

MEMS 소재의 기계적 특성 평가를 위한 인장형 시편 및 시험기 제작

박준협[†] · 김정엽^{*} · 이창승^{**} · 좌성훈^{**} · 송지호^{***}

A Novel Tensile Specimen and Test Machine for Mechanical Properties of MEMS Materials

Jun-Hyub Park, Chung-Youb Kim, Chang Seung Lee, Sung-Hoon Choa and Ji-Ho Song

Key Words : MEMS(멤스), Mechanical Property(기계적 물성), Specimen(시편), Test Machine(시험기)

Abstract

Mechanical property evaluation of micrometer-sized structures is necessary to help design reliable microelectromechanical systems(MEMS) devices. Most material properties are known to exhibit dependence on specimen size and such properties of microscale structures are not well characterized. This paper describes techniques developed for tensile testing of materials used in MEMS. Epi-polycrystalline silicon is currently the most widely used material, and its tensile strength has been measured as 1.52GPa. We have developed an uniaxial testing machine for testing microscale specimen using electro-magnetic actuator. The field magnet and the moving coil taken from an audio-speaker were utilized as the components of the actuator. Structure of specimen was designed and manufactured for easy handling and alignment. In addition to the static tensile tests, new techniques and procedures for measuring strength are described.

1. 서론

초소형 전자기계(Micro-Electro Mechanical Systems)는 낮은 가격으로 대량 생산이 가능하게 하는 일괄 공정을 사용해서 초소형 전자기계시스템을 만드는 새로운 생산 기술이다. 초소형 전자기계로는 마이크로미터(micrometer)에서 밀리미터(millimeter) 단위의 크기를 갖는 센서(sensor)와 액츄에이터(actuator) 등이 있다. 이 새로운 기술의 대두에 따

라, 초기에는 새로운 재료, 제작, 생산 기술의 개발에 연구가 집중되었다. 그러나 개발된 제품의 상품화를 위해서는 신뢰성 문제가 걸림돌이 되었다.

초소형 전자기계에 나타나는 신뢰성 문제로는 잔류응력, 점착, 피로, 파괴 등이 있다. 따라서 이러한 신뢰성 문제를 설계 초기 단계에서 예측하기 위해서는 재료의 기계적 성질의 확보가 중요하다. 그런데 재료의 기계적 성질은 크기와 제작 공정에 의존한다고 알려져 있다.

따라서 마이크로 단위의 기계적 성질을 구하는 것이 중요하다. 그런데 이러한 마이크로 단위의 기계적 성질을 구하기 위해서는 시편 준비, 하중 인가와 측정, 변위 또는 변형을 측정에서의 어려움이 있다. 이러한 마이크로 단위의 기계적 물성을 측정하기 위해서 많은 연구자들이 연구를 수행하였다.

외팔보 굽힘[1], 3 점 굽힘[2], 벌지(bulge) 시험

[†] 동명정보대학교 메카트로닉스공학과
E-mail : jhyubpark@korea.com
TEL : (051)610-8362 FAX : (051)610-8349

^{*} 여수대학교 자동차공학과

^{**} 삼성종합기술원 MEMS LAB

^{**} 카이스트 기계공학과

[3,4]과 같은 방법들이 마이크로 단위의 기계적 성질을 구하기 위해서 채택되었다. 그러나, 굽힘 형태의 시험에서 얇은 박막의 큰 변형율을 측정에는 어려움이 있다. 또한 벌지 시험 시에는 응력 집중 현상이 나타난다. 그래서 인장 시험(tensile test)이 재료 강도를 측정하는 방법으로는 가장 직접적인 방법이다. 그러나, 인장 시험을 수행하기 위해서는 아주 얇은 박막을 시험기에 체결(gripping)하고 정렬(alignment)하기 위해서 손쉽게 다루는 방법의 개발이 선행되어야 한다. 박막의 인장 시험에서, 이러한 어려움을 극복하기 위해서 새로운 기술들이 개발되어 왔다[5-7].

따라서, 본 연구에서도 박막의 인장 시험을 편리하게 할 수 있도록 시험편의 구조를 설계/제작하고, 인장 시험을 할 수 있는 시험기를 전자기력을 이용한 동전형 시험기를 개발하였다. 개발된 시험편과 시험기를 이용하여 박막의 정적 및 피로 시험을 손쉽게 수행하는 절차(procedure)를 개발하였다. 개발된 시험편 및 시험기를 이용하여 에피폴리실리콘(epitaxial polycrystalline silicon) 박막의 인장강도를 측정하였다.

