

공진주파수 분석을 통한 MEMS용 Si 소재의 기계적 물성 및 미세파손 분석 기법

김재석*, 이세호, 권동일
 서울대학교 재료공학부 마이크로신뢰성 연구실

Characterization of the mechanical and micro-fracture properties of material for ME the resonance frequency

Jaesug Kim*, Se-Ho Lee, Dongil Kwon
 School of Materials Science and Engineering, Seoul National University

Abstract - (100) single crystal Si는 좋은 anisotropy etching 성질과 기계적 강도를 가지고 있어 MEMS 구조용 소재로 사용되고 있다. (100) Si의 신뢰성 평가를 위하여 필요한 탄성계수를 측정하고 반복동작에 의한 응력에 의한 파손특성을 평가하기 위하여 micromachining을 통해 resonator를 제작하였다. Resonator의 공진주파수를 분석함으로써 탄성계수를 구하고자 하였으며 반복응력에 대한 파괴특성을 평가하기 위하여 공진 상태에서 파괴가 일어날 때까지의 사이클 수를 측정함으로써 반복응력에 대한 Si의 피로특성을 평가하고자 하였다. 실험 결과 (100) Si의 <110> 방향으로의 탄성계수를 측정할 수 있었으며 Si의 미세파손의 응력에 대한 의존성을 평가할 수 있었다. 평가결과 Si의 미세파손 메커니즘은 억제된 균열의 진전에 의한 subcritical crack에 의한 피로파괴 현상보다는 과도한 스트레스에 의한 순간적인 균열전파에 의해 지배됨을 관찰할 수 있었다.

로 사용된 (100) Si의 피로 강도를 구하였다. 나아가 구조의 손상도로 표현될 수 있는 노치를 임의적으로 도입함으로써 응력이 집중되도록 하여 파괴를 일으켜 파괴양상을 관찰하였다.

2. 본 론

2.1 MEMS resonator 디자인

공진주파수를 분석을 통해 재료의 피로강도와 손상도를 얻어낼 수 있도록 하는 연구의 목적에 맞추어 resonator를 설계하였다. CAEDENCE를 이용하여 그림 1과 같이 MEMS resonator를 디자인하였으며 suspending beam중 하나의 빔에 임의로 노치(notch)를 도입하여 취약부를 만들어 응력 집중을 일으켜 노치에서의 파괴를 유도하였다. 각 부위에 대한 상세도와 수치는 그림 2와 테이블 1에 정리하였다.

1. 서 론

Micromachining을 통해 제작되는 MEMS resonator나 gyroscope의 경우 일반적으로 수kHz대의 높은 주파수에서 작동하도록 설계되며 공진주파수가 높을수록 사용주파수 대역이 올라가 성능이 향상된다. 이러한 고주파에서 사용될 경우 재료는 일반적으로 반복동작에 의해 피로를 일으키게 된다. 이러한 피로특성에 대한 정확한 평가는 액츄에이터의 수명을 예측해주며 평가된 수명은 구조물의 형상에 대한 타당성을 검증하고 설계기준을 제시해준다. 이러한 피로평가는 하중이나 대기조건 등의 가속조건을 조절함으로써 가속실험을 통해 이루어진다.

MEMS에 사용되는 마이크로 재료의 경우 기존의 금속 재료의 피로평가를 위한 실험법과 해석이 더 이상 유효하지 못하기 때문에 다양한 방법이 연구되어지고 있다.[1-3] MEMS의 피로연구에 사용되는 방법으로는 크게 두 가지로 마이크로 텐사일 머신을 이용하여 strain controlled low cycle fatigue를 유발하는 기법과 MEMS 소자를 공진시켜 수명을 측정하는 기법이 있다. Micro tensile 머신을 사용하는 기법의 경우 해석방법이 쉽고 재료의 물성을 비교적 정확히 얻어낼 수 있는 장점이 있지만 재료마다 시편의 제작법이 다르며, 제작된 시편을 handling하는 데 있어서 적당한 tool이 아직 확립되어 있지 않을 뿐 아니라 alignment, holder제작에 있어서 어려움이 있어서 아직 널리 사용되지 못하고 있으며 특히 미소변위를 측정하는 기법에 있어서 어려움이 있다고 보고되어지고 있다. 이에 반해 공진주파수를 이용한 실험법은 MEMS소자가 작동하는 하중인 정전기력을 이용해 작동시킴으로써 실제 상황을 모사 할 수 있으며, 전자회로의 구성을 통해 제어가 비교적 쉽다. 또한 구조물을 공진시킴으로써 통상적인 정전기력으로는 얻기 어려운 변위를 일으켜 Acceleration factor를 높일 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이와 같은 공진주파수를 이용한 실험 기법의 장점을 이용하여 (100) Si의 탄성계수를 측정하고 수명평가 뿐 아니라 마이크로 시스템의 구조재

