

알루미늄 핀-조인트를 사용한 마이크로 미러의 제작과 측정

論 文

49C - 8 - 9

Fabrication and Experiment of Micromirror with Aluminum Pin-joint

池 昌 炫* · 金 容 權**
(Chang-Hyeon Ji · Yong-Kweon Kim)

Abstract - This paper describes the design, fabrication and experiments of surface-micromachined aluminum micromirror array with hidden pin-joints. Instead of the conventional elastic spring components as connection between mirror plate and supporting structure, we used pin-joint composed of pin and staples to support the mirror plate. The placement of pin-joint under the mirror plate makes large active surface area possible. These flexureless micromirrors are driven by electrostatic force. As the mirror plate has discrete deflection angles, the device can be applied to adaptive optics and digitally-operating optical applications. Four-level metal structural layers and semi-cured photoresist sacrificial layers were used in the fabrication process and sacrificial layers were removed by oxygen plasma ashing. Static characteristics of fabricated samples were measured and compared with modeling results.

Key Words : Surface-micromachining, Micromirror, Pin-joint, MOEMS

1. 서 론

미세가공(micromachining) 기술의 진보와 더불어 MEMS (micro-electro-mechanical systems)의 광학 응용은 더욱 더 그 영역을 넓혀가고 있다. 마이크로 미러는 MOEMS (micro-opto-electromechanical systems) 중 가장 널리 알려진 것들 중 하나로 다양한 광학 시스템과의 접목이 시도되고 있다.

마이크로 미러 디바이스에 관한 관심이 증가됨에 따라 다양한 구조와 제작 공정이 시도되고 있는데, 현재까지 제작된 마이크로 미러들은 수직 스프링[1], 토션 힌지(torsion hinge)[2,3], 캔틸레버(cantilever)[4,5] 등의 스프링 구조물을 사용하였으며 이들이 전체 시스템의 성능과 특성을 결정짓는다. 미러 어레이의 응용에 있어서 전체 반사면의 면적에 대한 유효 반사면의 비(fill-factor)는 전체 시스템의 성능을 결정짓는 중요한 역할을 하게 되는데[6], 스프링 구조물은 미러면과 지지 기둥을 연결하는 역할을 하므로 미러면과 같은 평면에 놓여 유효 반사 면적을 감소시키는 요인이 된다. 따라서 이러한 문제의 해결을 위해서는 2층 구조를 제작하는 등의 대책이 필요하다. 또한 스프링 구조물에 의해 지지되는 미러를 기울어진 상태로 장시간 구동시킬 경우 이 부분에 발생하는 메모리 현상에 의해 미러의 각변위와 구동 특성이 변화하게 되는 단점이 있다. 스프링 구조물을 핀-조

인트로 교체함으로써 이러한 문제들을 구조적으로 해결할 수 있다. 특히 한 쪽 방향으로 기울인 상태를 장시간 유지해야 하는 응용에 있어서 스프링부의 피로 현상이나 유지 전압 없이 원하는 동작 특성을 구현할 수 있다.

M. Adrian Michalick et al.은 SUMMiT (Sandia Ultra-planar Multi-level MEMS Technology) 공정을 이용하여 flexureless Axial Rotation Micromirror Device (ARMD)를 제작하였다. 다결정 실리콘 구조층을 사용한 이 미러는 기존의 스텝 모터 제작 공정에 사용된 바 있는 일종의 핀-조인트 구조를 사용하였으며, 실리콘 산화막 회생층을 CMP(Chemical Mechanical Polishing)하여 하부의 굴곡이 반영되는 print-through 현상을 억제하였다[7].

기존의 마이크로 미러들과 달리 본 논문에서 제시하는 마이크로 미러에서는 핀과 스테이플로 이루어진 핀-조인트로 미러를 지지한다. 핀-조인트 구조를 사용한 기존의 연구에서는 제작이 완료된 구조물을 일으켜 세우고 고정시키는 조립 공정이나 직선 운동과 회전 운동간의 변환을 위한 기계적인 연결부 제작에 이를 사용한다[8-11]. 본 연구에서는 회전 운동의 가동부로서 기계적인 연결과 접촉에 의한 전기적인 연결부로 핀-조인트를 사용한다. 또한 얇은 구조물을 회전시켜 세울 목적으로 핀-조인트와 같은 평면상에 제작한 기존의 구조물과는 달리 핀-조인트 위에 후막 회생층을 형성하고 바닥으로부터의 높이가 10 μ m 정도인 구조물을 제작한다. 다결정실리콘 구조층과 실리콘 산화막 회생층 대신 알루미늄 구조층과 감광제 회생층을 사용할 경우 스피너와 열증착기 등을 이용하므로 간단한 장비와 공정으로 구조물을 제작할 수 있다. 회생층 제거시 실리콘 산화막을 이용할 경우 습식 식각과 이에 따른 승화법이나 super critical drying 같은 건조 방법이 필수적이나[12] 감광제 회생층의

* 正 會 員 : 서울대 電氣 · 컴퓨터工學部 博士課程

** 正 會 員 : 서울대 電氣 · 컴퓨터工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 2000年 4月 28日

最終完了 : 2000年 7月 10日

경우 산소 플라즈마를 이용해 제거할 수 있다.