2. 시험편 설계와 제작

2.1 시험편 형상

서론에서 언급한 바와 같이, MEMS 구조물은 마이크로 단위의 박막으로 구성되어 진다. 이러한 MEMS 구조물에 사용되는 재료의 기계적/피로 특성을 얻기 위한 시험을 하여야 한다. 그런데 마이

크로 단위의 박막 인장시험은 여러 가지 어려움 때문에 수행하기가 쉽지 않다. 특히 박막 시험을 가지고 시험기 장착과 같은 작업을 하기란 쉽지 않아서, 그 동안 재료의 기계적/피로 특성을 얻기 위한 가장 정확한 시험 방법인 인장형 시험이 제한적으로 이루어져 왔다.

그래서 본 연구에서는 MEMS 재료의 기계적 및 피로 성질의 간편한 측정을 위한 시험편 구조를 다음과 같이 제안하였다.

그림 1 에서 보는 바와 같이, 이방성 건식 식각 공정으로 몸체(substrate)를 수직으로 식각하여 그림 2 와 같은 기존 시험편 제작 방법인 이방성 습식 식각(wet etching)에 의한 경사면을 없앴으로써 체결(grip end) 부분의 면적을 크게 하여 체결력(gripping force)을 증가시킬 수 있다.

그리고 체결(grip end) 부분에 작은 구멍을 두어서 시험편을 시험기에 작은 핀으로 장착함으로써 시험편 장착을 위해서 UV 본드가 필요없어 장착이 상당히 쉬워지고 시험편의 중심 잡기(alignment) 또한 쉽게 할 수 있다.

웨이퍼에서 시험편을 하나씩 잘라 낼 때 톱질(sawing) 방법을 사용하지 않고 시험편 제작 공정 상에서 측면 지지부(side support strip)를 포함한 시험편 주위를 일부분의 연결부(bridge)를 제외하고 미리 식각해 놓음으로써, 시험 박막에 손상을 입힐 위험이 있는 톱질(sawing) 방법을 채택하지 않아도 되고, 완전한 시험 박막으로 만들기 전, 시험편을 하나씩 잘라 내어 시험 하나씩 후속 공정을 진행하지 않고 웨이퍼 단위로 모든 공정을 할 수 있으므로 시험편을 대량으로 손쉽게 만들 수 있다.