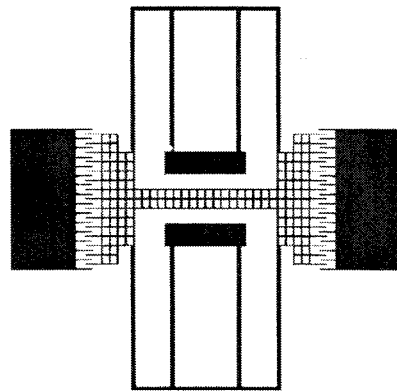


Figure 1. Schematic drawing of micro-resonator for microfatigue testing under the electrostatic force

Table 1. Dimensions of the micro-resonator in detail(μm)

L _b	W _b	L _{sy}	W _{sy}	W _{sa}	L _{sa}	W _t	L _t	L _c	X _c	g	W _c	t	N
300													
~	10	110	60	90	570	10	170	60	30	10	10	10.	15
600												20	

t는 Si의 두께이며 N은 콤드라이브 내의 comb의 개수이다.

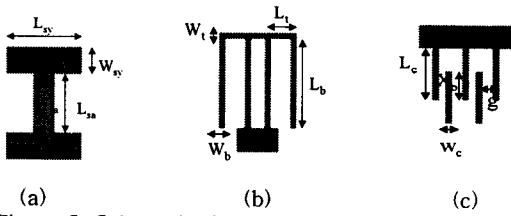


Figure 2. Schematic drawing of MEMS (a) moving shuttle (b) suspending beam (c) comb drive

2.2 MEMS resonator 제작

Si를 이용하여 resonator를 만들기 위하여 먼저 (100) Si wafer와 coming glass를 anodic bonding한 뒤 CMP를 이용하여 Si의 두께를 10, 20 μ m로 하였다. Patterning을 한 뒤 ICP deep Si etcher를 이용하여 Si를 dry etching 하였다. Etching 뒤 PR을 제거하고, HF를 이용하여 suspending beam하부의 glass를 제거하였다. 제작 결과가 그림 3과 4에 나타나 있다. 빔의 너비에 대한 노치의 길이 비 h/w 는 0.3, 0.5, 0.7로 다양하게 하였으며 제작 결과 radius 3~5 μ m인 노치를 만들 수 있었다.

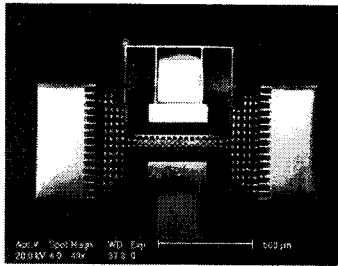


Figure 3. Overview of MEMS device for acceleration life test

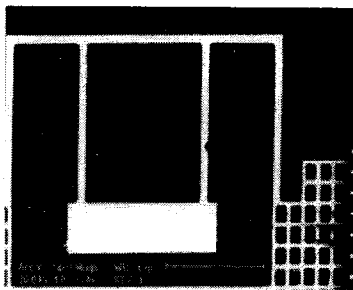


Figure 4. Notched beam in the MEMS device

2.3 공진주파수 측정 및 탄성계수 분석

진동하는 resonator의 동역학적인 해석과 파손분석을 위해 필요한 탄성계수를 micro-resonator를 이용하여 구하였다. 식 (1)을 이용하여 micro resonator로부터 측정된 공진주파수를 환산하여 탄성계수를 구하였다.[4] (100) Si 웨이퍼의 flat mark 쪽으로 패터닝을 할 경우 그림 5와 같이 빔의 움직이는 방향은 <110>이 된다.

$$F_r = \left[\frac{2Et (W_b / L_b)^2}{m} \right]^{1/2} \quad (1)$$

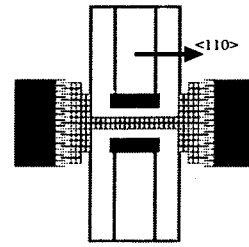


Figure 5. Direction of the movement of the beam in the respect of the (100) Si

탄성계수를 계산하기 위하여 노치가 도입되지 않은 resonator의 공진주파수를 측정하였다. 측정된 공진 주파수를 탄성계수로 환산하여 그림 6과 같은 결과를 얻었다.

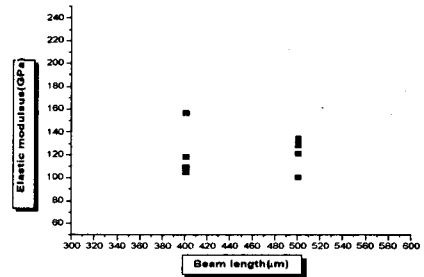


Figure 6. Elastic modulus of <110>direction of (100) Si vs. beam length

(110) Si의 <100>방향으로의 탄성계수는 123.4GPa으로 계산되었다.

