

폴리실리콘 마이크로 액츄에이터의 열구동 특성분석

이창승, 이재열*, 정희환, 이종현, 유형준
 한국전자통신연구소 반도체연구단 기반기술연구부
 *한국과학기술원 재료공학과

Characterization of thermally driven polysilicon micro actuator

Chang Seung Lee, Jae Youl Lee*, Hoi Hwan Chung, Jong Hyun Lee, Hyung Joun Yoo
 Advanced technology dept., Semiconductor div., ETRI
 *Dept. of materials science and engineering, KAIST

ABSTRACT

A thermally driven polysilicon micro actuator has been fabricated using surface micromachining techniques. It consists of P-doped polysilicon as a structural layer and TEOS (tetraethylorthosilicate) as a sacrificial layer. The polysilicon was annealed for the relaxation 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 TEOS layer. The thickness of polysilicon is 2 μ m and the lengths of active and passive polysilicon cantilevers are 500 μ m and 260 μ m, respectively. The actuation is incurred by the thermal expansion due to the current flow in the active polysilicon cantilever, which motion is amplified by lever mechanism. The moving distance of polysilicon micro actuator was experimentally conformed as large as 21 μ m at the input voltage level of 10V and 50Hz square wave. The actuating characteristics are investigated by simulating the phenomena of heat transfer and thermal expansion in the polysilicon layer. The displacement of actuator is analyzed to be proportional to the square of input voltage. 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 (micromachining) 기술이 필수적이다⁽¹⁾. 특히 마이크로 릴레이와 같이 큰 움직임이나 힘을 요구하는 반면, 상대적으로 수 kHz의 느린 반응속도를 요구하는 소자에서는 열구동 (thermal actuation) 방법이 상대적으로 유리해진다⁽²⁾. 미소구조체의 재료로서는 안정성 및 제작의 용이성으로 인하여 폴리실리콘(polysilicon)이 많이 사용되고 있다. 초소형의 구조체를 제작할 때의 가장 큰 문제점으로는 회생층을 식각할 때 식각용액이 건조되면서 발생하는 표면장력으로 구조체가 기판에 고착되거나⁽³⁾ 또는 회생층을 제거한 후 잔류응력으로 인한 구조물의 변형을 들 수 있다⁽⁴⁾.

본 연구에서는 폴리실리콘과 산화막으로 열구동형의 마이크로 액츄에이터를 제작하였다. 구조체로 사용된 폴리실리콘의 잔류응력 완화를 위하여 어닐링 공정을 도입하였으며⁽⁵⁾, 또한 회생층인 산화막의 식각공정에서 발생하는 고학문제를 해결하기 위하여 새로이 개발된 HF 증기상 식각공정을 수행하였다⁽⁶⁾. 또한 구형파(square wave)의 AC 전압으로 마이크로 액츄에이터를 구동시켜 이동범위 및 열구동 특성을 측정하였다. 시뮬레이션을 통하여 구조체의 온도 상승에 따른 열변형량과 구동 특성을 조사하였으며 이를 측정된 결과와 비교하였다.

2. 액츄에이터의 동작원리 및 해석

그림 1에 구조체의 열팽창으로 구동되는 마이크로 액츄에이터의 기본구조 및 재원을 나타내었다. 액츄에이터는 3개의 bar A, B, C로 이루어져 있으며, A, B에 연결된 지지대(anchor)를 제외한 나머지 부분은 기판으로부터 2 μ m의 간격으로 분리되어 있다. 이때 두개의 지지대로 이루어진 전극사이에 전류가 흐르게 되면 구조체의 온도가 상승하게 된다. 구조체의 열은 두전극으로의 열전도(conduction), 주변공기의 대류열전달(convection) 및 복사열전달(radiation)로 방출되면서 구조체의 내부적으로 온도평형을 이루게 된다⁽⁷⁾. 구조체 A의 상승된 온도는 열팽창을 일으키며, 결국 구조체 B의 굽곡(bending)을 유발시켜 여기에 부착된 구조체 C의 오른쪽 끝이 아래로 회전을 하게 된다.

여기서 구조체의 온도가 폴리실리콘의 용융점에 가까운 1000°C 정도에 이른다고 가정할 때 대류 및 열복사에 의한 열전달량은 각각 0.13mW, 0.48mW에 불과하므로, 열전도에 비해 무시할 수 있다. 또한 열에 대한 구조체 A, B의 반응속도는 700Hz 구조체 C의 고유진동 주파수는 40kHz 이므로⁽⁸⁾, 이 주파수이하의 구동속도에서는 구조체 A, B 내의 온도 분포 T_1 과 T_2 는 정상상태(steady state)를 의미하는 아래 (1), (2) 식으로 표현할 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_1, q_2 는 단위체적당 발생하는 열에너지, k 는 폴리실리콘의 열전도도, C 와 D 는 적분상수이다. T_1, T_2 를 대기 온도와는 차이라고 가정하면 (1), (2)식에 대한 경계조건은 다음 (3)식과 같다.