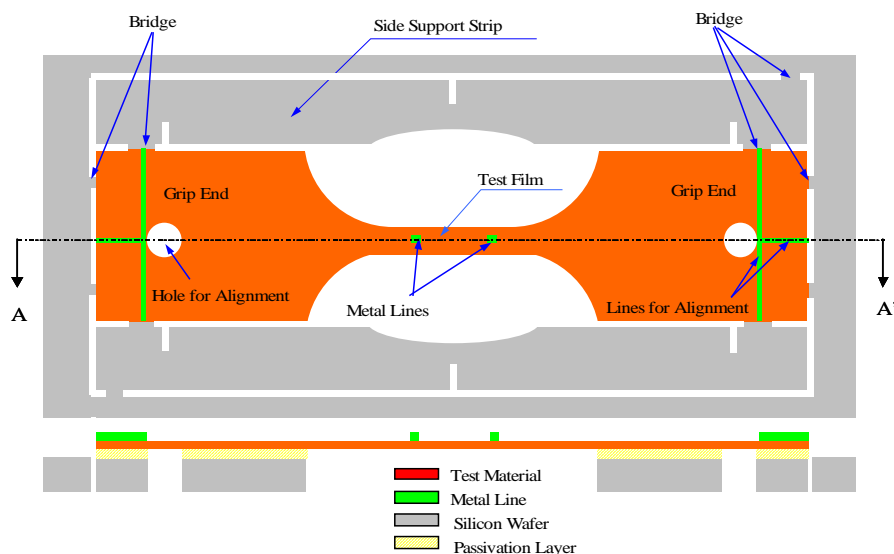


Fig 1. Structure of suggested specimen

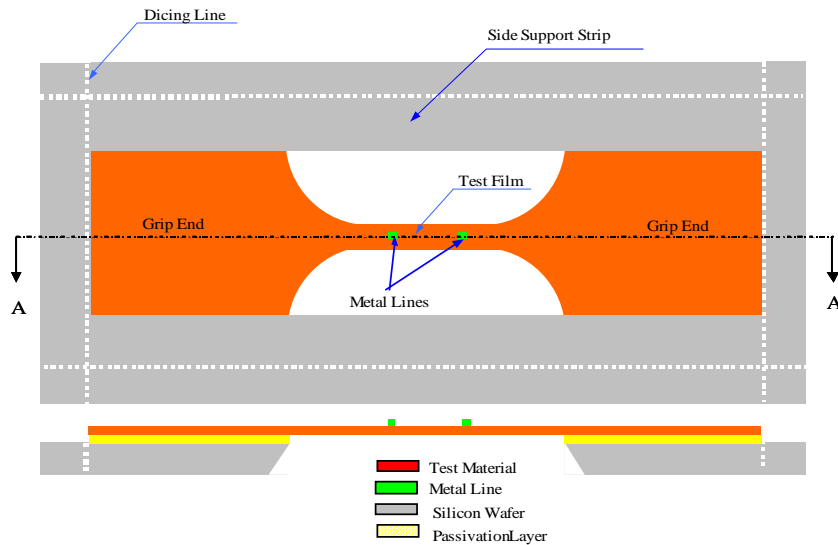


Fig 2. Structure of existing specimen

또한 시험기에 시편을 장착한 후에 측면 지지부를 제거하기 위해서, 연결부(bridge)를 제외하고 측면 지지부와 시편 사이를 미리 식각하여 둠으로써, 시험 박막에 손상을 입힐 위험이 있는 톱질 방법을 채택하지 않아도 되도록 하였다. 이 때 구조는 그림 1 에서 알 수 있는 바와 같이 시험 박막 면에 평행한 힘에 의해서 제거되기 쉽게 측면 지지부에 관통 식각과 시편 본체와 측면 지지부 사이에도 연결부를 제외하고 관통 식각을 하여 둔다.

{100} 실리콘 웨이퍼에 동시에 가공되었다. 그림 3 은 시편 배열의 모습이고 표 1 은 한 장의 웨이퍼에 구성되어 있는 시편의 치수 구성과 숫자이다. 한 웨이퍼 상에서 다양한 치수 시편을 구성하여 박막의 기계적 물성에 사이즈(size) 영향을 파악할 수 있도록 하였다.

시편의 가공은 순서는 다음과 같다. 먼저 4 인치 실리콘 웨이퍼의 양면에 보호막으로 사용할 실리콘 산화막(silicon dioxide)을 0.1mm 이상 쌓은 다음,

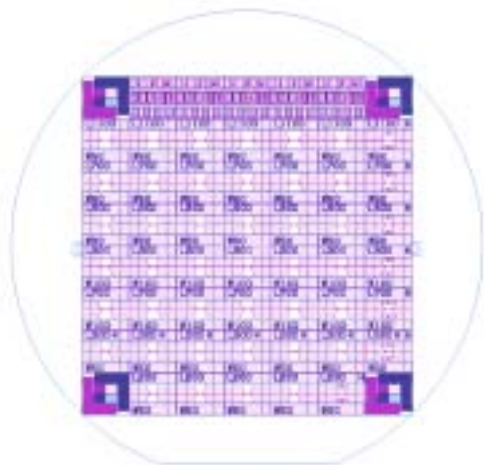


Fig 3. Specimen array on a wafer

Table 1 Configuration of specimen

No.	Width	Gage length	Total length
1	200	200	800
2	200	300	900
3	240	240	960
4	200	360	1080
5	200	200	1000
6	200	300	1100
7	480	240	1200
8	1000	240	1240

(unit : μm)

2.2 시편 제작

그림 1 과 같은 형상의 47 개 시편이 4 인치

앞면에 시험할 대상 재료를 목표의 두께 만큼 쌓는다. 그리고 변형을 측정과 중심 정렬을 위해서 티탄늄과 같은 금속 박막을 0.1mm 이상 쌓는다.

그리고 변형을 측정과 중심 정렬을 위한 금속선을 만들기 위해서 사진 공정과 금속 박막을 습식 식각을 한다. 다음 시험할 대상 재료를 RIE(reactive ion etching)와 같은 건식 식각 방법을 통해서 시편 형상으로 만든다. 그리고, 시편을 보호하기 위해서 웨이퍼 앞면에 PR(photo resist)를 코팅(coating)한 후 보강을 위해서 더미(dummy) 웨이퍼를 앞면에 붙인다.

