

열구동형 폴리실리콘 마이크로 액츄에이터의 제작 및 특성분석

이 종 현*, 이 창 승*, 장 원 익*, 유 형 준*

Fabrication of Thermally-Driven Polysilicon Microactuator and Its Characterization

Jong Hyun Lee*, Chang Seung Lee*, Won Ick Jang*, Hyung Joun Yoo*

ABSTRACT

A thermally-driven polysilicon microactuator has been fabricated using surface micromachining techniques. It consists of P-doped polysilicon as a structural layer and TEOS (tetraethylorthosilicate) oxide 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 newly developed HF GPE (gas-phase etching) process was also employed to eliminate the troublesome stiction problem using anhydrous HF gas and CH₃OH vapor, and successfully fabricated the microactuators.

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 microactuator was experimentally conformed as large as 21 μ m at the input voltage level of 10V and 50Hz square wave. The actuating characteristics are also compared with the simulated results considering heat transfer and thermal expansion in the polysilicon layer. This microactuator technology can be utilized for the fabrication of MEMS (microelectromechanical system) such as microrelay, which requires large displacement or contact force but relatively slow response.

Key words : surface micromachining (표면 미세가공), thermally-driven (열구동형), microactuator (미소 구동 소자), polysilicon (다결정 규소), HF gas-phase etch (불산 기상식각)

1. 서 론

초소형 기전소자 (MEMS : microelectromechanical

system)의 제작에는 반도체 공정기술을 근간으로 하는 표면 마이크로 머시닝 (surface micromachining) 기술이 많이 이용되고 있다⁽¹⁾. 특히 마이크로 릴레이와 같이

큰 움직임이나 힘을 요구하는 반면, 상대적으로 수 kHz의 느린 반응속도를 요구하는 소자에서는 열구동 (thermal actuation) 방법이 상대적으로 유리해진다⁽²⁾. 이와 같은 미소구조체의 전도성 (conductive) 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 모세관력 (capillary force)으로 구조체가 기판에 고착되거나⁽³⁾ 또는 회생층을 제거한 후 잔류응력으로 인한 구조물의 변형을 들 수 있다⁽⁴⁾.

본 연구에서는 폴리실리콘과 산화막으로 구성된 열구동형의 마이크로 액츄에이터를 제작하였다. 구조체로 사용된 폴리실리콘의 잔류응력 완화를 위하여 어닐링 공정을 수행하였으며⁽⁵⁾. 또한 회생층인 산화막의 식각공정에서 발생하는 고착문제를 해결하기 위하여 새로이 개발된 HF 기상식각 (gas-phase etch) 공정을 사용하였다⁽⁶⁾. 제안된 방법은 매우 간단하면서도 모세관력이 거의 없으며, 또한 기존의 웨이퍼 세정공정 (cleaning process)을 응용한 것이기 때문에 집적회로 (integrated circuit) 제작공정과 호환성이 있다는 장점을 가지고 있다^(7,8).

제작된 마이크로 액츄에이터에 대해서는 구형파 (square wave)의 AC 전압으로 구동시켜 이동범위 및 열구동 특성을 측정하였다. 또한 구조체의 온도분포에 대한 시뮬레이션을 통하여 구조체의 온도 상승에 따른 열변형량과 구동특성을 예측하였으며 이를 측정된 결과와 비교분석하였다.

2. 액츄에이터의 동작원리 및 해석

2.1 액츄에이터의 동작원리

본 논문의 마이크로 액츄에이터는 열팽창으로 구동되며, 그 기본 구조 및 제원을 그림 1의 (a), (b)에 나타내었다. 액츄에이터는 3개의 빔 (beam) 구조인 A, B, C로 이루어져 있으며, A, B에 연결된 지지대(anchor)를 제외한 나머지 부분은 실리콘 웨이퍼 (silicon wafer)로부터 2 μ m의 간격을 가지고 위쪽으로 분리되어 있다. 여기서 두개의 지지대로 이루어진 전극사이에 전류가 흐르게 되면, 단면적이 작아 내부저항이 큰 A, B에 주로 열이 발생하여 구조체의 온도가 상승한다. 구조체의 열은 전극으로 사용되는 두 지지대로의 열전도(conduction), 주변 공기의 대한 대류 열전달(convection) 및 복사 열전달(radiation)로 방출되면서 구조체의 내부적으로 온도평

