 이용하여 증폭한 후 사용하였다. 또한, 시험편의 온도변화를 A/D 변환기로 받아 실시간으로 온도를 감지하고, 변화가 발생하면 D/A 변환기에 인가되는 전압을 변경하는 방식으로 시험편의 온도를 일정하게 유지시켰다.

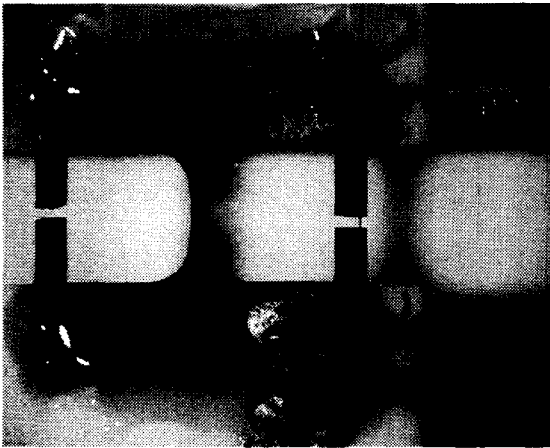


Fig. 6 A polysilicon specimen mounted in grips with cut support strips

2.3.3 하중 인가 방법

인장 시험 시에는 Fig. 5 의 지그를 Fig. 4 의 시스템에 연결한 뒤, 12 비트 D/A 변환기의 출력 전압을 압전 가진기로 보내 가진기를 제어하였다. 압전 가진기는 1 볼트 (V)의 외부 전압 입력에 대하여 18 μm 움직이므로 본 시스템의 경우 0.1 μm의 변위 해상도를 갖게 된다. 또한, 소프트웨어에서 하중 인가 속도를 변경할 수 있도록 하였다.

온도 변화에 따른 탄성계수, 열팽창 계수 및 크리프 거동 측정 시에는 압전 가진기 대신에 Fig. 7 과 같이 유연한 줄 (fishing wire), 피벗 지지대 (fulcrum), 수직 이송대 및 표준 분동 (calibration weights)을 이용하여 정하중 (dead weights)을 인가하였다. 시험 초기에는 그림과 같은 피벗 지지대가 아닌 저 마찰 도르래를 이용하였으나 도르래와 줄 사이의 마찰로 인해 하중 변화가 생겨 그 영향

을 최소화하기 위하여 45° 피벗 지지대를 사용하였다. 전체 시험 시스템^{11,15}을 Fig. 8(a)에 나타내었고 이의 개략도를 Fig. 8(b)에 보였다.