시험할 재료만 남겨두기 위해서 웨이퍼 뒷면을 건식 식각을 통하여 실리콘 몸체를 10mm 미만 남겨둔다. 이후 남은 실리콘 몸체는 XeF₂ 가스로 등방성 식각을 한다. 그리고 실리콘 산화막을 BOE로 제거한다. 그리고 최종적으로 더미 웨이퍼와 앞면에 코팅되어 있는 PR을 제거한다.

위와 같은 공정을 거친 후 제작된 시편들을 가진 웨이퍼의 모습이 그림 4이다.

3. 시험기 제작

3.1 시험기 구동부

마이크로미터급의 시편을 시험할 수 있는 시험기의 액추에이터(actuator)로는 압전(piezo), 모터(motor) 또는, 열변형을 이용한 변위 제어용과 전자장력(electro magnetic force)을 이용한 하중제어용이 있다. 그런데 MEMS 제품은 대부분 고도폴이수(high cycle) 수명을 가지고 MEMS 제품에 사용되고 있는 재료는 금속 계통이 많다. 그런데 금속

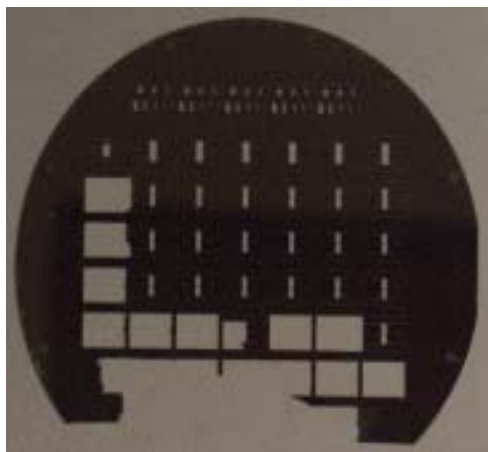


Fig 4. Specimen array after fabrication

박막을 변위제어로 일정변위의 진폭을 가진 피로 시험은 레첵(ratchet)현상 때문에 수행하기가 어렵다. 그래서 금속 박막의 피로시험을 위해서는 하

중제어가 가능한 것이 편리하다. 그런데, 변위제어용 액추에이터로 시험기를 만들어서 하중제어 시험을 할 때는 폐루프(closed loop) 제어용 하드웨어나 소프트웨어의 필요성 때문에 고주파수에서 피로 시험을 수행하기에는 어렵다.

따라서 본 연구에서는 별도의 폐루프 제어 장치가 필요 없이 하중제어가 가능한 전자장력 액추에이터를 이용하여 시험기를 제작하였다. 전자장력의 원리는 일정 자장내에 놓여진 구동코일(moving coil)에 전류를 흘려 가진력을 얻는다. 이때 가진력의 크기는 식(1)과 같이 자장의 세기와 구동코일에 흐르는 전류의 크기에 의해 결정된다.

본 연구에서는 그림 5 와 같이 자장 발생부와 구동코일을 시판되고 있는 음향 스피커(speaker)에 사용되고 있는 부품을 이용하기로 하였다.

$$F = \frac{1}{9.8} \cdot B \cdot l \cdot i \quad (1)$$

여기서, B 는 자속밀도(wb/m²), l 은 구동코일의 길이(m)이며, i 는 구동전류(A)이다.

3.2 시험기 몸체

시험기에서 구동코일이 감겨진 보빈(bobbin)을 고정시켜 주는 지지부(flexure)가 중요하다. 이 지지부는 시편에 정밀한 직진운동(rectilinear travel)을 가해질 수 있도록 특별한 접판 스프링(leaf spring)

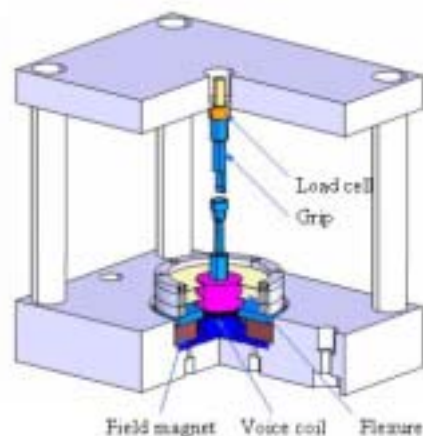


Fig 5. Structure of the developed testing machine

구조로 되어 있다. 가장 기본적인 접판 스프링 구조는 그림 6 a)와 같은 외팔보 형태이다 그러나 외팔보의 자유단(free end)에 하중이 가해 질 때 자유