형을 이루게 된다⁽⁹⁾. 구조체 A의 상승된 온도는 열팽창을 일으켜, 그림 2와 같이 상대적으로 작은 폭을 가진 구조체 B의 위쪽 끝부분이 오른쪽으로 평행이동하는 굴곡(bending)을 유발시키며, 따라서 여기에 부착된 구조체 C의 오른쪽 끝이 아래로 회전을 한다.

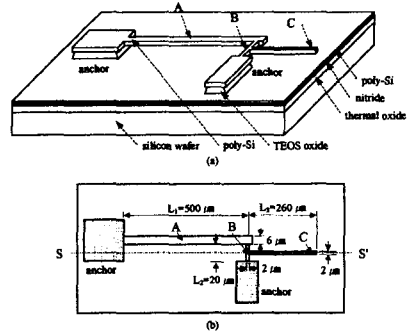


Fig. 1 Structure (a) and dimensions (b) of the thermally-driven polysilicon microactuator

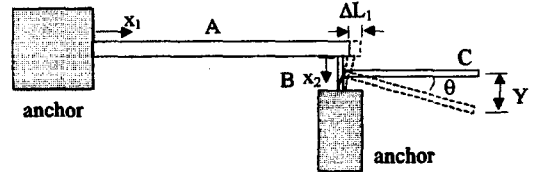


Fig. 2 Lever mechanisms of the thermally-driven polysilicon microactuator

다음은 마이크로 액츄에이터의 열구동에 대한 이론적인 계산에 있어서 여러가지 가정의 타당성을 검토해 본다. 먼저, 구조체의 최고온도가 폴리실리콘의 용융점에 가까운 1000 $^{\circ}$ C정도에 이른다고 가정할 때, Fig. 2의 (b)에 주어진 액츄에이터 제원에 대한 대류 및 열복사는 각각 0.13mW, 0.48mW의 작은 값으로 예측되므로, 지지대로의 열전도 예측값인 23mW에 비해 무시할 수 있다. 응답속도를 검토해 보면, 열전도에 대한 구조체 A, B의 반응속도는 700Hz 이상, 구조체 C의 고유진동 주파수는 40kHz 이상으로 각각 예측되고 있으므로⁽¹⁰⁾, 이 주파수보다 충분히 작은 구동속도에서는 구조체 A, B 내의 온도분포를 정상상태 (steady state)로 가정하여 계산할 수 있다.

2.2 열구동 simulation

2.1에서 논의한 바와 같이, 내부에 열원 (heat

source)을 가진 구조체 A, B 내의 열전도 방정식은 식 (1)과 같으므로, 구조체 A, B의 온도분포 T_1 과 T_2 는 각각 식 (2), (3)으로 표현할 수 있다⁹⁾.

$$\text{구조체 A, B : } A, B: \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -\frac{q}{k} \quad (1)$$

$$\text{구조체 A : } A: T_1 = -\frac{q_1}{2k} x_1^2 + c_1 x_1 + d_1 \quad (2)$$

$$\text{구조체 B : } B: T_2 = -\frac{q_2}{2k} x_2^2 + c_2 x_2 + d_2 \quad (3)$$

여기서, 지지대의 온도는 대기온도인 T_0 와 같다고 가정 하였으며, q_p, q_2 는 단위체적당 발생하는 열에너지, k 는 폴리실리콘의 열전도도, c_p, d_p, c_2, d_2 는 적분상수이다. 식 (2), (3)에 대한 경계조건은 다음의 식 (4)과 같으며, 여기서 S_1, S_2 는 구조체 A, B의 단면적이고, L_p, L_2 는 구조체의 길이이다.

