

마이크로머시닝 기술에 의해 형성된 막에 있어서의 잔류응력 추정

민영훈, 김용권  
서울대학교 전기공학부

Estimation of residual stress in micromachined films

Young-Hoon Min, Yong-Kweon Kim  
Seoul National University, School of Electrical Engineering

**Abstract** - A new method of measuring residual stresses in micromachined films using beam or ring structures is proposed. Using the proposed method, more exact value of residual stress can be obtained without any ambiguities in conventional buckling method. Theoretical modeling with respect to this method is described, and experiment is performed. The structure and fabrication process in this paper are simple and widely used in surface micromachining. Therefore, it is possible to obtain a synchronous measurement. A synchronous and reasonable estimation of residual stresses in micromachined films enables us to obtain the prediction of more exact performance in micromachined devices.

1. 서 론

마이크로머시닝 기술에 의해 형성된 구조물에 있어서 그 구조물을 구성하는 막의 잔류응력 측정은 이 마이크로머시닝 기술을 바탕으로 제작된 센서나 액추에이터의 정확한 성능 예측을 가능하게 해준다. 따라서 이러한 잔류응력을 측정하는 여러가지의 방법이 연구되고 발표되었다. 가장 보편적이고 쉬운 방법의 하나가 빔 구조물의 좌굴현상(buckling)을 이용하는 것으로서 인장응력의 경우에도 압축응력으로의 변환을 통해 측정이 가능하도록 한 방법이 있다[1]. 또한, 회전표시자(Rotating indicator)를 이용한 방법[2], 박막형성 전,후의 웨이퍼 곡률을 비교하는 방법, 공진주파수를 이용하는 방법[3], 문턱전압(Pull-in voltage)을 이용하는 방법[4] 등이 있다.

그러나, 좌굴(buckling)을 이용하는 방법은 항상 좌굴 상태 판별에 있어서의 모호함이 발생하고 빔 길이의 간격이나 링 반경의 간격에 의해 정밀도가 결정된다. 또한, 낮은 잔류응력으로 인해 마련된 패턴 중에서 좌굴이 일어나지 않을 경우에는 판단이 불가능하게 된다. 회전 표시자를 이용한 방법은 낮은 압축 응력하에서 표시자의 좌굴이 일어나지 않는 경우에 가능하며, 웨이퍼의 곡률을 이용하는 방법은 잔류응력이 웨이퍼의 곡률을 변화시킬 수 있을 정도로 충분히 커야 하며 풀 웨이퍼와 전용 장비를 필요로 한다. 공진주파수를 이용하는 방법과 문턱전압을 이용하는 방법은 각각 다른 테스트 구조물과 지지부를 필요로 하며 구동을 통해서만 측정이 가능하다.

본 연구에서는 가장 간단하고 제작이 쉬우며 주 구조물과 함께 동시공정이 용이하고, 형성된 구조물의 구동 없이도 측정이 가능한 반면, 그 측정치가 이산적이고 좌굴상태 판별의 모호함에 의해 정밀도가 저하되는 단점을 가지는 오일러 빔 혹은 Guckel's Ring을 사용하되, 이 방법의 단점인 좌굴상태 판별의 모호함을 없애고, 정밀도가 빔 길이의 간격이나 링 반경의 간격에 의해 좌우되지 않는, 보다 정확한 잔류응력의 판단 방법을 제시하였다. 지배방정식을 세우고 주어진 경계조건으로부터 적절

한 모델링을 행함으로써 빔의 길이 혹은 링의 반경에 따른 변위로부터 최소 오차법을 통하여 잔류응력을 판단하였다. 마이크로머시닝의 종류에 관계없이 회생층이 제거된 빔 혹은 링 패턴의 최대 처짐을 측정하고 이를 모델링 결과와 비교함으로써 보다 신뢰성을 가지는 잔류응력을 추정할 수 있다.

2. 모델 링

그림 1에 일반적인 경계조건하에서의 모델링을 나타내었다. 여기서  $\alpha$ 는 회전강성(rotational stiffness)을 나타내며 양쪽이 모두 자유롭게 회전할 수 있는 구조에서는 영이 되고, 양쪽이 모두 고정된 지지부인 경우에는 무한대가 된다.

