

MEMS용 구조물을 위한 알루미늄 박막의 잔류응력에 대한 연구

*김윤진, 신종우, 김용권
서울대학교 전기공학부

A study for the residual strain of aluminum thin film for MEMS structures

Youn-Jin Kim, Jong-Woo Shin and Yong-Kweon Kim
School of Electrical Engineering, Seoul National University

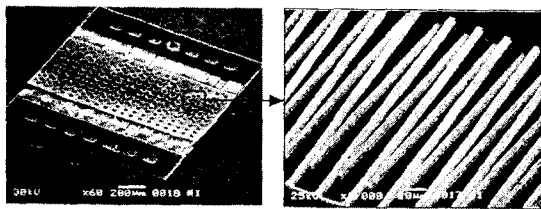
Abstract - Freestanding flexible microstructures fabricated from deposited thin films become mechanically unstable when internal stresses exceed critical values. The residual stress and stress gradient of aluminum thin film were examined to make sure of fabricating the reproduceable aluminium structure. For good shape of micro mirror array and microstructures, the experiment was done varying thickness and deposition rate. As the aluminium film thickness increased from 0.8 μ m to 1.6 μ m, the stress gradient decreased from 11.62MPa/ μ m to 2.62MPa/ μ m. The residual stress values are from 42.4MPa to 62.24MPa of tensile stresses.

1. 서 론

반도체 공정을 이용하는 MEMS공정 중 표면가공기술 (surface micromachining)에서는 원하는 물질을 증착하고 다시 이를 식각하여 구조물을 형성한다. 구조물 형성 시에 증착되는 층은 정착되면서부터 층 내부에 응력이 존재하게 되는데 이러한 내부응력은 두께에 따라 그 크기가 다르게 작용하여 기물기를 가진다. 과도한 내부응력에 의해 층 자체에 균열이나 쪼개짐이 생기고 아래층과의 접착력에 영향을 미친다. 이러한 내부응력을 잘 이해하고 조절해야 원하는 구조물을 재현성 있게 만들 수 있다.

이러한 응력이 생기는 원인으로는 크게 두 가지가 있다 [1]. 첫번째로는 증착할 때의 온도와 실제 사용온도가 다르기 때문에 생기는 열팽창계수의 차이에 의한 응력이 있다. 두번째로는 증착속도가 빠르고 표면이동속도가 느린 입자들은 에너지가 기저상태가 되기 전에 다른 입자들과 붙게 되어 이러한 에너지가 응력의 원인이 된다. 그 외의 다른 원인으로는 결함이나 불순물 등에 의한 영향이 있다.

열증착방법을 하여 알루미늄을 증착한 후 이를 패터를 형성하여 마이크로 구조물을 제작하면 내부응력에 의해 구조물에 변형이 생기기도 한다. 그림 1에서 이러한 알루미늄구조물의 변형을 볼 수 있다[2].



(a) (b)

그림 1. 잔류응력에 의해 변형이 생긴 마이크로 구조물
(a) 알루미늄층으로 만든 선형 진동 액츄에이터
(b) 진동 액츄에이터 전극의 변형

본 논문은 이러한 변형이 생기는 원인인 내부응력을 이해하고 원하는 구조를 변형 없이 얻기 위해 알루미늄 열 증착시의 증착속도와 두께에 따른 잔류응력과 응력 기울기를 조사하였다.

2. 잔류응력 및 응력기울기 측정 구조

2.1 잔류응력 측정 구조

잔류응력을 측정하기 위해 그림 2와 같은 구조를 이용하였다. 이 구조는 Guckel 등이 제안한 구조로서 bridge형 구조는 압축 응력을 측정할 수 있으며, ring형 구조는 인장 응력을 측정할 수 있다[1]. 이 구조를 이용하는 방법은 길이가 다른 여러 개의 어레이를 이용하여 변형이 일어나는 구조물의 최소 길이를 구하여 다음과 같은 방법으로 잔류응력을 구한다.