$$\begin{aligned} x_1 = 0 & : T_1 = T_0 \\ x_2 = L_2 & : T_2 = T_0 \\ x_1 = L_1 & : T_1 = T_2 \\ S_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} & = S_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \end{aligned} \quad (4)$$

구조체 C의 구동변위는 구조체 A의 열팽창에 따른 구조체 B의 변형을 통하여 얻어지며, α 를 폴리실리콘의 열팽창계수라고 할 때, 구조체 A의 열변형량은 식 (5)로 표현된다.

$$\Delta L_1 = \int_0^{L_1} \alpha T(x) dx \quad (5)$$

여기에서, 구조체 B는 그림2와 같이 위쪽 끝이 오른쪽으로 평행이동하는 변형을 가장하였으므로, 구조체 B와 C가 연결된 지점에서 구조체 B의 bending에 의한 각도변화 θ 와 구조체 C의 오른쪽 끝에 대한 구동변위 Y 는 각각 식 (6)와 (7)으로 표현된다.

$$\theta = \Delta L_1 \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \frac{(L_2/2)^2}{2EI_2} \quad (6)$$

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

I_1, I_2 : 구조체 A, B의 관성모멘트 (moment of inertia)

E : 폴리실리콘의 탄성률

b_1 : 구조체 A의 폭

t : 구조체 A, B의 두께

$$Y = \theta L_3 \quad (7)$$

3. 제작 공정

3.1 공정 개요

열구동형 폴리실리콘 마이크로 액츄에이터의 제작과정은 그림 3과 같다. 먼저 (100) 실리콘 웨이퍼위에 소자 사이의 절연을 위하여 산화막 (0.3 μ m)과 질화막 (0.2 μ m)을 성장시킨 후, 폴리실리콘 (0.1 μ m)위에 희생층으로서 TEOS (tetraethylorthosilicate) 산화막 (2 μ m)을 LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition)로 증착한다. 이어 구조체로 사용될 폴리실리콘 (2 μ m)을 희생층 산화막 위에 증착하고 폴리실리콘의 건식식각을 위한 마스크 (mask) 재료로서 TEOS 산화막 (0.8 μ m)을 증착한다. 감광성 재료 (photo resist)위에 만들어진 액츄에이터의 형상은 반응성 이온식각 (RIE : reactive ion etching)을 이용하여 TEOS 산화막 위에 옮겨지며¹⁰⁾, 다시 이를 마스크로 하여 폴리실리콘을 식각한다. 폴리실리콘 구조체는 전기전도체로 사용되어야 하므로 $POCl_3$ 로 $10^{20}/cm^3$ 까지 도핑 (doping)한 후 열처리 (annealing)를 수행한다.

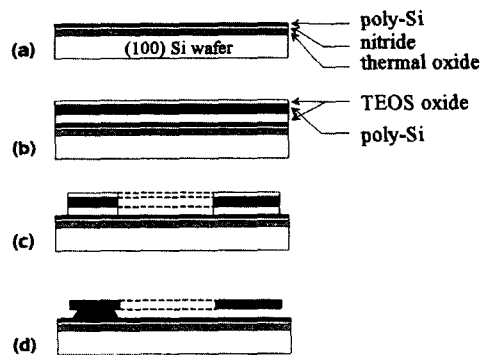


Fig. 3 Fabrication sequence for thermally-driven microactuators. (The schematics are shown across the cross-section line S-S' in Fig. 1(b)) (a) thermal oxide, nitride & poly-Si (b) LPCVD TEOS oxide / poly-Si / TEOS oxide, (c) RIE TEOS / poly-Si / TEOS oxide & doping /annealing, (d) HF GPE TEOS oxide

불순물로서 주입된 인 (phosphorus)의 활성화 (activation) 공정이 필요하며, 이 때 구조체 내부응력이 최소화되는 어닐링 (annealing) 조건으로 공정을 수행한다.