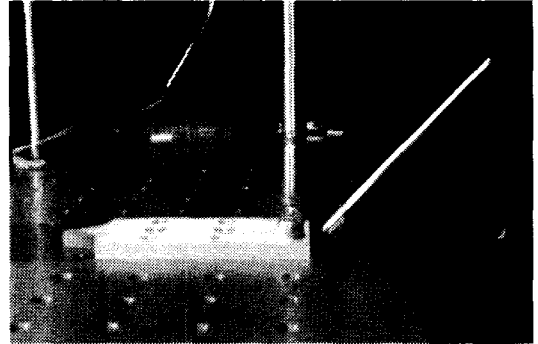


Fig. 7 A fulcrum with a sharp pivot point

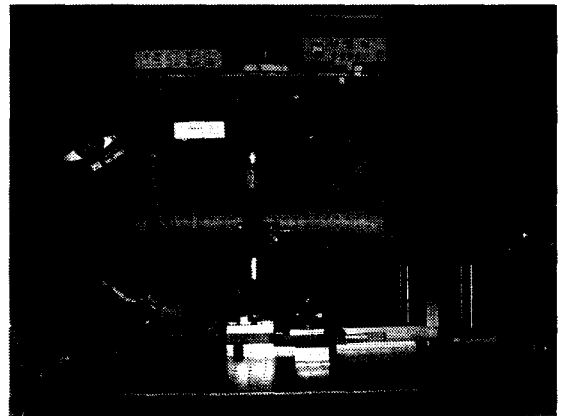


Fig. 8(a) A photograph of test setup

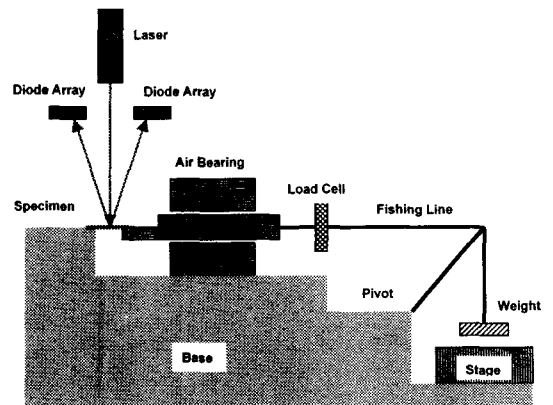


Fig. 8(b) Schematic of test setup.

3. 실험 결과 및 토론

3.1 유연 연결 지그의 영향

유연 연결 지그 사용 전후의 응력-변형을 곡선을 Fig. 9 에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 직접 체결 범을 사용했을 경우 비직선성이 상당히 크고 탄성계수 값이 300 GPa 정도로 평가되었다. 반면, 유연 연결 지그를 사용하면 매우 직선적인 관계를 쉽게 얻을 수 있었으며 탄성계수 값이 150 GPa 정도로 평가되었다. 다결정 실리콘의 탄성계수 값은 대략 150~170 사이 값으로 추정되므로 유연 연결 지그를 사용하면 재료의 응력-변형을 곡선을 바르게 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 물론 직접 체결의 경우에도 많은 시행착오를 거쳐 하중선 (load line)을 정확히 맞추어 놓으면 직선적인 관계를 얻어 올바른 탄성계수 값을 얻을 수 있었으나 많은 경험과 시행착오가 요구된다.

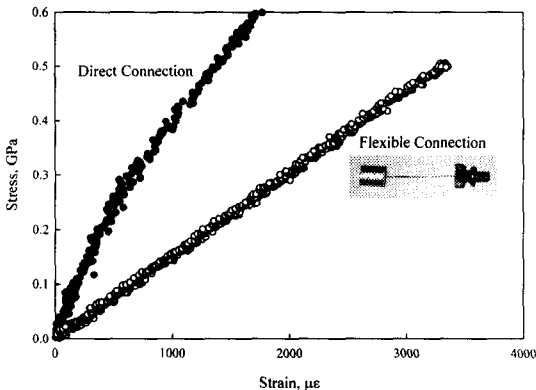


Fig. 9 Stress-strain curves with and without a flexible connection jig (inserted picture)

3.2 하중 부하 속도의 영향

압전 가진기를 이용하는 경우 기본적으로 변위 제어 상태가 된다. 가진기의 부하 속도에 따른 탄성계수의 변화를 관찰하기 위하여 가진 속도를 0.05, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.50 $\mu\text{m/s}$ 로 달리하며 응력-변형을 곡선을 얻었다. 이들 곡선을 동일 평면 상에 그려본 결과 그 차이가 크지 않아 0.35 $\mu\text{m/s}$ 인 경우만을 Fig. 10 에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 매우 직선적인 관계를 얻을 수 있었으며, 가중 (LD; loading) 사와 제하(UL; unloading) 시에 이력현상 (hysteresis)이 거의 나타

나지 않고 있음을 알 수 있다. 이들 응력-변형을 곡선으로부터 가중 시와 제하 시의 탄성계수를 측정하여 Table 1 에 정리하였다. 표에서 볼 수 있듯이 0.05 에서 0.5 $\mu\text{m/s}$ 의 속도 범위에서는 탄성계수의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 가중 시와 제하 시에는 3.4 GPa 정도의 차이를 보이고 있다. 따라서 본 재료의 경우 탄성계수는 약 155 GPa 인 것으로 평가되었다. 이 값은 많은 실험 결과에 의거한 핸드북 데이터¹⁶와 유사함을 알 수 있다.