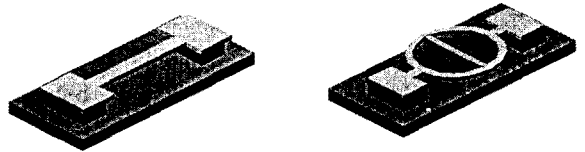


그림 2. 잔류응력 측정을 위한 구조물
(a) 압축응력을 측정할 수 있는 bridge형 구조
(b) 인장응력을 측정할 수 있는 ring형 구조

그림 2의 (a)와 같은 bridge구조는 막의 두께 h와 변형이 일어난 최소 길이 L을 알면 식 (1)에 의해서 잔류응력의 크기를 구할 수 있다[3]. 여기서 ϵ_c 는 단위면적당 받는 응력장도 여기에 물질상수 E를 곱하면 응력의 크기를 구할 수 있다. 식(1)은 물질상수와는 관계없이 기하학적인 크기에 대한 식임을 알 수 있다.

$$\epsilon_c = \frac{P}{AE} = \frac{\pi^2 h^2}{3L^2} \quad (1)$$

(P:축방향응력, A:빔의단면적, E:Young's modulus)

그림 2의 (b)와 같은 ring구조는 인장응력을 압축응력으로 변형시켜서 응력을 측정한다.

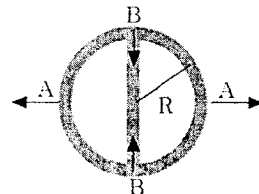


그림 3. ring형 구조물의 해석

그림 3과 같이 A위치에서 인장응력장 ϵ_o 이 존재하여 $\epsilon_o R$ 크기의 변형이 생기면, 원에 변형이 생기면서 B위치에 $\epsilon_o R g(R)$ 만큼의 변형이 생기게 된다. 여기서 $g(R)$ 은 A위치의 변형량과 B위치의 변형량의 비이다. 이 $g(R)$ 값은 다음의 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$g(R) = -\frac{2b_f f_2}{2b_f f_1 + b_f f_1^2 - b_f f_2^2} \quad (2)$$

$$f_1 = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi}\right) \cdot \frac{R}{e} - 2\frac{e}{\pi R} + \frac{1}{\pi} - \frac{\pi}{4} + \frac{\pi k_f(1+\nu)}{2}$$

$$f_2 = \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi}\right) \cdot \frac{R}{e} - 2\frac{e}{\pi R} - \frac{1}{2} + \frac{4}{\pi} - k_f(1+\nu)$$

여기서 k_f 는 form factor, e 는 이심률, R 는 내원의 반지름, R_o 는 외원의 반지름, R 은 내원과 외원 반지름의 평균이다[2].

위의 $g(R)$ 값을 그래프로 나타내면 그림 4와 같다.

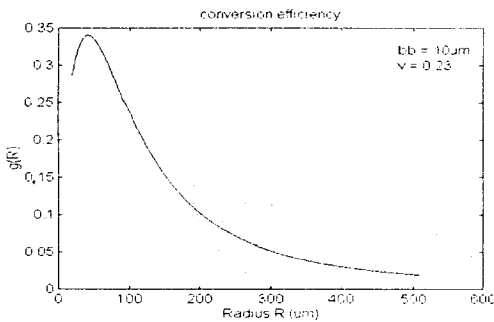


그림 4. 인장응력장에서 압축응력장으로의 변환비

그리고 이러한 변형량 비를 이용하여 두께가 h 이고 변형이 생긴 ring의 최소 반지름이 R_{cr} 일 때, 인장응력을 구하는 것은 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. 이 식에서도 역시 물질 상수와는 관계없이 기하학적인 크기만으로 인장응력장 ϵ_o 이 측정된다.

$$\epsilon_o = \frac{\epsilon_{cr}}{g(R)} = \frac{(kR)^2 (h/R_{cr})^2}{12g(R)} \quad (3)$$

2.2 응력기울기 측정구조

응력기울기는 외팔보를 제작하여 측정한다. 내부응력의 기울기에 의해 외팔보에 변형이 발생하고, 이를 이용하여 구부러진 정도를 측정하여 응력기울기를 산출할 수 있다[4].

