

# 열구동형 폴리실리콘 마이크로 액츄에이터의 제작 및 특성 분석 Fabrication of thermally driven polysilicon micro actuator and its characterization

이종현, 이창승, 이재열\*, 정희환, 이용일, 유형준  
한국전자통신연구소, 반도체연구단, 기반기술연구부  
\*한국과학기술연구원, 재료공학과

Jong Hyun Lee, Chang Seung Lee, Jae Youl Lee\*, Hoi Whan Chung, Yong Il Lee, Hyung Joun Yoo  
Advanced technology dept., Semiconductor div., ETRI  
\*Material science dept., KAIST

## 개 요 (ABSTRACT)

A thermal micro actuator has been fabricated using surface micromachining techniques. It consists of doped polysilicon as a moving part and TEOS (Tetra Ethyl Ortho Silicate) as a sacrificial layer. The polysilicon was annealed for the reduction of residual stress which is the main cause to its deformation such as bending and buckling. And the newly developed HF VPE (vapor phase etching) process was also used as an effective release method for the elimination of sacrificial layer. With no liquid involved during any of the steps for releasing, unlike other reported release techniques, the HF VPE process has produced polysilicon microstructures with virtually no process-induced stiction problem.

The actuation is incurred by the thermal expansion due to current flow in active polysilicon cantilever, which motion is amplified by lever mechanism. The thickness of polysilicon is  $2\mu\text{m}$  and the length of active and passive polysilicon cantilever are  $500\mu\text{m}$  and  $260\mu\text{m}$ , respectively. The moving distance of polysilicon actuator was experimentally conformed as large as  $21\mu\text{m}$  at the input voltage level of 10V and 50Hz square wave. These micro actuator technology can be utilized for the fabrication of MEMS (microelectromechanical system) such as micro relay, which requires large displacement or contact force but relatively slow response.

### 1. 서 론

초소형 기전소자 (MEMS : microelectromechanical system)의 제작에는 반도체 공정기술을 근간으로 하는 마이크로 머시닝 (micro machining) 기술이 필수적이다<sup>(1)</sup>. 특히 마이크로 릴레이와 같이 큰 움직임이나 힘을 요구하는 반면, 상대적으로 수 kHz의 느린 반응 속도를 요구하는 소자에서는 열구동 (thermal actuation) 방법이 상대적으로 유리해진다<sup>(2)</sup>. 미소구조체의 재료로서는 안정성 및 제작의 용이성으로 인하여 폴리실리콘(polysilicon)이 많이 사용되고 있으며, 이때의 희생층(sacrificial layer)으로는 저온에서 증착된 산화막이 주로 이용되고 있다<sup>(3)</sup>. 초소형의 구조체를 제작할 때의 가장 큰 문제점으로는 희생층을 식각할 때 식각용액이 건조되면서 발생하는 표면장력으로

구조체가 기판에 고착되거나<sup>(4)</sup> 또는 희생층을 제거한 후 잔류응력으로 인한 구조물의 변형을 들 수 있다<sup>(5)</sup>.

본 연구에서는 폴리실리콘과 산화막으로 열구동형의 마이크로 액츄에이터를 제작하였다. 구조체로 사용된 폴리실리콘의 잔류응력 감소를 위하여 어닐링 공정을 도입하였으며<sup>(6)</sup>, 또한 희생층인 산화막의 제거 공정에서 발생하는 고착문제를 해결하기 위하여 새로이 개발된 HF 증기상 식각공정을 수행하였다<sup>(7)</sup>. 제작된 폴리실리콘의 저항률 및 탄성계수 등 재료의 특성은 별도로 제작된 정전구동형 구조체의 특성을 분석하여 측정된 값을 사용하였다. 또한 구형파(square wave)의 AC 전압으로 마이크로 액츄에이터를 구동시켜 이동범위 및 구동특성을 측정분석하였으며, 이를 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