마지막으로 다음 절에서 기술될 HF 기상식각법을 이용하여 회생층인 TEOS 산화막을 제거함으로써 열구동형의 폴리실리콘 액튜에이터의 제작을 완성한다. 여기서 미소구조체의 고착을 방지하기 위한 기존의 방법과는 달리 마스크 공정을 별도로 추가하지 않는다는 장점을 확인할 수 있다.

3.2 HF 기상식각 공정

폴리실리콘의 표면 미세가공에서 사용되는 회생층 산화막의 제거방법으로는 HF에 의한 습식 식각 (wet etch) 방법이 많이 쓰여져 왔다⁽¹²⁾. 그러나 이 방법은 세정액을 제거할 때, 액상-기상의 변화과정에서 발생하는 모세관력 때문에 미소구조체가 기판에 고착된다는 심각한 문제를 가지고 있다. 이와 같은 고착문제를 해결하는 방법으로 모세관력을 최소화하는 건식 식각 (dry etch) 방법들이 연구되고 있다. 그러나 감광막을 마지막의 회생층 (sacrificial layer)으로 사용하는 건식 식각 방법에서는 추가적인 공정과 플라즈마에 의한 표면 변화가 문제가 되고 있다⁽¹³⁾. 초임계 (super-critical) 방법이나 승화 (sublimation)에 의한 회생층 제거 공정은 고착 문제가 해결되는 좋은 결과를 보여 주고 있으나, 회생층을 제거한 후 기화하기 쉬운 용액으로 치환하고 이를 증발 시키는 추가적인 공정 및 장비가 요구되고 있다^(14, 15).

본 연구에서는, 위와 같은 문제점이 개선하기 위하여 기상 (gas-phase)의 불산 (HF : Hydrogen Fluoride)을 이용한 새로운 회생층 제거 공정을 개발하였다. 이와 같은 HF 에 의한 식각공정의 장점을 최대한으로 이용하기 위해서는, 식각액으로서 무수 불산 (anhydrous HF)을 사용하고, 반응촉매로서는, 그림 4에서 보인 바와 같이, 기존의 물보다 증기압이 높은 메탄올 (methanol)을 사용하는 것이 훨씬 바람직하다⁽⁶⁾. 메탄올은 HF 용액의 응축 (condensation)을 억제함으로써 식각공정이 기상 (gas-phase)으로 이루어질 수 있기 때문에 회생층을 제거할 때 발생하는 구조체의 고착 (stiction) 문제를 효과적으로 해결할 수 있다.

이와 같은 HF GPE방법은 기존의 반도체 세정공정으로서 유사한 연구가 있었으나⁽⁷⁾, MEMS 구조체의 제작에서 요구되는 회생층의 제거에 HF 기상식각을 사용한 예는 매우 드물며 또한 회생층으로서 열산화막을 사용

하는 경우는 거의 없기 때문에 재료 및 식각 특성면에서 큰 차이가 있다. 이방법의 다른 특성을 살펴 보면 회생층 제거에 추가적인 공정이 필요하지 않으며 또한 기존의 집적회로 제작기술과 호환성이 있기 때문에 회생층 산화막 제거의 양산기술로서 매우 유리하다는 것을 알 수 있다. 다만, 용액의 응축을 억제하기 위하여 공정온도를 지나치게 올릴 경우 식각속도가 떨어지기 때문에 적절한 공정온도를 선택하는 것이 좋다.