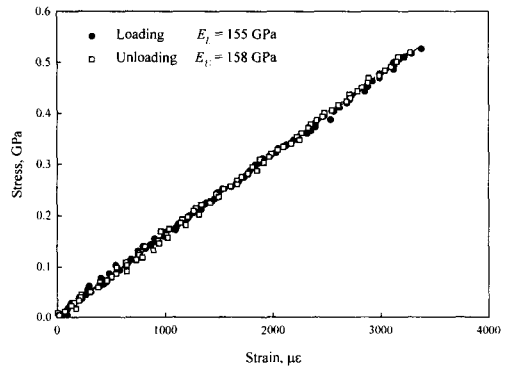


Fig. 10 Stress-strain curve at the displacement rate of 0.35 $\mu\text{m/s}$

Table 1 Comparison of modulus data at various displacement rates (E [GPa], V [$\mu\text{m/s}$])

V \ E	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45	0.50	Avg.
LD	152	154	153	155	154	155	153.8
UL	159	157	157	158	156	156	157.2

3.3 표준 분동을 이용한 정적 시험

일반적으로 인장 시험을 수행하기 위해서는 압전 가진기와 같은 고가의 가진기가 필요하다. 본 연구에서는 온도에 따른 크리프 거동을 측정하기 위하여 Fig. 8 과 같은 장치를 이용하여 실험하던 중 이를 이용하여 아래와 같은 여러 가지 실험을 추가로 수행할 수 있음을 발견하였다.

3.3.1 상온에서의 인장 시험

Fig. 8(b)에서 우측 하단에 보이는 수직 이송대는 크리프 시험 시 시험편에 하중을 서서히 안전하게 가하기 위함이었으나, 이 과정에서 로드셀을

이용하여 하중을 측정하고, ISDG 를 이용하여 변형률을 측정해 본 결과 압전 가진기를 이용한 3.2 절의 결과와 유사한 응력-변형률 곡선을 얻을 수 있었다. 이를 Fig. 11 에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 가중과 제하 시에 일정한 기울기를 보이고 있으며 상당히 선형임을 알 수 있다. 3.2 절에서 얻은 결과에 비해서는 산포가 더 크고 탄성계수 값도 약간 높은 값을 주고 있다. 그러나, 특별한 가진기 없이도 표준 분동을 활용하여 박막의 인장 시험을 수행할 수 있다는 것은 매우 큰 수확이라 할 수 있다. 본 저자들은 이 결과를 이용하여 고온에서의 실험 전에 상온 탄성계수를 측정하여 비교 데이터로서 활용하였다.

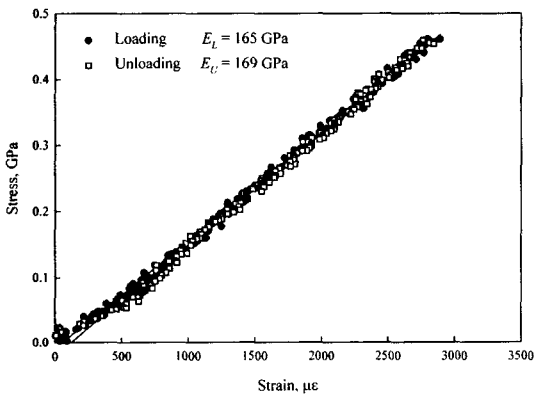


Fig. 11 Stress-strain curve by lowering a vertical stage

3.3.2 온도 변화에 따른 인장 시험

본 연구에서 사용한 비접촉식 온도계는 상온에서 100 °C 까지의 온도를 연속적으로 측정할 수 없는 문제가 있었다. 따라서, 이 온도 영역에서의 탄성계수 변화를 관찰하기 위하여 상온과 100 °C 에서 각각 인장시험을 수행하였다. 이 결과를 Fig. 12 에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 이 온도 범위에서는 탄성계수의 변화가 미미함을 알 수 있었다.