단은 곡선 경로(curvilinear path)로 변형된다. 그림 6 b)와 같이 두개의 외팔보로 만든 지지부는 무시할 수 있는 회전 변위를 가지지만 수평변위(parasitic deflection) q 를 가진다. 그림 6 b)와 같은 지지부는 작은 변위(displacement)에서는 문제가 없지만 큰 변위가 요구될 때는 그림 6 c)와 같은 지지부의 구조가 적당하다. 이 지지부를 구성하고 있는 스프링이 동일한 재질과 크기로 만들어 졌다면 하중이 작용할 때 4 개의 스프링이 똑 같은 형태로 변형할 것이다. 따라서 플랫폼 A 에 대한 플랫폼 B 의 수평 운동은 고정단 C 에 대한 플랫폼 A 의 수평 운동에 의해서 상쇄될 것이다. 따라서 고정단 C 에 대한 플랫폼 B 는 직진운동을 할 것이다[8].

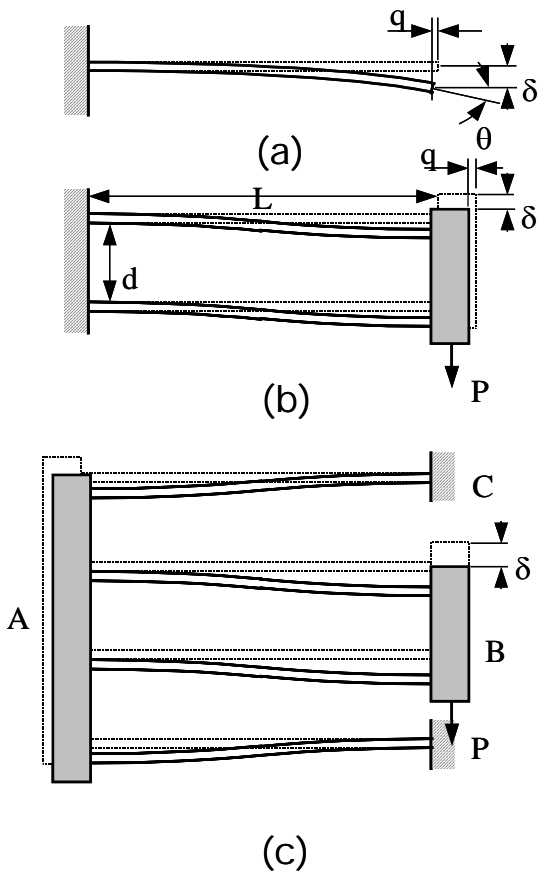


Fig 6. Leaf spring mechanism (a) Cantilever beam (b) Simple flexure (c) Compound flexure

그러나 앞에서 언급한 것처럼 플랫폼 B 가 수평 변위 없이 직진운동을 하기 위해서는 구성하고 있는 4 개의 스프링이 동일한 재질과 동일한 크기로

만들어져야 된다. 그러나 가공상의 오차는 피할 수가 없을 것이다. 따라서 본 연구에서는 그림 7 과 같이 8 개의 스프링을 사용해서 대칭구조로 만들어 줌으로써, 제작 시 발생하는 약간의 가공오차가 있더라도 플랫폼 B 가 수평변위 없이 직진운동을 하도록 하였다.

그림 8 은 제안된 접판 스프링 기구를 사용해서 만든 동전형 기계물성 시험기의 사진이다.

4. MEMS 재료의 인장 시험 및 피로 시험

MEMS 재료 물성 시험을 위해서 개발된 시험기를 이용해서 자이로(gyroscope) 등 MEMS 장치에

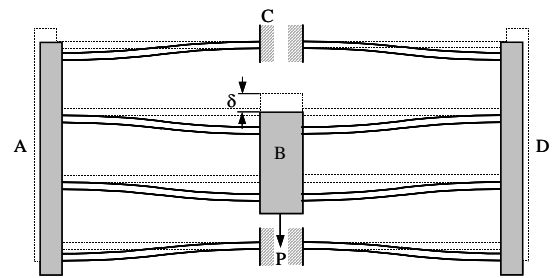


Fig 7. Suggested leaf spring mechanism



Fig 8. Developed testing machine for MEMS materials

많이 사용되고 있는 에피폴리실론(epi-ploy crystalline silicon)으로 앞에서 설계한 형상으로 시편을 만들어서 인장시험을 수행을 하였고 피로시

험에 대한 예비 시험을 수행하였다.