본 논문에서는 미러 아래에 핀과 조인트를 갖는 마이크로 미러를 마이크로머시닝 기술로 제작한다. 마이크로 미러는 정전력으로 구동하는데 이에 대한 모델링을 하고 이를 측정 값과 비교하여 모델링의 적절성을 검토한다.

2. 구조 및 모델링

그림 1은 제작된 마이크로 미러의 개략도이다. 각각의 미러의 크기는 $100 \times 110 \mu m^2$ 이며 하나의 구동 전극과 미러 사이의 정전력에 의해 구동된다. 미러면과 중앙 전극간의 전기적인 연결은 지지 기둥과 핀을 통해 이루어진다. 구동시 기계적인 변형을 일으키는 구성 요소는 없으며 이에 따른 복원력 토오크도 존재하지 않게 된다. 단, 핀이 중앙 전극 또는 스테이플과 접촉하므로 이에 의한 마찰이 정특성과 동특성에 영향을 주리라 예상된다.

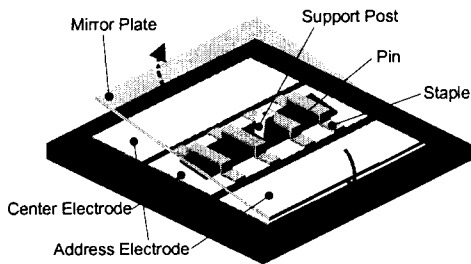
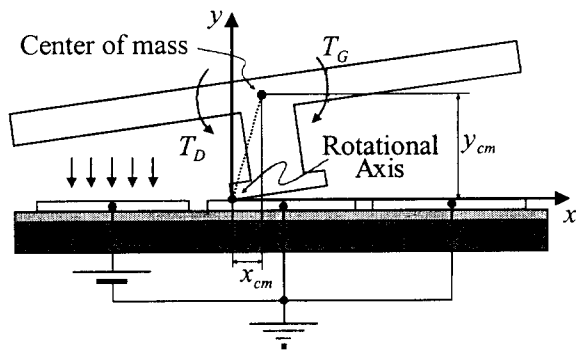
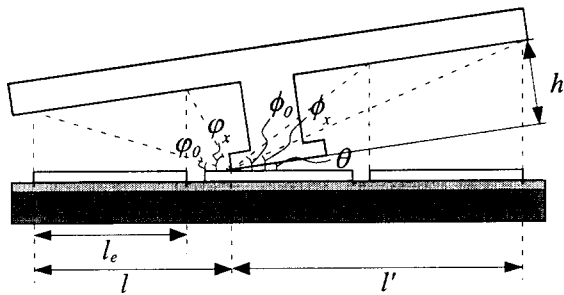


그림 1 제작된 마이크로 미러의 개략도
Fig. 1 Schematics of fabricated micromirror



(a) 왼쪽 전극에 전압을 인가한 경우



(b) 각 부분의 명칭

그림 2 모델링에 사용된 구조
Fig. 2 Schematics of the structure used in modeling

핀과 중앙 전극의 전기적 연결이 완벽하여 미러가 접지 되어 있고 기계적인 저항이 없는 이상적인 상태를 가정할 경우, 미러에 작용하는 토오크는 전압이 인가된 전극 쪽의 구동 토오크(T_D)와 중력에 의한 복원력 토오크(T_G)이다.

그림 2의 단순화된 모델을 이용하여 토오크를 구해보면 다음과 같이 주어진다.

$$T_D = \frac{\epsilon_0}{2} V^2 D (\csc \varphi_0 - \csc \varphi_x)$$

$$\text{여기서 } \varphi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{h - l \sin \theta}{l \cos \theta} \right)$$