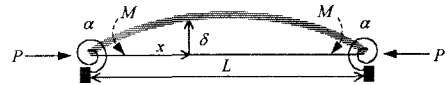


그림 1. 일반적인 경계조건하에서의 모델링

지배방정식 식(1)과 경계조건 식(2)로부터 최대 변위는 식(3)으로 주어지며 식(3)의 계수들은 식(4), (5), (6), (7)에 나타내었다.

$$-\frac{d^2}{dx^2}(EI - \frac{d^2 \delta}{dx^2}) + \frac{d}{dx}(P - \frac{d\delta}{dx}) = 0 \tag{1}$$

$$\delta = 0, \quad EI - \frac{d^2 \delta}{dx^2} = \pm \alpha \frac{d\delta}{dx}, \quad M, \quad x=0 \text{ and } x=L \tag{2}$$

$$\delta_{\max} = c_1 \sin \frac{kL}{2} + c_2 \cos \frac{kL}{2} + c_3 \frac{L}{2} + c_4 \tag{3}$$

$$c_1 = M \left[ \left( P + \frac{2\alpha}{L} \right) (1 - C) - \alpha k S \right] / \tag{4}$$

$$\left[ \frac{2\alpha^2}{L} k(1 - C) - 2P\alpha kC + \left( P^2 + \frac{2\alpha}{L} P - \alpha^2 k^2 \right) S \right]$$

$$c_2 = \frac{M + c_1 \alpha \left( \frac{L}{S} - k \right)}{P + \frac{\alpha}{L} (1 - C)} \tag{5}$$

$$c_3 = \frac{c_2 (1 - C) - c_1 S}{L} \tag{6}$$

$$c_4 = -c_2 \tag{7}$$

여기서,  $P$ 는 축방향 힘,  $L$ 은 빔의 길이,  $\delta$ 는 변위,  $E$ 는 영률,  $I$ 는 관성모멘트,  $k$ 는  $(P/EI)^{1/2}$ 를 나타낸다. 또한  $C$ 와  $S$ 는 각각  $\cos kL$ 과  $\sin kL$ 을 나타낸다. 굽힘모멘트  $M$ 은 응력구배에 기인한 것으로써 외팔보 끝단의 변위로 부터 얻어지며, 축 방향 힘  $P$ 는 응력  $\sigma$ 와 빔 단면적의 곱으로 주어진다.

식(3)에서의 응력과 변위의 관계로부터 압축응력이 결정되며, 인장응력의 경우에는 참고문헌 [1]에서의 변환효율  $g(R)$ 로부터 인장응력을 얻을 수 있다. 회전강성은 지지부의 구조에 따라 결정되는데 링 구조물의 경우에는 참고문헌 [1]에 나타나 있다. 양쪽이 모두 자유롭게 회전할 수 있는 구조에서는 식(2)에서  $\alpha$ 를 영으로 들으므로 응력과 변위의 관계식이 식(8)으로 주어지게 되며, 양쪽이 모두 고정된 지지부인 경우에는 경계조건이 식(9) 및 식(10)과 같게 되어[5], 최종적인 응력과 변위의 관계식을 식(11)으로 들 수 있다.

$$\delta_{\max} = \frac{M}{P} \left[ \sec\left(\frac{kL}{2}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

$$\delta = 0 \text{ at } x=0 \text{ and } x=L, \quad \frac{d\delta}{dx} = 0 \text{ at } x=L/2 \quad (9)$$

$$-\frac{d}{dx} \left( EI \frac{d^2 \delta}{dx^2} \right) - P \frac{d\delta}{dx} = \frac{2M}{L} = \frac{4M}{L} \text{ at } x=L/2 \quad (10)$$

$$\delta_{\max} = \frac{2M}{P} \left[ \frac{4}{kL} \tan\left(\frac{kL}{4}\right) - 1 \right] \quad (11)$$

따라서, 주어진 잔류응력과 응력구배 하에서 빔의 길이에 따른 최대 변위는 식(3), 식(8) 및 식(11)로 주어지게 되는데 실제의 측정값과 비교하여 오차가 최소가 되는 점을 택함으로써 보다 실제에 가까운 잔류응력을 추정할 수 있다.

### 3. 실험 결과

그림 2에 측정용 패턴을 나타내었으며, 그림 3에는 형성된 막의 잔류응력을 측정하기 위한 공정순서를 나타내었다.