$$\begin{aligned} x=0 & : T_1=0 \\ x=L_1+L_2 & : T_2=0 \\ x=L_1 & : T_1=T_2 \\ x=L_1 & : A_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = A_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 A_1, A_2 는 구조체 A, B의 단면적이고, L_1, L_2 는 구조체의 길이이다. 구조체 C의 구동변위는 구조체 A의 열팽창 및 구조체 B의 변형을 통하여 얻어지며, 구조체 A의 열변형량은 (4)식으로 표현된다.

$$\Delta L_1 = \int_0^{L_1} \alpha T(x) dx \quad (4)$$

여기에서 α 는 폴리실리콘의 열팽창 계수이다. 구조체 B의 변형은 양단이 고정(clamped)된 beam의 변형으로 볼 수 있으며, 구조체 B와 C가 연결된 지점에서 구조체 B의

bending에 의한 각도변화 θ 를 나타내는 (5)식에 의하여, 구조체 C의 구동변위 y 는 (6)식으로 표현된다.

$$0 = \Delta L_1 \frac{K_1 K_2 (L_2/2)^2}{K_1 + K_2 - 2EI_2} \quad (5)$$

$$K_1 = \frac{Eb_1 t}{L_1} \quad K_2 = \frac{12EI_2}{L_2^3}$$

where I_1, I_2 : moment of inertia
E: Young's modulus of polysilicon

$$y = 0L_1 \quad (6)$$

3. 제작 공정

열구동형 폴리실리콘 마이크로 액츄에이터의 제작과정은 그림 2와 같다. 먼저 Si(100) 웨이퍼를 소자사이의 절연을 위하여 산화막(0.3 μ m)과 질화막(0.2 μ m)을 성장시킨 후, 희생층으로서의 TEOS(2 μ m) 산화막을 증착한다. 다음에는 구조체로 사용될 폴리실리콘을 2 μ m 증착하고 폴리실리콘의 건식 식각을 위한 마스크 재료로서 TEOS(0.8 μ m)를 LPCVD로 증착한다. 이어 감광성 재료(photo resist)위에 액츄에이터의 형상을 만든 후 TEOS를 반응성 이온 식각(RIE: reactive ion etching)으로 미세 가공하고, 다시 이를 마스크로 하여 폴리실리콘을 건식식각한다. 폴리실리콘 구조체는 전기전도체로 사용되어야 하므로 POCl₃로 10²⁰/cm³ 까지 도핑(doping)한 후 폴리실리콘의 잔류응력을 완화시키기 위한 열처리(annealing)를 수행한다.

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. 식각율은 약 10 μ m/hr로서 기존의 습식식각법에 비해서도 공정속도가 뒤지지 않음을 알 수 있다.

4. 액츄에이터의 특성 측정

제작된 열구동형 마이크로 액츄에이터의 SEM 사진을 그림 3에 보였으며, 그림 4에는 이에 대한 실험장치의 구성도를 보였다. 액츄에이터의 input impedance는 폴리실리콘 구조체의 내부저항과 접촉저항(contact resistance)을 구분하여 별도로 측정하였다. 액츄에이터의 구동 실험은 source impedance 50 Ω 의 function generator에서 나오는 구형(square wave)의 AC 전압을 입력으로 하여 수행되었으며, 전압범위는 1V에서 10V까지, 주파수는 1 Hz에서 50Hz까지 변화시켰다. 대부분의 액츄에이터들이 10V의 전압에서 구조체 C의 오픈측 끝이 아래로 21 μ m 까지 움직이는 것을 CCD 모니터 상으로 관찰할 수 있었으며, 15V이상에서는 폴리실리콘 구조체가 타버리는 것을 확인하였다.

그림 5에는 입력전압과 교류 주파수에 따라 측정된 액츄에이터의 이동거리와 (6)식에 따른 시뮬레이션 예측치(---)를 도시하였다. 여기서 이동거리는 전압의 제곱에 비례하여 커진다는 것을 알 수 있으며, 이는 일정한 전기저항에서는 q_1, q_2 의 값이 전압의 크기에 제곱비례하는 데서 그 이유를 찾을 수 있다. 또한 입력전압이 높아짐에 따라 측정된 이동거리가 시뮬레이션 예측치에 비하여 둔화됨을 알 수 있으며, 이는 온도가 높아지면서 열대류 및 열복사가 없다고 가정된 조건이 실제와 어긋나기 때문으로 판단된다. 일정한 입력 전압하에서 액츄에이터의 이동거리에 대한 주파수의 영향은 거의 없는 것으로 관찰되었다. 수십 Hz 이상의 높은 주파수의 진동을 가시화하기 위해서는 CCD의 화상을 교류주파수의 정수배로 동기시켜 모니터상에 보여주기나 또는 액츄에이터의 주위에 정전용량형 센서를 부착하여 이를 전기적으

로 측정하는 방법 등을 고려할 수 있다.

