

폴리실리콘 박막의 미소인장 시험 Micro-tensile Testing of Thin Poly-Si Film

*이상주¹, 배종성¹, #한승우¹, 이학주¹, 오충석²

*S. J. Lee¹, J. S. Bae¹, #S. W. Han(swahan@kimm.re.kr)¹, H. J. Lee¹, C. S. Oh²

¹ 한국기계연구원 나노기계연구본부, ² 금오공과대학교 기계공학과

Key words : Poly-Si, Thin film, Micro-tensile test, Young's modulus, Poisson's ratio

1. 서론

나노 구조물을 이용하여 새로운 제품을 제조하기 위해서는 나노 구조물의 여러 가지 물성들이 파악되어야 한다. 이러한 물성들은 반복성 (repeatability)을 가지고 측정되어야 하며, 측정 결과는 제품의 설계 및 성능 예측에 활용될 수 있어야 한다. 같은 재료라 하더라도 박막은 거대 구조물과는 제작 공정이 상이하므로, 결정립 크기와 유사한 두께로 인하여 기계적 물성이 현저히 다르므로, 실제 공정 및 제품에 사용되는 구조물의 크기와 같은 크기를 가지는 시편을 제조하여 그 물성을 측정할 필요가 있다. 반도체 공정 및 MEMS 구조물에 쓰이는 박막의 물성은 기존의 거대 구조물의 물성 측정 방법으로는 측정할 수 없는 경우가 대부분이다⁽¹⁾. 박막의 물성 측정은 그 물성의 활용뿐만 아니라 그 측정 방법만으로도 기술적인 가치를 인정 받고 있다. 본 논문에서 다루고 있는 박막의 기계적 물성은 반도체 공정 및 MEMS 기술을 적용한 제품의 설계 및 해석을 위한 기본 자료가 될 뿐만 아니라 신뢰성 문제와 깊은 연관이 있으며, 부품이 기계적인 운동을 포함할 때에는 더욱 중요한 역할을 하게 된다.

박막의 기계적 물성을 측정하는 방법에는 나노 압입 시험, 띠 굽힘 시험 등과 같이 간접적으로 탄성계수를 측정하는 방법들이 개발 되어 사용되고 있다⁽²⁻³⁾. 이와 달리 인장 시험은 새로운 소재나 새로운 시험 방법이 개발되었을 때에 소재의 기계적 물성 및 시험 방법의 타당성을 검증하기 위하여 시행되는 가장 기본적인 시험 방법이다. 시편의 시험 영역 (test section)에 균일한 응력과 변형률을 가할 수 있는 장점이 있어서 재료의 구성 방정식 (constitutive equation)을 결정하는 데에 필요한 응력-변형률 곡선을 직접적으로 얻을 수 있다.

나노 인장 시험에서는 변위 측정 기술, 하중 측정 기술, 시편 정렬 (alignment) 기술, 시편 고정 (gripping) 기술 등 몇 가지 기본적인 기술이 요구된다. 하중 측정으로는 미소한 용량을 가지는 하중계 (load cell)을 이용한 방법이 널리 사용되고 있으며, 나노 인장 시험에서는 AFM cantilever의 변형을 측정하여 시편에 가해진 하중을 결정하는 방법을 사용하기도 한다. 변위 또는 변형률 측정 기술은 나노 인장 시험 기술 중 가장 어려운 부분 중 하나이다. 시편의 크기가 작기 때문에 거대 재료 (bulk material)에서 많이 사용되는 스트레인 게이지 (strain gage) 방법을 적용할 수 없고 비접촉식 변위/변형률 측정 방법을 적용해야 한다. 현재 나노 인장 시험에서 많이 사용되는 방법은 ISDG (Interferometric Strain/Displacement Gage)이며⁽⁴⁾, 이외에도 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry), DIC (Digital Image Correlation), E-beam Moire, 마이크로 버니어 등의 방법이 이용되고 있다.

본 논문에서는 비접촉식 변위/변형률 측정 방법으로써 인장 시편에 일정거리 떨어져 형성된 두개의 특정 마커 (marker) 또는 표면 무늬를 microscope 를 이용하여 이미지를 확대하고, CCD 카메라를 사용하여 두 이미지 사이의 거리를 실시간으로 추적하여 변위를 측정 할 수 있는 real-time DIC 시스템을⁽⁵⁾ 사용하여 Poly-Si의 기계적 물성을 측정하였다. 이 시스템은 두 대의 CCD 카메라를 사용하여

시편의 인장 방향 변위와 인장방향에 수직한 방향의 변위를 각각의 카메라가 동시에 측정할 수 있어서, 측정된 데이터로부터 탄성계수와 푸아송 (Poisson) 비를 계산하였다. 또한 동일한 시험편을 빛의 이중 슬릿 간섭 현상을 이용하여 변위를 측정하는 ISDG 시험기로 측정하여 real-time DIC 시험기에서 측정된 변형률과 비교하였다.