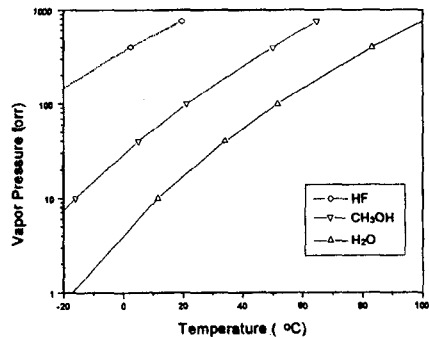
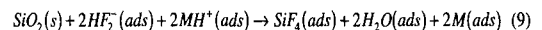
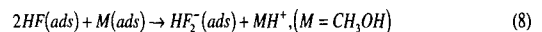


Fig. 4 Vapor pressure of HF, methanol, and water versus temperature.

HF에 의한 산화막 식각과정을 화학반응식으로 살펴 보면, 먼저 산화막 기판에 흡착된 불산은 메탄올을 촉매로 하여, 식(8)과 같이 HF₂-(ads)로 이온화된다. TEOS 산화막에 흡착된 HF₂-는, 식(9)에 보인 바와 같이, 산화막과 반응하여 중요한 식각반응 인자인 SiF₄(ads)를 생성시킨다. SiF₄(ads)는 물이나 메탄올처럼 기화된 후 진공배기계로 배출되며, 이 과정은 산화막의 식각이 완료될 때까지 계속된다.



식(8)에서의 산화막 식각율은 흡착된 HF와 CH₃OH의 분압에 주로 좌우되며, 이 분압은 두 물질의 사이의 이온화반응을 지배하게 된다. HF 기상식각공정에서 사용된 무수 HF와 CH₃OH는 모두 99.9%의 순도를 가지고 있으며, HF와 CH₃OH의 분압은 각각 15 torr와 4.5 torr이다. 그림 4에서 HF와 CH₃OH의 증기압이 25°C에서 각각 916.5 torr, 121.5 torr임을 감안할 때, 이 공정조건에서는 기상식각이 가능하고 또한 높은 식각율이 유지될 것으로 생각된다.

본 연구에서 사용된 HF 기상 식각장비의 개념도를 그림 5에 보였다. 식각 챔버 (etch chamber)는 불산에 의한 부식을 방지하기 위하여 테프론 (teflon)으로 입혀진 알루미늄으로 만들어져 있으며, 무수 불산과 메탄올은 웨이퍼 위에서의 균일도를 향상시키기 위하여 shower head를 통하여 주입된다. HF 유량은 MFC (mass flow controller)로 제어되며, N₂ carrier gas와 함께 주입된 CH₃OH의 유량은 4극 질량분석기 (quadruple mass spectrometer)로 측정된다. 진공 펌프는 식각 챔버와 질량분석기에 연결되어 있으며, 공정압력은 throttle valve로 제어된다.

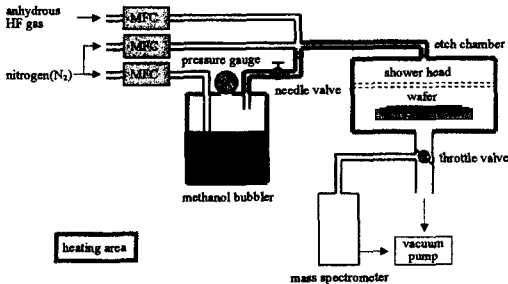


Fig. 5 A photograph of the oxide GPE (gas-phase etch) system using anhydrous HF gas and CH₃OH vapor

4. 액츄에이터의 특성측정

제작된 열구동형 마이크로 액츄에이터에 대한 SEM 사진을 그림 6에 보였으며, 그림 7에는 이에 대한 실험장치의 구성도를 보였다. 액츄에이터의 입력 저항 (input impedance)은 폴리실리콘 구조체의 내부저항과 접촉저항 (contact resistance)을 구분하여 측정하였다. 액츄에이터의 구동 실험은 전원 저항 (source impedance) 50Ω의 function generator에서 나오는 구형 (square wave)의 AC 전압을 입력으로 하여 수행되었으며, 전압 범위는 1V에서 10V까지, 주파수는 1 Hz에서 50Hz까지 변화시켰다. 그림 8은 입력 전압이 ON과 OFF인 경우에 리버 기구가 있는 부분을 현미경에 연결된 CCD camera로 촬영한 것으로, 액츄에이터의 구동이 주로 구조체 B의 변형에 의한 것임을 알 수 있다. 변형의 범위는 알고 있는 미소 구조체의 크기를 기준으로 하여 CCD 모니터 상으로 측정하였으며, 대부분의 액츄에이터들이 10V의 전압에서 구조체 C의 오른쪽 끝이 아래 방향으로 21μm 까지