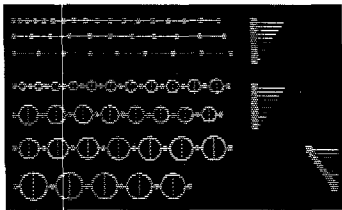


그림 2. 측정용 패턴

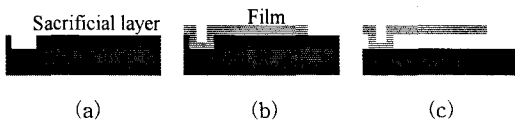


그림 3. 공정순서

(a) 희생층, 지지홀 형성 (b)막 패턴링 (c)희생층제거

잔류응력을 측정하기 위한 측정용 시편은 그림 3(a)의 상태이다. 하나의 웨이퍼 상에서 희생층 및 지지홀을 형성하고 다이싱 공정을 통해 다수개의 측정용 시편이 만

들어진다. 측정시에는 이 시편에 원하는 막을 그림 3(b)와 같이 형성, 패터닝하고 그림 3(c)와 같이 희생층을 제거한 후, 각 구조물의 길이에 따른 변위를 측정하고 전술한 모델링과 비교를 행함으로써 최소오차법에 의해 잔류응력을 추정한다.

본 연구에서는 실험을 위한 막으로 알루미늄을 사용하였으며 열 증착 및 스퍼터링 공정을 각각 행하였다. 희생층으로는 후막 PR을 사용하였으며 희생층은  $O_2$  asher를 사용하여 제거하였다.

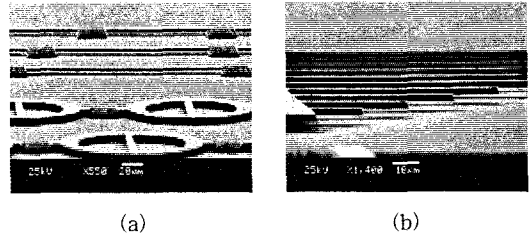


그림 4. 희생층이 제거된 패턴  
(a) 빔 및 링 구조물 (b) 외팔보

그림 4에 희생층이 제거된 패턴의 전자현미경 사진을 나타내었다. 알루미늄막의 두께는 열 증착의 경우에  $1.9 \mu m$ , 스퍼터링의 경우에  $1.7 \mu m$ 이다. 제작된 빔 구조물과 링 구조물의 폭은 각각  $7 \mu m$ ,  $17 \mu m$ 이고 빔의 길이는  $5 \mu m$  간격으로  $20 \mu m$ 부터  $190 \mu m$ 까지 이며 링의 반경은  $2.5 \mu m$  간격으로  $20 \mu m$ 부터  $95 \mu m$ 까지 이다. 외팔보의 길이는  $20 \mu m$  간격으로  $20 \mu m$ 부터  $200 \mu m$ 까지 이다.

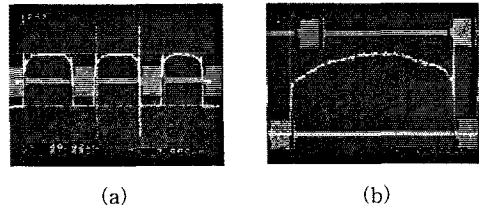


그림 5. 압축 응력시의 빔 구조물의 형상  
(a) 빔의 길이 = 55, 50, 45  $\mu m$  (b) 190  $\mu m$

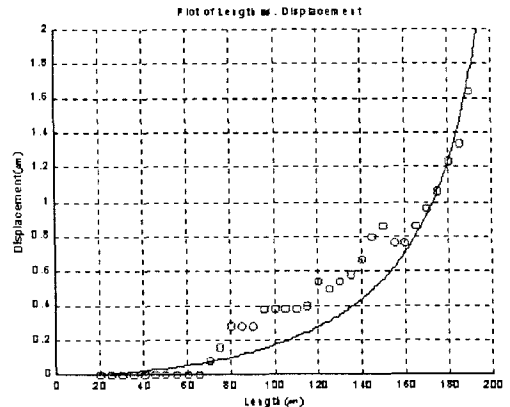


그림 6. 빔 길이에 따른 변위 : 측정값(점) 및 모델링(선)

본 논문은 과학기술부 특정연구(미래원천) 기술개발 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.