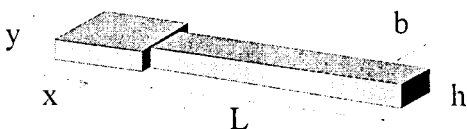


그림 5. 외팔보의 해석

그림 5와 같이 길이가 L 이고 폭이 b 높이가 h 인 외팔보의 응력기울기에 의한 변형량을 구해보면 다음과 같다. 굽힘 모멘트 M 은 식 (4)와 같이 주어지고, 여기서

$\sigma_{xx}(y)$ 가 y 축 방향으로 선형적이라고 가정하면 식 (5)와 같이 놓을 수 있다. 이를 이용하여 굽힘 모멘트 M 을 구한다. 외팔보의 변형에 대한 식으로부터 변형 길이 v 와 구부러진 빔의 곡률 반경 ρ 사이의 관계식을 정리하면 식 (6)과 같다. 곡률 반경 ρ 와 굽힘 모멘트 사이의 관계식을 정리하면 식 (7)과 같이 된다. 이 식 (6)과 식 (7)을 이용하면 보의 길이 L 과 보의 끝단에서 변형된 최대 크기 δ 사이의 관계식이 (8)와 같이 구해지며, 이를 거꾸로 이용하면 식 (9)와 같이 두께 방향의 응력기울기 값을 구할 수 있다.

$$M = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y b \sigma_{xx}(y) dy \quad (4)$$

$$\sigma_{xx}(y) = g_s y + c \quad (5)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 v}{dy^2} \Rightarrow v = \frac{1}{2\rho} y^2 \quad (6)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} = \frac{g_s b h^3 / 12}{E b h^3 / 12} = \frac{g_s}{E} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{g_s L^2}{2E} \quad (8)$$

$$g_s = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial y}\right) = \frac{2E\delta}{L^2} \quad (9)$$

식 (9)에서 볼 수 있듯이 변형량과 외팔보의 길이를 측정하면 외팔보의 응력기울기를 알 수 있다.

3. 잔류응력 및 응력 기울기 측정 구조의 제작

구조물의 제작은 그림 6과 같은 순서로 이루어진다.

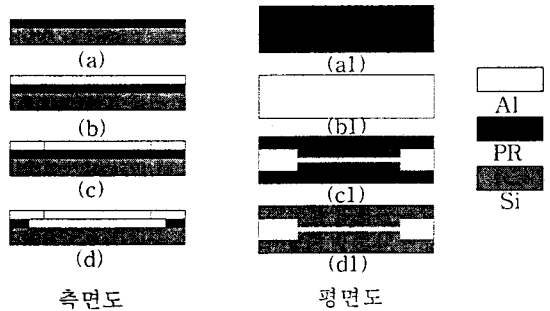
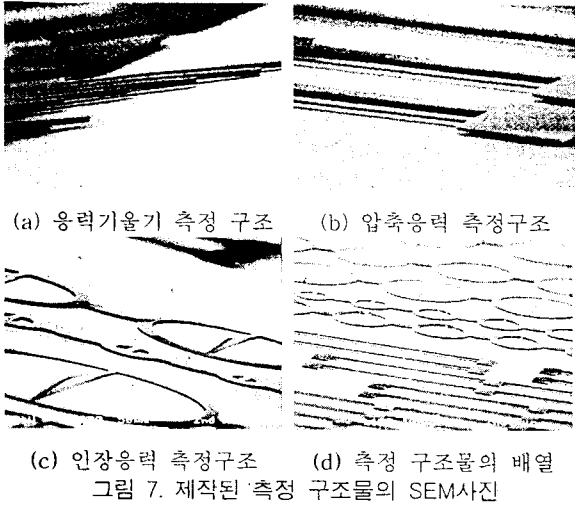


그림 6. 잔류응력 측정구조의 제작과정

그림 6의 (a, a1)과 같이 기판 위에 회생층 및 지지기둥으로 쓰일 감광제(AZ4533)를 회전도포하고 열처리를 한다. 감광제의 열처리에는 핫 플레이트에서 110℃에서 5분, 대류형오븐에서 150℃, 180℃, 200℃로 각각 30분씩 열처리하였다. 열처리 후 단단해진 감광제 위에 두께값을 0.4μm에서 2μm까지 5가지의 서로 다른 두께로 알루미늄을 열증착한 후 (b, b1), 원하는 형상으로 건식식각방법 (STS-ICP etcher)을 이용하여 형성한다 (c, c1). 회생층을 다시 건식식각방법 (RIE-80)을 이용하여 제거하면 그림 2와 같은 구조물을 얻을 수 있다(d, d1).

실제 제작된 응력 측정 구조 및 기울기 측정 구조는 그림 7과 같다.