3.3.3 온도 변화에 따른 탄성계수 측정

다결정실리콘 재료는 상온에서만뿐만 아니라 수백 도의 고온에서도 많이 사용되는 구조 재료이므로 온도에 따른 물성 값의 변화를 관찰할 필요가 있다. 이를 위해 그 동안은 고온용 노 (furnace) 안에 시험편을 두고 인장 시험을 수행하여 응력과 변형률을 측정하고, 무 부하상태에서 온도 상승에

따른 변형을 측정하여 열팽창계수를 얻는 방법을 주로 사용하였으나 마이크로 단위의 시험편에 대해서는 대단히 어려워 초보적인 단계에 머물고 있는 실정이다.¹⁷

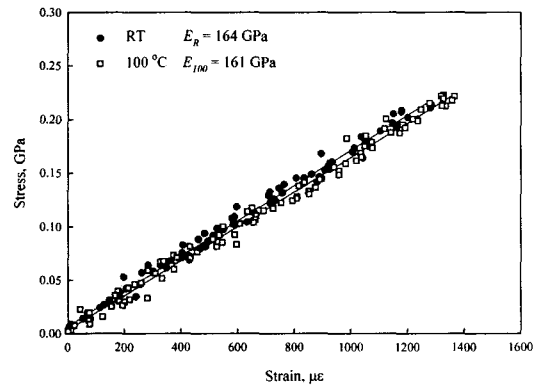


Fig. 12 Stress-strain curves at the temperature of RT and 100 °C

이를 해결하기 위하여 온도에 따른 Hooke 의 법칙과 ISDG 를 이용하는 새로운 방법을 이용하였다.^{11,15}

$$\epsilon(T) = \frac{\sigma}{E(T)} + \alpha(T)\Delta T \quad (1)$$

즉, 서로 다른 표준 분동 2 개를 이용하여 $\sigma_2 = 2\sigma_1$ 이 되게 한 뒤 식 (1)에 대입하면,

$$\epsilon_1(T) = \frac{\sigma_1}{E(T)} + \alpha(T)\Delta T \quad (2)$$

$$\epsilon_2(T) = \frac{2\sigma_1}{E(T)} + \alpha(T)\Delta T$$

식 (2)를 이용하면 아래의 관계식을 쉽게 유도할 수 있다.

$$\alpha(T) = \frac{2\epsilon_1(T) - \epsilon_2(T)}{\Delta T} \quad (3)$$

$$E(T) = \frac{\sigma_1}{\epsilon_2(T) - \epsilon_1(T)}$$

따라서, 2 가지 경우의 표준 분동 하에서 온도에 따른 변형률을 ISDG 로 각각 측정된 뒤, 식 (3)에 대입하면 온도에 따른 열팽창계수¹¹와 탄성계수¹⁵의 변화를 손쉽게 연속적으로 얻을 수 있게 된다. 먼저 2 종류의 서로 다른 응력 하에서 얻은 변형률 변화를 Fig. 13에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 100 °C에서는 하중 차이에 의한 탄성 변형률만큼만 차이가 있으나 온도 증가에 따라 100 g 하중 하에서의 변형률이 점차 증가하고 있음을 알 수 있다.

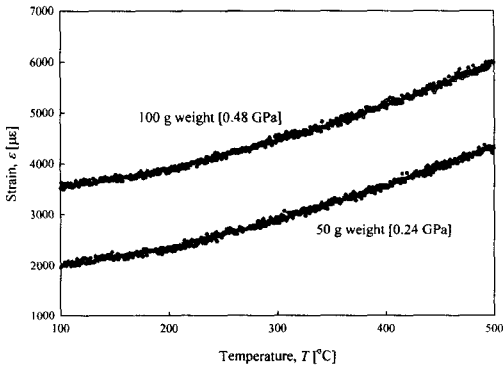


Fig.13 Measured strains at 50 g (bottom) and 100 g (top) loads for 432 s and their fitted curves

온도에 따른 탄성계수의 변화를 계산하기 위하여 원 데이터를 식 (3)에 직접 대입할 경우 잡음으로 인한 계산 오차가 크기 때문에 원 데이터를 2 차 식으로 근사한 뒤 위 그래프에 같이 나타내었다. 이 근사 값들을 식 (3)에 대입하여 탄성계수를 계산하여 Fig. 14에 나타내었다.