움직이는 것을 확인하였다. 15V이상에서는 지나친 전류 흐름으로 인하여 폴리실리콘 구조체가 타버리는 것을 볼 수 있었다.

그림 9에는 입력전압과 교류 주파수에 따라 측정된 액츄에이터의 이동거리와 식 (7)에 따른 시뮬레이션 예측치(—)를 도시하였다. 여기서 이동거리는 전압의 제곱에 비례하여 커진다는 것을 알 수 있으며, 이는 일정한 전기저항에서는 q1, q2의 값이 전압의 크기에 제곱비례하는 데서 그 이유를 찾을 수 있다. 그러나 실제의 실험에서

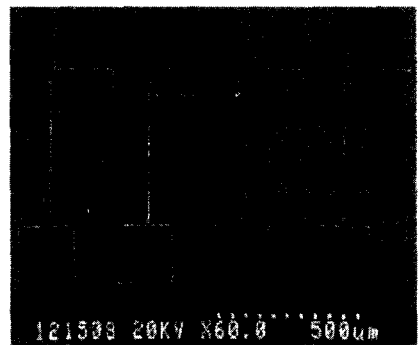


Fig. 6 SEM photograph of the fabricated polysilicon microactuator

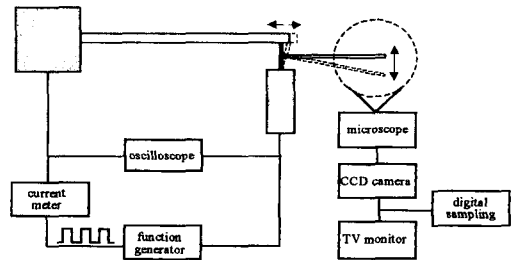


Fig. 7 The schematic of the experimental setup for the thermally-driven microactuator

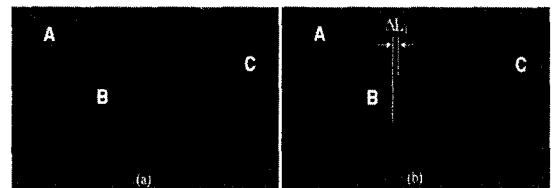


Fig. 8 The video images of lever mechanism for (a) OFF and (b) ON state of the thermally-driven microactuator

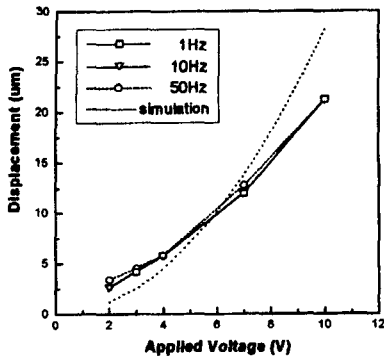


Fig. 9 Experimental and simulated displacements of the thermally-driven polysilicon microactuator according to applied AC voltages

는 입력전압이 8V 이상으로 높아지면서 측정된 이동거리가 시뮬레이션 예측치에 비하여 작아졌으며, 전체적으로 입력전압의 1.5승에 비례하는 것을 알 수 있다. 이것은 온도가 높아지면서 열대류 및 열복사의 양이 실제적으로는 커지지만, 본 연구의 계산에서는 이를 무시한 것과 레버기구의 평행이동을 가정한 것에서 유발된 오차라고 생각된다.