2.4 반복응력에 대한 피로파괴특성 평가

제작된 MEMS resonator를 공진 상태에서 파괴가 일어날 때까지의 시간을 측정하였다. 공진 시 빔의 노치에 발생하는 응력을 계산하고, 부가 응력에 대한 시간을 측정함으로써 재료의 피로 강도를 측정하고자 하였다. 파괴되기 이전의 공진주파수를 측정한 뒤 공진을 일으키는 데 필요한 최소 전압을 가한 상태로 가속실험을 행하였다. 공진 상태에서 발생하는 변위를 측정하고 이로부터 빔의 노치에 부가되는 응력을 환산하였다. 파괴까지의 사이클 수, 초기 공진주파수와 파괴후의 공진주파수 등의 실험결과를 table 2에 정리하였다.

Table 2. Cycles to failure of Si micro-resonator

$\Delta \sigma$ (MPa)	N(Cycles)	status	f_R (kHz), initial	f_R (kHz), shifted
5.6	∞	not fractured	3.88	3.88
7.8	∞	not fractured	3.90	3.90
8.5	∞	"	4.74	4.74
9.4	∞	"	2.30	2.30
62.2	~4000	brittle fracture	2.88	2.35
73.8	~2000	"	3.04	2.65
86	~1000	"	3.39	2.89
126	1	"	6.62	5.94

$\Delta\sigma$ 는 노치 단면에 인가되는 반복하중의 진폭이다. 소재의 손상여부를 알기 위해 구동을 멈춘 뒤 다시 공진주파수의 변화를 측정하고 SEM을 통해 표면을 관찰하였다. $\Delta\sigma$ 가 60MPa 이상이 되면 순간적으로 균열이 급속히 진전하여 1~2초 사이에 파괴되는 양상을 보였다. 이와 같은 파괴 양상은 피로파괴라고 보기에는 무리가 있으며 오히려 과하중에 의한 파괴라고 할 수 있다. 이와 같은 분석을 파괴된 단면을 통해 확인할 수 있었다. 그림 7을 살펴보면, 피로파괴에 의한 파도문양이 관찰되지 않고, 전형적인 벽개 파괴양상을 확인할 수 있다.[5]

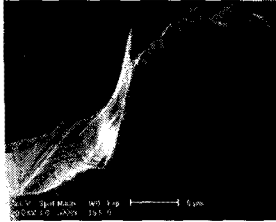


Figure 7. Fractography of the beam section

파괴된 후 공진주파수는 그림 8에 정리한 것과 같이 0.4~0.5kHz 감소하는 것을 알 수 있다. 공진주파수의 변화로부터 구조물의 파손도를 예측할 수 있음을 알 수 있다. 반면 10MPa 이하에서는 공진주파수의 변화가 없었으며 표면이 전혀 손상되지 않았다.

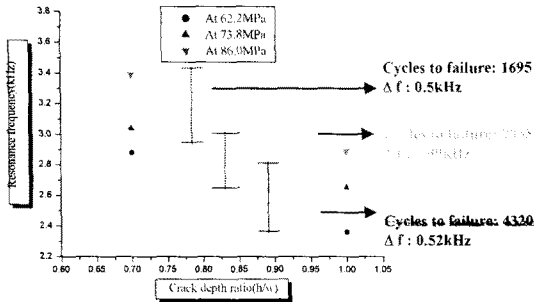


Figure 7. The shift of resonance frequency due to the fracture of the suspending beam

3. 결 론

MEMS용 구조재료 사용되는 (100) Si의 탄성계수와 파괴특성을 평가하기 위하여 micromachining을 이용하여 MEMS resonator를 제작하고 공진주파수를 측정하고 분석하였다. 공진주파수 분석을 통해 계산된 (100) Si의 $\langle 110 \rangle$ 방향으로 탄성계수는 123.4GPa이었다. 공진 상태에서 반복응력을 인가하여 피로파괴특성을 평가한 결과, 응력진폭 10MPa 이하에서는 거의 무한대에 가까운 수명을 보이며, 60MPa 이상에서는 순간적으로 파괴되는 결과를 보였다. 이로부터 Si의 파괴특성은 slow crack growth에 의한 피로파괴보다는 과하중에 의한 급속한 crack의 전파에 의해 지배됨을 알 수 있었다. 이를 검증하기 위하여 파괴된 빔의 단면을 SEM으로 관찰한 결과 벽개 파단면을 확인할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

[1] Taechung Yi and Chang-Jin Kim, "Measureme mechanical properties fo MEMS materials", Meas

Technol. vol. 10, pp.706-716, 1999

[2] William N. Sharpe, Jr., Bin Yuan, and R. L. E "New Technique for Measuring the Mechanical Proper Thin Films", Journal of Microelectromechanical Syste 6, No. 3, pp.193-199, 1997

[3] William W. Arsdell and Stuart B. Brown, "Sub Crack Growth in Silicon MEMS", IEEE Journa Microelectromechanical Systems, vol. 8, No. 3, pp.3 1999

[4] Kun Wang, and Clark T.-C. Nguyen, "High-Medium Frequency Micromechanical Electronic F Journal of Microelectromechanical Systems", Vol. 8, pp. 534-557, 1999

[5] 이동녕, 김정수, 이성근, "변형 및 파괴역학", 회중당, 199