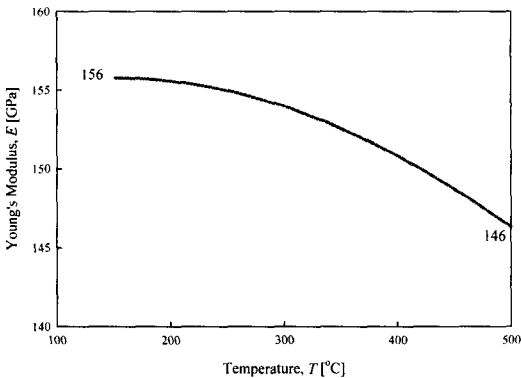


Fig.14 Young's modulus change with temperature

Fig. 12에서 알 수 있듯이 100 °C에서의 탄성계수는 대략 160 GPa 정도임을 알 수 있다. 그러나 Fig. 14의 결과를 보면 이 온도에서 156 GPa로 수렴함을 알 수 있다. 이는 변형률 측정의 오차에 기인한다고 생각된다. 이 결과로부터 가장 확실하게 알 수 있는 것은 상온에서 500 °C까지 온도가 변화될 때 탄성계수 변화는 10 GPa 정도라는 것이다. Michalick¹⁸는 상온에서 180 °C까지 온도가 변화될 때 탄성계수가 163에서 158로 감소함을 보고하고 있고, Kahn¹⁹은 상온에서 450 °C까지의 범위일 때 탄성계수가 168에서 163으로 감소됨을 밝히고 있다. 하지만, 대부분의 결과들이 특정 온도에서 만의 값을 주는 대신 본 논문의 경우 온도에 따른 연속적인 값을 주기 때문에 매우 획기적인 측정 방법이라 생각된다.

탄성계수 이외에 식 (3)에 의해 온도에 따른 연속적인 열팽창계수도 측정할 수 있다.¹¹ 이 결과를 참고적으로 Fig. 15에 나타내었다. 이 외에도 본 실험 장치를 이용하여 고온에서의 크리프 특성도 평가 가능하다.¹¹

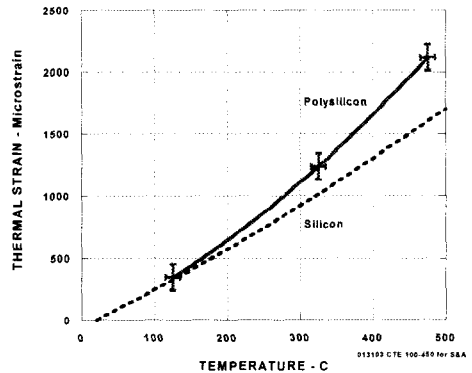


Fig.15 CTE of polysilicon (solid line) compared with single crystal silicon

4. 결론

다결정 실리콘에 대한 여러 가지 실험을 통하여 다음과 같은 결론에 도달하였다. 먼저, 상온에서는 하중 부하 속도에 따른 탄성계수의 변화는 크지 않았으며, 대략 160 ± 6 GPa로 측정되었다. 인장 시험 시 유연 연결 지그를 사용함으로써 매우 직선적인 응력-변형률 곡선을 쉽게 얻을 수 있었다. 상온에서 500 °C까지 온도가 변화될 때 탄

성계수는 10 GPa 정도 변화되었다. 본 측정 시스템은 시험편에 설정된 표점 거리 내의 변형을 만을 측정하고 시간에 따른 안정성이 높아 열팽창계수와 크리프 특성 측정에도 활용 가능하다.

후 기

본 연구는 2001 년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문임.