일정한 입력 전압하에서 액츄에이터의 이동거리에 대한 주파수의 영향은 거의 없는 것으로 관찰되었으며, 이는 2.1에서 검토한 바와 같이 실험된 구동주파수가 열전달이나 공진주파수보다 충분히 낮기 때문이다. 수십 Hz 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 기술을 이용하여 제작하였다. 제작된 액츄에이터는 POCl_3 로 도핑된 폴리실리콘 구동체와 TEOS 산화막의 희생층으로 구성되어 있다. 폴리실리콘은 잔류 응력의 감소를 위하여 어닐링 공정이 수행되었으며, 또한 희생층 제거공정에서의 고착문제를 해결하기 위하여 새로이 개발된 HF 기상 식각공정이 이용되었다. HF에 의한 희생층 식각공정에서는 무수 불산과 함께, 식각반응의 촉매로서 기존의 물대신 메탄올을 사용하였다. 이 방법은

HF 용액의 응축을 억제함으로써 식각공정이 기상 (gas-phase) 으로 이루어지기 때문에 희생층 산화막 제거의 양산기술로서 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.

제작된 열구동형의 마이크로 액츄에이터는, 전류를 흘러 열을 발생시키고 이로 인해 팽창되는 캔틸레버의 변위를 레버 기구 (lever mechanism)를 이용하여 확대하는 방법을 채용하였다. 특성실험에 있어서는 구형의 AC 전압 10V, 50Hz에 대하여 액츄에이터가 21µm까지 이동되는 것을 측정하였으며, 이동거리는 이론적 예측과는 달리 전압의 1.5승에 비례함을 알 수 있었다. 또한 시뮬레이션을 통하여 구조체의 열변형량과 구동특성을 비교분석하였으며, 8V 이하에서는 실험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 이와 같은 열구동형 액츄에이터 기술은 마이크로 릴레이 등과 같이 큰 움직임이나 힘을 요구하는 반면, 상대적으로 수 kHz 이하의 느린 반응속도를 요구하는 MEMS의 구동기구에 활용될 수 있다.

감사의 글

실험에 있어서 도움을 주신 정희환 박사님과 이재열씨께 감사를 드리며, 본 연구는 정보통신부의 연구비 지원을 받아 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. K. E. Peterson, "Silicon as a mechanical material," Proceeding of the IEEE, Vol. 70, pp. 420-457, 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," Transducers 93, pp. 198-201, 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. 575, pp. 1671-1675, 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., "Gas-phase etching of sacrificial oxides using anhydrous HF and CH₃OH," *IEEE workshop on MEMS*, pp. 448-453, 1977.
 7. J. Ruzyllo et al., "Etching of thermal oxides in low pressure anhydrous HF/CH₃OH gas mixture at elevated temperature," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 140, no. 4, pp. L64-66, 1993.
 8. W. Kern, *Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology*, Noyes Publications, chapter 7, 1993.
 9. J. P. Holman, *Heat transfer*, Tower press, chapter 2, 1976.
 10. L. Meirovitch, *Analytical methods in vibrations*, The MacMillan company, chapter 5, 1976.
 11. H.-H. Park et al., "A Study on Modified Silicon Surface after CHF₃/C₂F₆ Reactive Ion Etching," *ETRI Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 45-57, 1994.
 12. J. Liu et al., "In situ Monitoring and Universal Modeling of Sacrificial PSG Etching Using Hydrofluoric Acid," *IEEE workshop on MEMS*, pp. 71-76, 1993.
 13. D. Kobayashi et al., "Photoresist-Assisted Release of Movable Microstructures," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 32, No. 11A, pp. L1642-L1644, 1993.
 14. G. Lin et al., "Design, Fabrication, and Testing of a C-Shape Actuator," *Transducers 95*, Stockholm, Sweden, Vol. 2, pp. 416-419, 1995.
 15. H. Guckel et al., "Fabrication of Micromechanical Devices from Polysilicon Films with Smooth Surfaces", *Sensors and Actuators*, Vol. 20, Nos. 1&2, pp. 117-122, 1989.