## 2. 액튜에이터의 구조 및 동작원리

그림 1에 구조체의 열팽창으로 구동되는 마이크로 액튜에이터의 기본구조 및 제원을 나타내었다. 액튜에이터는 3개의 bar A, B, C로 이루어져 있으며, A, B에 연결된 지지대(anchor)를 제외한 나머지 부분은 바닥으로부터 분리되어 있다. 전류는 두개의 지지대로 이루어진 전극사이에 흐르게 되며, 이때 구조체 A, B를 구성하는 재료의 저항율(resistivity)에 의하여 구조체의 온도가 상승하게 된다. 구조체의 열은 두전극으로의 열전도(conduction), 주변공기의 대류열전달(convection) 및 복사열전달(radiation)로 방출되면서 구조체의 내부적으로 온도평형을 이루게 된다<sup>(8)</sup>. 구조체 A의 상승된 온도는 열팽창으로 일으키며, 결국 구조체 B의 bending을 유발시켜 여기에 부착된 구조체 C의 오른쪽 끝이 아래로 회전을 하게 된다.

여기서 구조체의 온도가 1000 °C 정도일 때는 대류 및 열복사에 의한 열전달량은 열전도에 비해 무시할 수 있다. 또한 열에 대한 구조체 A, B의 반응속도는 10kHz 이상이며, 구조체 C의 고유진동 주파수도 40kHz 이상이므로<sup>(9)</sup>, 구조체 A, B 내의 온도분포  $T_1$  과  $T_2$ 는 정상상태(steady state)를 의미하는 아래 (1), (2) 식으로 표현될 수 있다.

$$T_1 = -\frac{q_1}{2k}x^2 + C_1x \quad (1)$$

$$T_2 = -\frac{q_2}{2k}x^2 + C_2x + D_2 \quad (2)$$

여기서,  $q$ 는 단위체적당 발생하는 열에너지,  $k$ 는 폴리실리콘의 열전도도,  $C$ 와  $D$ 는 적분상수이며, 경계조건은 다음과 같다.

$$x = 0 \quad : T_1 = \text{상온}$$

$$x = L_1 + L_2 \quad : T_2 = \text{상온}$$

$$x = L_1 \quad : T_1 = T_2$$

$$x = L_1 \quad : A_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = A_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad (3)$$

( $A_1, A_2$ 는 구조체 A, B의 단면적임)

## 3. 제작 공정

열구동형 폴리실리콘 마이크로 액튜에이터의 제작과정은 그림 2와 같다. 먼저 Si(100) 웨이퍼를 소자사이의 절연을 위하여 산화막(0.3 $\mu$ m)과 질화막(0.2 $\mu$ m)을 입힌 다음, 희생층으로서의 TEOS(2 $\mu$ m)를 증착한다. 다음에는 구조체로 사용될 폴리실리콘을 2 $\mu$ m 증착하고 폴리실리콘의 건식식각을 위한 마스크 재료로서 TEOS(0.8 $\mu$ m)를 LPCVD로 증착한다. 이어 PR위에 액튜에이터의 형상을 만든 후 TEOS를 RIE(Reactive Ion etching)로 건식식각하고, 다시 이를 마스크로 하여 폴리실리콘을 건식식각한다. 폴리실리콘 구조체는 전기전도체로 사용되어야 하므로 POCl<sub>3</sub>로 10<sup>20</sup>/cm<sup>3</sup> 까지 doping한 후 annealing을 수행하며, 이 과정에서 폴리실리콘의 잔류응력이 최소화되는 공정 조건을 찾는다.

구조체 제작의 마지막 단계인 희생층 제거공정에서는, 식각용액의 표면장력에 의하여 구조체가 고착되는 문제를 방지하기 위하여 새로이 개발된 HF 증기상 식각(VPE: Vapor phase etching)공정을 이용하였다. 이 공정에서는 기존의 공정과는 달리 희생층의 식각액이 액체-기체의 상변화를 거치지 않고, 직접 기화하기 때문에 구조체에 표면장력이 작용하지 않는다는 장점이 있다<sup>(10,11)</sup>. 그림 3은 폴리실리콘 구조체의 아래에 있는 TEOS 희생층을 VPE를 이용하여 측면으로 식각한 모습을 보여주고 있다. 30분동안의 공정시간동안 약 5 $\mu$ m정도의 식각이 일어났으므로, 식각율은 약 10 $\mu$ m/min로서 기존의 습식식각법에 비해서도 공정속도가 뒤지지 않음을 알 수 있다.