2. 시편의 제작

본 연구에 사용된 시편은 두께가 3.5 μm , 폭이 300 μm , 평행부 길이가 1000 μm 인 다결정 실리콘으로써 미국의 MEMScAP 사의 MUMPs (Multi-User MEMS Process) 공정을 이용하여 제작된 시편이다. 이 시험편의 형상 및 제작 공정을 그림 1 에 나타내었다. 이 시편에는 ISDG의 측정을 위한 마커 (marker)가 형성되어 있다. 금으로 형성된 이 마커는 높이가 500 nm, 폭이 10 μm 이고, 두 금선의 간격은 250 μm 이다.

3. Real-time DIC 에 의한 측정 결과

Poly-Si 박막 시편의 기계적 물성 측정을 위한 미소인장 시험기는 180 μm 의 행정거리를 갖는 압전 (piezo electric) 구동기와 10 N 용량의 하중계 (load cell)로 구성되었으며, 시편은 그림 2(a)와 같이 시험기의 그립 (grip)에 순간 점착제로 고정된 후에 UV (ultraviolet) 경화성 점착제로 다시 단단히 고정되었다. 그 후에 시편의 장착 및 정렬 동안에 Poly-Si 박막을 보호하기 위한 실리콘 보를 소형 다이아몬드 회전 톱 (diamond saw)을 사용하여 절단하였다.

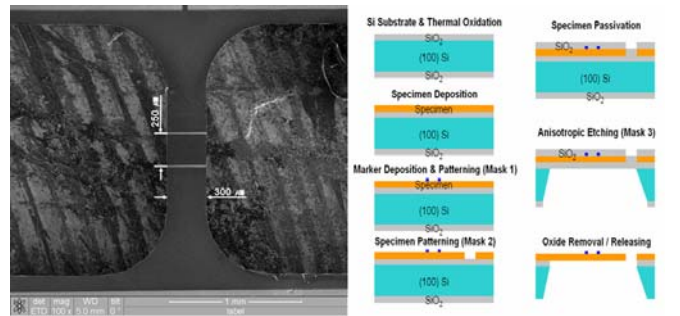


Fig. 1 A SEM image of Poly-Si specimen and specimen fabrication process

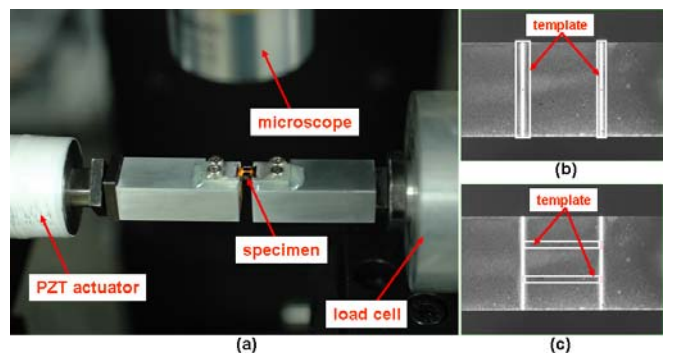


Fig. 2 A photograph of the test apparatus (a) and DIC templates at longitudinal direction (b) and transverse direction (c)

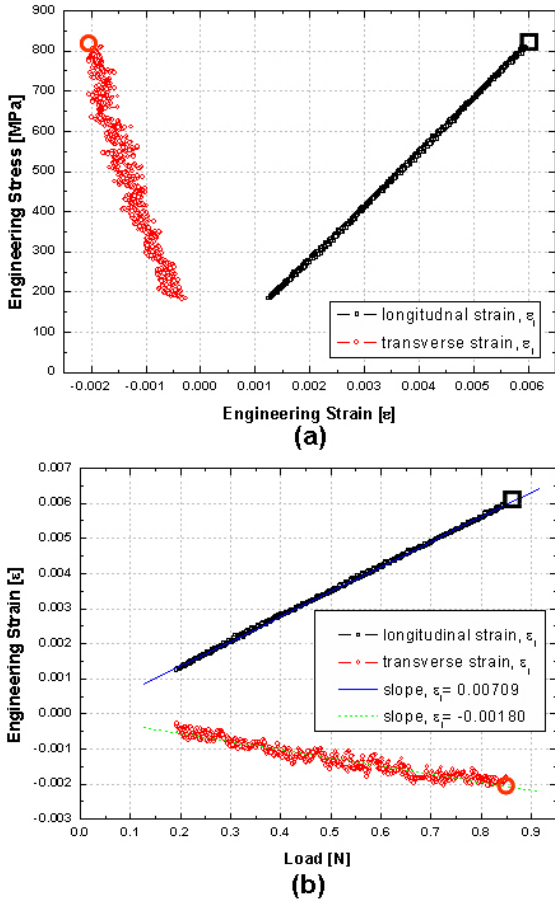


Fig. 3 Stress and biaxial strain for Poly-Si (a) and strain versus load for determination of Poisson's ratio (b)