참고문헌

- Norton, R. L., Machine Design, Prentice Hall, Ch. 2, 2000.
- Johnson, G. T., Jones, P. T., Howe, R. T., "Materials Characterization for MEMS: a Comparison of Uniaxial and Bending Tests," Proceeding of the SPIE, Vol. 3874, pp. 94-101, 2000.
- Huh, Y.-H., Kim, D.-I., Yoon, K.-J., Kim, K.-S., Oh, C.-S., "Measurement of Micro-Tensile Properties using ESPI Technique," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 5, pp. 90-97, 2001.
- Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F., McNeil, S. R., "Determination of Displacements Using an Improved Digital Image Correlation Method," Image Vision Computing, Vol. 1, pp. 133-139, 1983.
- Read, D. T., Cheng, Y.-W., Keller, R. R., McColskey, J. D., "Tensile Properties of Free-Standing Aluminum Thin Films," Scripta Materialia, Vol. 45, pp. 583-589, 2001.
- Chasiotis, I., Knauss, W. G., "A New Microtensile Tester for the Study of MEMS Materials with the Aid of Atomic Force Microscopy," Experimental Mechanics, Vol. 42, pp. 51-57, 2002.
- Xie, H., Li, B., Geer, R., Xu, B., Castracane, J., "Focused Ion Beam Moiré Method," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 40, pp. 163-177, 2003.
- Sharpe, W. N., Jr., Yuan, B., Vaidyanathan, R., Edwards, R. L., "New Test Structures and Techniques for Measurement of Mechanical Properties of MEMS Materials," Proceedings of the SPIE Symposium on Microlithography and Metrology in Micromachining II, pp. 78-91, 1996.
- Sharpe, W. N., Jr., Danley, D., LaVan, D., "Microspecimen Tensile Tests of A533-B Steel," Small Specimen Test Techniques, ASTM STP 1329, American Society for Testing and Materials, pp. 497-512, 1998.
- Sharpe, W. N., Jr., Jackson, K., Coles, G., Eby, M. A., Edwards, R. L., "Tensile Tests of Various Thin Films," Mechanical Properties of Structural Thin Films, ASTM STP 1413, American Society of Testing and Materials, Orlando, pp. 229-247, 2001.
- Oh, C.-S., Sharpe, W. N., Jr., "Techniques for Measuring Thermal Expansion and Creep of Polysilicon," Sensors and Actuators A:Physical, Vol. 112, pp. 66-73, 2004.
- Read, D. T., Dally, J. W., "A New Method for Measuring the Constitutive Properties of Thin Films," Journal of Materials Research, Vol. 8, pp. 1542-1549, 1992.
- Sharpe, W. N., Jr., Yuan, B., Edwards, R. L., "A New Technique for Measuring the Mechanical Properties of Thin Films," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 6, pp. 193-199, 1997.
- Sharpe, W. N., Jr., "An Interferometric Strain/Displacement Measurement System," NASA Technical Memorandum 101638, 1989.
- Sharpe, W. N., Jr., Oh, C.-S., "High-Temperature Strain Measurement at the Micrometer Scale," ATEM'03, JSME-MMD, OS06W0394, 2003.
- Sharpe, W. N., Jr., "Mechanical Properties of MEMS Materials," The MEMS Handbook, CRC Press, 3-1 to 3-33, 2001.
- Oh, C.-S., Coles, G., Sharpe, W. N., Jr., "High Temperature Behavior of Polysilicon," Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 741, J3.6.1-J3.6.6, 2002.
- Michalick, A. M., Sene, D. E., Bright, V. M., "Advanced Modeling of Micromirror Devices," Proc. Int'l Conf. on Integrated Micro/Nanotechnology for Space Applications, pp. 214-229, 1995.
- Kahn, H., Huff, M. A., Heuer, A. H., "Heating Effect on the Young's Modulus of Films Sputtered onto Micromachined Resonators," Materials Research Society, Vol. 518, pp. 33-38, 1998.