## 4. 액튜에이터의 특성 측정

제작된 열구동형 마이크로 액튜에이터의 SEM 사진을 그림4에 보였으며, 그림 5에는 이에 대한 실험 장치의 구성도를 보였다. 액튜에이터의 input impedance는 폴리실리콘 구조체의 내부저항과 접촉

저항(contact resistance)을 구분하여 별도로 측정하였다. 구동실험은 source impedance 50Ω의 function generator에서 나오는 구형(square wave)의 AC 전압을 입력으로 하여 수행되었으며, 전압범위는 0V에서 10V까지, 주파수는 1 Hz에서 50Hz까지 변화시켰다. 대부분의 액츄에이터들이 10V의 전압에서 구조체 C의 오른쪽 끝이 아래로 21μm 까지 움직이는 것을 CCD 모니터 상으로 관찰할 수 있었으며, 15V이상에서는 폴리실리콘 구조체가 타버리는 것을 확인하였다.

그림 6에 입력전압에 따라 측정된 액츄에이터의 이동거리를 도시하였다. 여기서 이동거리는 전압의 제곱에 비례하여 커지는 것을 알 수 있으며, 이는 정해진 전기저항에서는 q값이 전압의 크기에 제곱비례하는 데서 그 이유를 찾을 수 있다. 시뮬레이션 결과와 비교할 때, 입력전압이 높아짐에 따라 측정된 이동거리가 둔화됨을 알 수 있으며, 이는 온도가 높아지면 열대류 및 열복사가 없다고 가정한 조건이 실제와 어긋나기 때문으로 판단된다. 주파수가 5Hz 이하인 경우에는 구조체 c의 진동 크기를 모니터상으로 확실하게 관찰할 수 있었으나, 주파수가 수십 Hz이상일 경우에는 고속진동으로 인하여 흐리게 보였을 뿐이다. 보다 높은 주파수의 진동을 가시화하기 위해서는 CCD의 화상을 고유주파수의 정수배로 동기시켜 모니터상에 보여주거나 또는 액츄에이터의 주위에 정전용량형 센서를 부착하여 이를 전기적으로는 측정하는 방법 등을 고려할 수 있다.

## 5. 결 론

열팽창력으로 구동되는 마이크로 액츄에이터를 표면 마이크로 머시닝(surface micromachining) 기술을 이용하여 제작하였다. 제작된 액츄에이터는  $POCl_3$ 로 도핑된 폴리실리콘 구동체와 TEOS (Tetra Ethyl Ortho Silicate)의 희생층으로 구성되어 있다. 폴리실리콘은 잔류응력의 감소를 위하여 어닐링 공정이 수행되었으며, 또한 희생층 제거공정에서의 고착문제를 해결하

기 위하여 새로이 개발된 HF 증기상 식각공정이 이용되었다. 이 공정에서는 기존의 공정과는 달리, 희생층의 식각액이 액체-기체의 상변화를 거치지 않고 직접 기화하기 때문에 미소 구조체를 제작하는 기술로서 매우 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

제작된 열구동형 마이크로 액츄에이터는 폴리실리콘 캔틸레버에 전류를 흘리고, 이로 인해 팽창되는 캔틸레버의 변위를 lever mechanism을 이용하여 변위를 확대하는 방법을 채용하였다. 특성실험에 있어서는 구형의 AC 전압 10V에 대하여 액츄에이터가 21 μm까지 이동되는 것을 측정하였으며, 이동거리는 전압에 제곱비례함을 알 수 있었다. 이와 같은 열구동형 액츄에이터 기술은 마이크로 릴레이 등과 같이 큰 움직임이나 힘을 요구하는 반면, 상대적으로 수 kHz의 느린 반응속도를 요구하는 MEMS의 구현에 활용될 수 있다.