(a) 응력기울기 측정 구조 (b) 압축응력 측정구조
(c) 인장응력 측정구조 (d) 측정 구조물의 배열
그림 7. 제작된 측정 구조물의 SEM사진

4. 실험 결과

외팔보의 변형 길이는 비접촉식 레이저 profiler로 측정하였다. 다음 표 1은 막의 두께와 빔의 길이에 따른 변형량을 나타낸다. 두께가 두꺼워 질수록 변형량이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 길이가 긴 빔의 경우 끝부분이 바닥에 닿아서 더 이상 변형이 일어나지 않은 것도 존재한다. 이러한 경우는 응력기울기의 평균값에 포함하지 않았다.

표 1. 알루미늄막의 두께에 따른 변형 길이

막두께 \ 보길이	0.8 μm	1.2 μm	1.6 μm
100 μm	3.08 μm	3.06 μm	2.14 μm
80 μm	3.08 μm	2.16 μm	1.12 μm
60 μm	3.02 μm	0.88 μm	0.66 μm
40 μm	1.36 μm	0.36 μm	0.28 μm

표 1의 변형된 길이와 두께값을 식 (9)를 이용하여 응력기울기를 계산하면 그림 8과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 막의 두께가 0.8 μm 에서 1.6 μm 로 증가함에 따라 응력기울기는 평균 11.82 MPa/ μm 에서 평균 2.62 MPa/ μm 로 줄어들었다. 변형량을 줄이기 위해서 막의 두께를 증가하는 것이 한 방법이 됨을 알 수 있다.

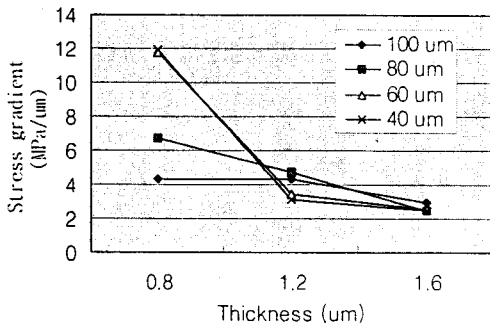


그림 8. 응력 기울기 측정값

잔류응력의 측정은 구조물의 배열중에서 변형이 일어난 가장 작은 길이 값을 이용하여, 식 (3)에 대입하여 응력장 ϵ_0 을 구한 후 Young's modulus를 곱하여 구하였다. 두께에 따른 응력의 크기 값은 0.8 μm 의 경우 42.4 MPa 이나 1.2 μm 는 61.78MPa, 1.6 μm 는 62.24MPa로 증착두께의 변화에 대해 응력의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

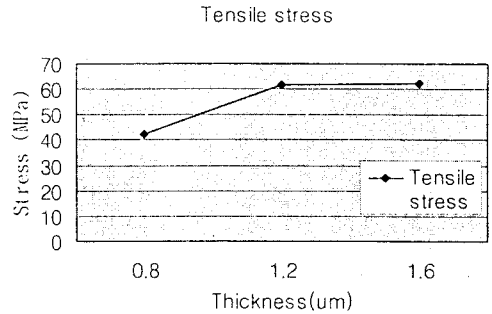


그림 9. 잔류응력의 측정값

5. 결 론

알루미늄으로 만드는 마이크로구조물의 변형을 최소화하기 위해서는 응력기울기가 작도록 두께계 막을 증착하여야 한다는 것을 알 수 있었다. 앞으로 잔류응력 및 응력기울기를 최소화하는 공정을 찾기 위하여 증착속도의 변화에 대한 영향, 증착시의 온도에 대한 영향, 공정중 RIE조건의 변화에 대한 영향 등이 조사되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 과학 기술부와 산업자원부가 주관하는 초소형 정밀기계 선도기술개발사업의 연구비 지원에 의한 것입니다.

[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] 신종우, 김용권, 신형재, "수직스프링제작을 위한 알루미늄 shadow evaporation에 대한 연구", 대한전기학회 MEMS연구회 학술발표회 논문집, 201-209, 1998
- [3] H Guckel, T Randazzo, and D.W. Burns, "A simple technique for the determination of mechanical strain in thin films with applications to polysilicon", J. Appl. Physics, 57(5), 1671-1675, 1985
- [4] W Fang and J A Wickert, "Determining mean and gradient residual stresses in thin films using micromachined cantilevers", J. Micromech. Microeng., 6, 301-309, 1996