그림 7. 인장 응력시의 링 구조물의 형상  
(a) 링의 반경 =  $45\mu\text{m}$  (b)  $70\mu\text{m}$

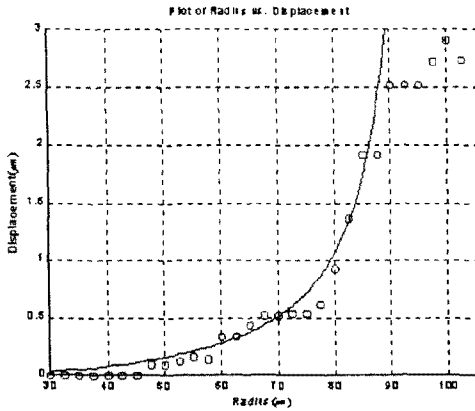


그림 8. 링 반경에 따른 변위: 측정값(점) 및 모델링(선)

그림 5와 그림 7은 압축응력과 인장응력의 경우에 있어서의 빔 및 링의 형상을 도시하였으며 각각 알루미늄 막을 열 증착 및 스퍼터링 한 경우이다. 그림 6과 그림 8은 각각의 경우에 있어서 빔의 길이 혹은 링의 반경에 따른 변위의 측정값과 모델링 결과를 나타내었다. 압축 응력의 경우에는 양쪽 고정 지지부를 가진 빔 구조물로부터 식(11)의 관계식을 이용하여 추정할 수 있으며, 인장응력의 경우에는 식(3)과 링 구조물[1]로부터의 변환 효율을 이용하여 추정할 수 있다. 구해진 응력구배와 잔류응력은 열 증착의 경우에  $-22.8\text{MPa}/\mu\text{m}$ ,  $-16.6\text{MPa}$  이었고 스퍼터링의 경우에  $-24.5\text{MPa}/\mu\text{m}$ ,  $45.2\text{MPa}$  이었다.

#### 4. 결론

형성된 빔 및 링 구조물의 최대변위로부터, 그림 6의 측정값에서는 좌굴이 일어나지 않았으며, 그림 8의 측정값에서는 좌굴의 판별이 모호해서 이 데이터만으로는 잔류응력의 결정이 불가능하였다. 그러나 본 연구에서 제시한 빔의 길이 및 링의 반경에 따른 모델링을 통하여 잔류응력의 추정이 가능하였다. 또한, 결과로부터 열 증착에 의한 알루미늄은 압축응력을 가지나 스퍼터링에 의한 알루미늄은 인장응력을 가짐을 볼 수 있는데 이는 같은 재질이라도 막의 형성환경과 조건에 따라 잔류응력이 다르게 결정됨을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서 제시한 측정용 시편을 마련하고 필요시에 주공정과 함께 이 시편에 동시에 막을 형성시킨 후, 이 시편을 측정하고 진술한 모델링과의 비교를 행함으로써 마이크로머시닝에 의해 형성된 막의 잔류응력을 보다 정확하고 손쉽게 판단 할 수 있을 것으로 기대된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1]H.Guckel, D.Burns, C.Rutigliano, E.Lovell and B.Choi, "Diagnostic microstructures for the measurement of intrinsic strain in thin films", *J. Micromech. Microeng.*, 2, 86-95, 1992
- [2]L.Elbrecht, U.Storm, R.Catanescu and J.Binder, "Comparison of stress measurement techniques in surface micromachining", *J. Micromech. Microeng.*, 7, 151-154, 1997
- [3]X.Y.Ye, Z.Y.Zhou, Y.Yang, J.H.Zhang and J.Yao "Determination of the mechanical properties of microstructures", *Solid state Sensors and Actuators (Transducers 95 Eurosensors IX)*, pp.100-103, 1995
- [4]P.M.Osterberg and S.D.Senturia, "M-TEST: A Test Chip for MEMS Material Property Measurement Using Electrostatically Actuated Test Structures", *J. MEMS*, Vol.6, No.2, 107-118, 1997
- [5]Y.H.Min, Y.K.Kim, "Modeling and measurement of electrostatic micromirror array fabricated with single layer polysilicon micromachining technology ", *SPIE*, Vol.3513, pp.59-70, 1998