## 참고문헌

- (1) K. E. Peterson, "Silicon as a mechanical material," *Proceeding of the IEEE*, vol.70, pp.420-457 (May 1982)
- (2) H. Matoba et al., "A Bistable snapping microactuator," *IEEE workshop on MEMS*, pp.45-50 (1994)
- (3) M. Mehregany et al., "Integrated fabrication of polysilicon mechanisms," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.ED-35, pp.719-723 (1988)
- (4) R. Legtenberg et al., "Stiction of surface micromachined structures after rinsing and drying: model and investigation of adhesion mechanisms," *Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 93)*, pp.198-201 (June 1993)
- (5) H. Guckel et al., "A simple technique for the determination of mechanical strain in thin films with applications to polysilicon," *J. Appl. Phys.* 57(5), pp.1671-1675 (March 1985)
- (6) M. A. Benitez, "Stress profile characterization and test structures analysis of single and double ion implanted LPCVD polycrystalline silicon," *Transducers 95*, pp.88-91 (1995)

- (7) J. H. Lee et al., "Fabrication of surface-micromachined polysilicon microactuators using HF vapor-phase etching process," ASME conference (1996, accepted)
- (8) J. P. Holman, Heat transfer, Tower press (1976)
- (9) L. Meirovitch, "Analytical methods in vibrations," The MacMillan company (1976)

- (10) C. H. Mastrangelo et al., "Mechanical stability and adhesion of microstructures under capillary forces - part I: Basic theory," J. MEMS, vol.2, no.1, pp.33-43 (1993)
- (11) M. Ohtsu et al., "Fabrication of packaged thin beam structures by an improved drying method," IEEE workshop on MEMS, pp.228-233 (Feb. 1996)

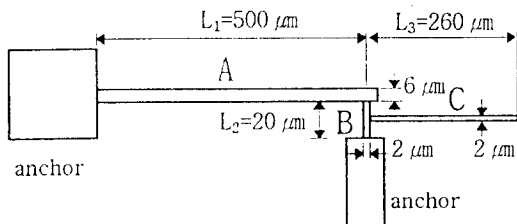


Fig.1 Structure and dimensions of thermally driven polysilicon micro actuator

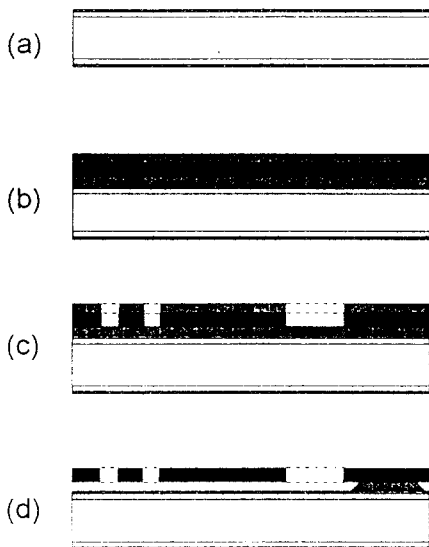


Fig.2 Fabrication sequences of a thermally driven polysilicon micro actuator  
 a) LPCVD SiO<sub>2</sub> & Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>  
 b) LPCVD TEOS/poly-Si/TEOS  
 c) RIE TEOS/poly-Si & doping/annealing  
 d) HF VPE TEOS