5. 결론

열팽창력으로 구동되는 마이크로 액츄에이터를 표현 마이크로 머시닝(surface micromachining) 기술을 이용하여 제작하였다. 제작된 액츄에이터는 POCl₃로 도핑된 폴리실리콘 구동체와 TEOS(tetraethylorthosilicate)의 희생층으로 구성되어 있다. 폴리실리콘은 잔류응력의 감소를 위하여 어닐링 공정이 수행되었으며, 또한 희생층 제거공정에서의 고착문제를 해결하기 위하여 새로이 개발된 HF 증기상 식각공정이 이용되었다. 이 공정에서는 기존의 공정과는 달리, 희생층의 식각에 이체-기체의 상변화를 거치지 않고 직접 기화하기 때문에 미소 구조체를 제작하는 기술로서 매우 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

제작된 열구동형 마이크로 액츄에이터는 폴리실리콘 캔티레버에 전류를 흘리고, 이로 인해 팽창되는 캔티레버의 변위를 lever mechanism을 이용하여 변위를 확대하는 방법을 채용하였다. 특성실험에 있어서는 구형의 AC 전압 10V에 대하여 액츄에이터가 21 μ m까지 이동되는 것을 측정하였다. 시뮬레이션을 통하여 구조체의 열변형량과 구동특성을 조사하였으며, 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.420-437 (May 1982)
- (2) H. Matoba et al., "A Bistable snapping microactuator," IEEE workshop on MEMS, pp.45-50 (1994)
- (3) 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)
- (4) 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)
- (5) 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)
- (6) J. H. Lee et al., "Fabrication of surface-micromachined polysilicon microactuators using HF vapor-phase etching process," ASME conference (1996, accepted)
- (7) J. P. Holman, Heat transfer, Tower press (1976)
- (8) L. Meirovitch, "Analytical methods in vibrations," The MacMillan company (1976)

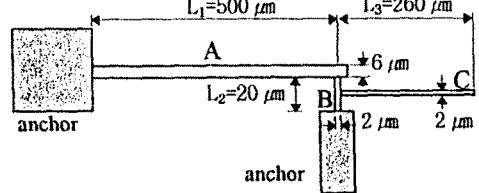


Fig.1 Structure and dimensions of thermally driven polysilicon micro actuator

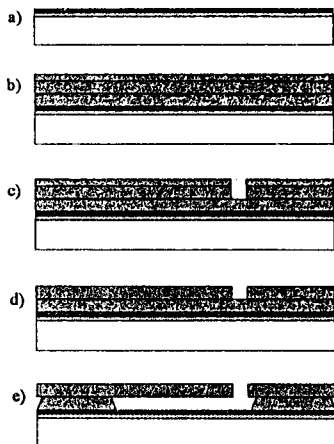


Fig.2 Fabrication sequences of a polysilicon micro actuator

- a) SiO_2 & LPCVD Si_3N_4
- b) LPCVD TEOS/poly-Si/TEOS
- c) RIE TEOS/poly-Si
- d) POCl_3 doping & annealing
- e) HF VPE TEOS



Fig.3 SEM photograph of the fabricated polysilicon micro actuator

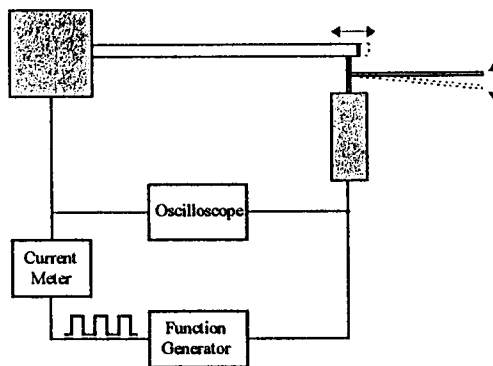


Fig.4 The schematics of experimental setup for the thermally driven micro actuator

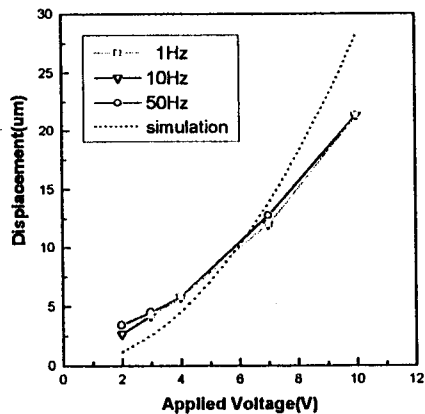


Fig.5 Experimental and simulated displacements of a thermally driven polysilicon micro actuator according to applied AC voltages