기존의 연구결과 중에는 에피폴리실리콘에 대한 인장시험 결과 없어서 기존의 시험 결과가 있는 폴리 실리콘의 인장 시험결과와 비교를 한 것이 표 2 이다. 이 표에서 볼 수 있는 것처럼 같은 재질이라도 연구자들의 시험 결과는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 MEMS 장치 개발에 사용하는 재질에 대한 기계적 물성은 직접 시험을 수행해야 함을 알 수 있다.

그림 9 는 개발된 시험기를 이용해서 피로시험의 가능성을 살펴보기 위해서 각 주파수에서 예비 수행한 결과이다.

5. 결 론

본 연구를 통해서 체결(gripping)과 중심잡기(alignment)가 편리한 새로운 형태의 MEMS 재료 시험용 시편 구조를 개발하였으며, 또한 별도의 페루프 제어 장치가 필요 없이 하중제어가 가능한 전자장력 액츄에이터를 이용하여 시험기를 제작하였다. 개발된 시편과 시험기를 이용하여 에피폴리실리콘의 인장시험을 수행하였고 피로시험이 가능성함을 알 수 있었다.

향후 개발된 시험기를 이용하여 본격적인 피로

Table 2 Representative strength of MEMS materials

Reference	Material	Strength
Park	Epi-polysilicon	1.52±0.16
Jones	Polysilicon	2.6±0.4
Brown	Polysilicon	2.7±0.2
Koskinen	Polysilicon	2.7±0.3
Tsuchiya	Polysilicon	3.2±0.2
Geek	Polysilicon	1.8
Lavan	Polysilicon	4.3±0.6
Knauss	Polysilicon	1.0±0.1
Sharp(wide)e	Polysilicon	1.2±0.2
Sharp(narrow)e	Polysilicon	1.4±0.2

(unit : GPa)

시험을 수행할 예정이다.

참고문헌

- (1) Johansson, S., Schweitz, J. A., L. Tenez, J. Tiren, 1988, "Fracture testing of silicon micro-elements in situ in a scanning electron microscope," J. Appl. Phys. 62 (10), pp. 4799-4803.
- (2) Komai, K., Minoshima, K., Tawara, H., Inoue, S., Sunako, K., 1994, "Development of mechanical testing machine for micro-elements and fracture strength evaluation of single-crystalline silicon micro-elements," Trans. Jpn. Soc., Mech. Eng. A 60-569, pp. 52-58.
- (3) Bromley, E. I., Randall, J.N., Flanders, D.C., Mountain, R.W., 1983, "A technique for the determination of stress in thin-films," J. Vac. Sci. Technol. B 1 (4), pp. 1364-1366.
- (4) Tabata, O., Kawashata, K., Sugiyama, S., Igarashi, I., 1989, "Mechanical property measurement of thin-films using load-deflection of composite rectangular membrane," in:Proceedings of the IEEE Micro-Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 152-156.
- (5) Sharpe Jr., W.N., Yuan, B., Vaidyanathan, R., Edwards, R. L., 1997, "Measurement of young's modulus, Poisson's ratio, and tensile strength of polysilicon," in:Proceedings of the IEEE MEMS '97, pp. 424-429.
- (6) Tsuchiya, T., Tabata, O., Sakata, J., Taga, Y., 1997, "Specimen size effect on tensile strength of surface micro-machined polycrystalline silicon thin-films," in:Proceedings of the IEEE MEMS '97, pp. 529-534.
- (7) Cunningham, S.J., Suwito, W., Read, D.T., 1995, "Tensile testing of epitaxial silicon films," Technical Digests of Transducers '95, pp. 96-99.
- (8) Jones, R. V., 1951, "Parallel and rectilinear spring movements," Journal of Scientific Instrumentation, 28, pp. 38-41.

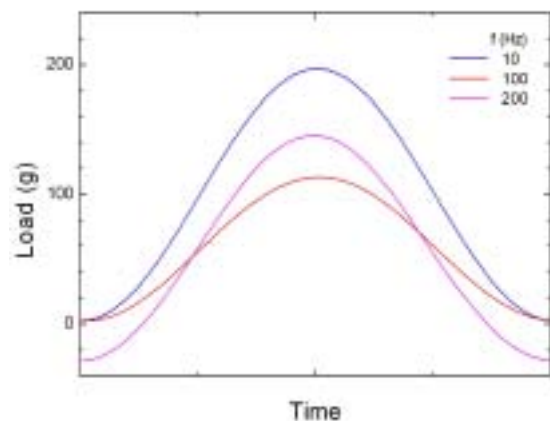


Fig 8. Preliminary fatigue test using the developed testing machine for MEMS materials