Real-time DIC로 측정된 Poly-Si의 기계적 거동을 그림 3에 나타내었다. 그림 2(b)와 같이 인장 방향으로의 템플릿(template)을 추적하여 측정된 변위로부터 구한 탄성계수는 약 138 ± 2.7 GPa 정도의 값이고, 이 값과 그림 2(c)와 같이 인장 방향에 수직인 방향으로 표점 거리가 $114 \mu\text{m}$ 인 두 개의 템플릿을 추적하여 기울기(slope)를 구하고 이것을 식(1)에 대입하여 푸아송 비를 구하면 약 0.25 ± 0.026 의 값을 얻을 수 있었다⁽⁶⁾. Poly-Si 시편의 인장 강도는 약 1.1 ± 0.08 GPa 이었다.

$$\nu = \frac{d\varepsilon_t/dP}{d\varepsilon_l/dP} \quad (1)$$

4. ISDG 에 의한 측정 결과

ISDG는 2 중 슬릿의 간섭 현상에 기초를 두고 있다. 2개의 마커에서 각각 회절된 레이저 빔이 이루는 간섭 무늬는 식(2)와 같은 관계식을 통하여 마커 간의 거리 변화(δd)로 환산된다.^(4,7)

$$\delta d = \frac{\delta m_1 + \delta m_2}{2} \frac{\lambda}{\sin \theta_0} \quad (2)$$

여기서 δm_1 과 δm_2 는 photodiode array 1과 2에서의 간섭무늬 차수 변화이고, λ 는 광원으로 사용된 레이저의 파장, θ_0 는 시편의 수직 방향과 시편에서 photodiode array로 향하는 방향 사이의 각도이다.

Real-time DIC 측정 시험과 동일한 미소인장시험기를 사용하여 Poly-Si의 탄성계수를 측정하였고, Real-time DIC 측정 결과와 비교한 데이터를 그림 4에 나타내었다. ISDG에 의한 변형률 측정 결과는 real-time DIC 방법으로 측정된 탄

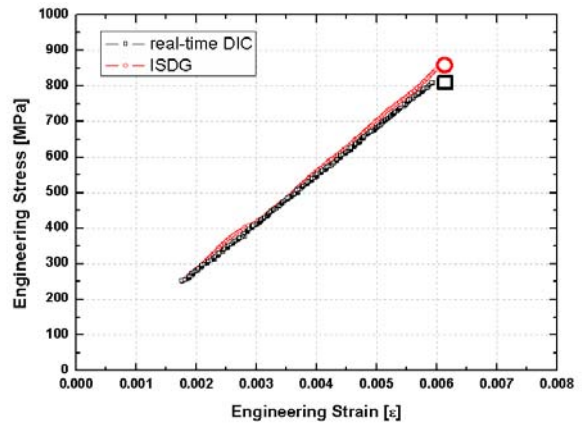


Fig. 4 The result of ISDG comparison with real-time DIC

성계수와 오차 범위 내에서 잘 일치하였다.

5. 결론

본 논문에서는 MEMS 제품에 많이 사용되는 Poly-Si의 기계적 물성을 미소인장시험 법으로 측정하였다. 이 때 변형률은 real-time DIC방법을 사용하여 재료의 탄성계수와 푸아송 비를 동시에 측정하였다. 푸아송 비의 정확도는 폭 방향 변형률의 측정 정확도에 의해 제한을 받는데, 보통 인장 방향보다 폭 방향 변형률의 측정 오차가 더 크다. 이것은 변형률 측정기의 분해능과 밀접한 연관이 있는데 본 연구에서 사용한 real-time DIC 측정기의 변위 분해능은 50 nm 였다⁽⁵⁾. 또한 Poly-Si의 인장 변형률을 ISDG 방법으로 측정하여 real-time DIC로 측정된 결과와 비교하여 보았는데, 탄성계수가 오차 범위 내에서 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

후기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 나노메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원(05-K14-01-013-00)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Yu, M. F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F., and Ruoff, R. S., "Strength and Breaking Mechanism of Multi-walled Carbon Nanotubes under Tensile Load," *Science*, **287**, 637-640, 2000.
2. Oliver, W. C., and Pharr, G. M., "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments," *Journal of Materials Research*, **7**, 1564-1583, 1992.
3. Kim, J. H., Lee, H. J., Han, S. W., Kim, J. M., and Baek, C. W., "Residual Stress Evaluation of thin Film Using Strip Bending Test," *Key Engineering Materials*, **321-323**, 121-124, 2006.
4. Sharpe, W. N., Turner, K. T. and Edwards, R. L., "Tensile Testing of Poly-silicon," *Experimental Mechanics*, **39**, 161-169, 1999.
5. Lee, S. J., Hyun, S., Han, S. W., Lee, H. J. Kim, J. H. and Kim, Y. I., "A Study of Mechanical Behavior of Au Films by Visual Image Tracing System," *Advanced Materials Research*, **26-28**, 1117~1120, 2007
6. ASTM E 132. "Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature," *Annual Book of ASTM Standard*, **06.01**, American Society for Testing and Materials, 1996
7. Research and Business R&B Inc., "Laser Interferometric Nano Extensometer; LINE," 2005