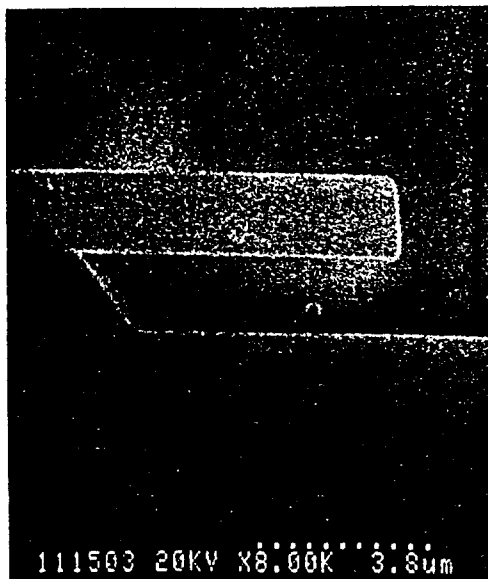


Fig.3 Cross-sectional view of the TEOS sacrificial layer etched by VPE process

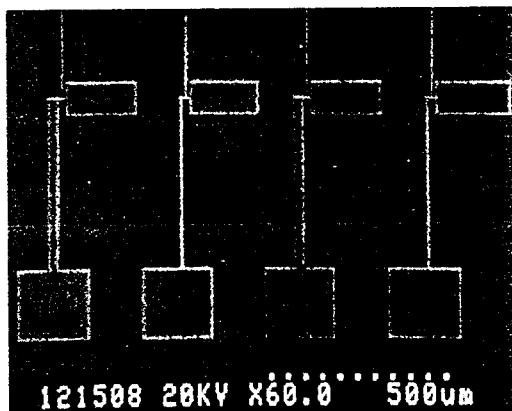


Fig.4 SEM photograph of fabricated thermally driven polysilicon micro actuator

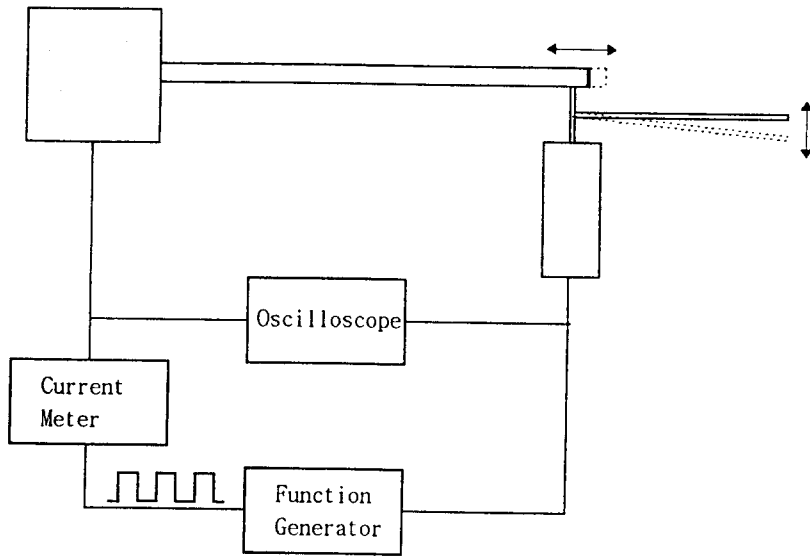


Fig.5 The schematics of experimental setup for thermally driven micro actuator

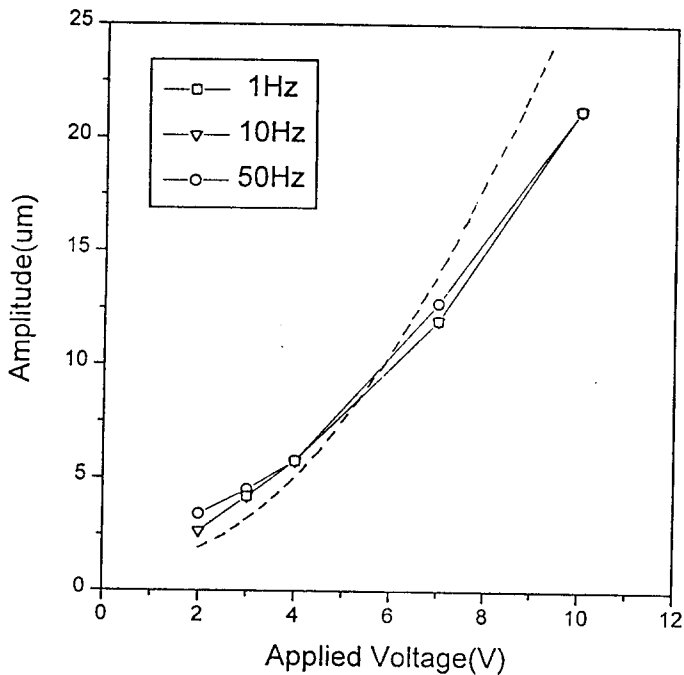


Fig.6 Experimental displacements of a thermally driven polysilicon micro actuator according to applied AC voltages (--- : simulated)