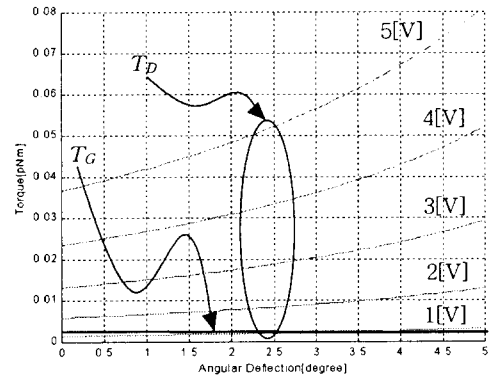
$$\varphi_x = \tan^{-1} \left[\frac{h - (l - l_e) \sin \theta}{(l - l_e) \cos \theta} \right] \quad (1)$$

$$T_G = mg(x_{cm} \cos \theta - y_{cm} \sin \theta) \quad (2)$$

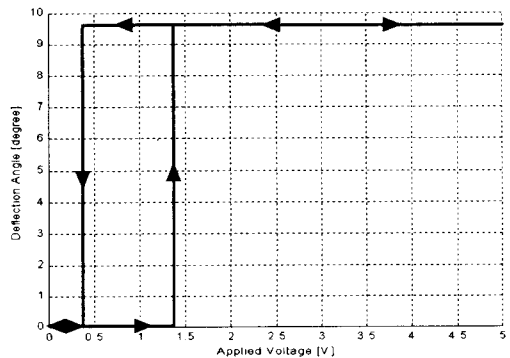
$$T_D + T_G = 0 \quad (3)$$

여기서 D 는 미러와 전극의 지면 깊이 방향 길이, V 는 인가 전압이고, x_{cm} 과 y_{cm} 은 미러 무게 중심의 회전축으로부터의 x, y 축 방향 거리이고 m 은 미러의 질량이다.

바닥과 수평으로서 있는 미러에서 인가 전압과 미러의 각변위에 대한 구동 토오크 T_D 와 복원력 토오크 T_G 값의 변화를 그래프로 나타내 보면 그림 3(a)와 같다.



(a) 구동 전압과 각변위에 따른 토오크



(b) 예측된 미러의 정특성

그림 3 모델링 결과 ($D=100 \mu m, l_e=30 \mu m, l=45 \mu m, h=8 \mu m$)
Fig. 3 Modeling result

두 토오크의 평형식으로부터 미러의 정특성을 알 수 있는데, 이 경우 미러는 전압이 증가해도 수평한 상태를 유지하다가 1.3V에 끝까지 회전하게 된다. 이는 중력에 의한 복원력 토오크가 각변위 증가에 따라 감소하기 때문이다. 이러한 정특성을 그래프로 그려보면 그림 3(b)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

3. 제작 공정

본 논문에서 제시하는 마이크로 미러는 금속 박막 구조층과 감광제 회생층을 번갈아 가며 쌓은 후 회생층을 제거하는 방법에 의해 제작한다. 티타늄 전극을 제외한 모든 구조층은 열증착 또는 스퍼터링에 의해 형성된 알루미늄 막이며 감광제 회생층은 열처리하여 물리, 화학적 강성을 높이고, 반복적인 막 형성 및 사진 식각 공정이 가능하도록 하였다.

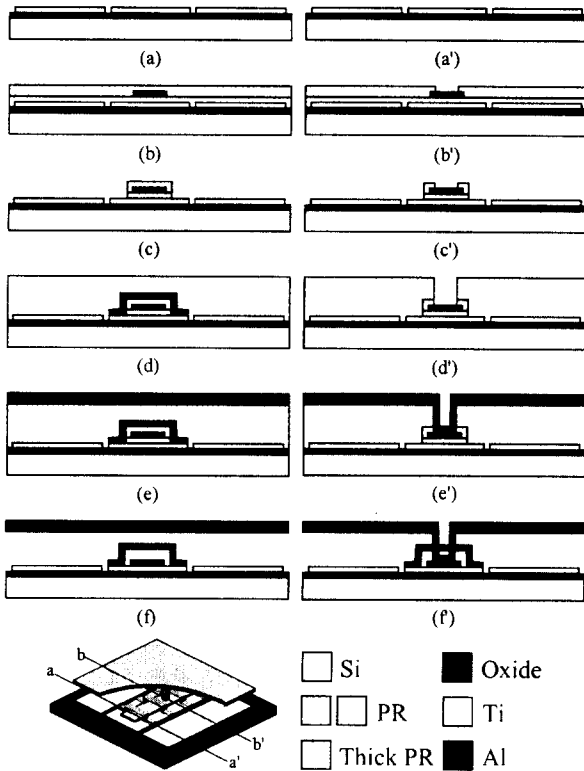


그림 4 제작 공정의 개략도; (a)~(f) aa'선 상에서의 단면, (a')~(f') bb'선 상에서의 단면, (a)(a') 산화막 및 전극 형성, (b)(b') 하부 회생층, 핀, 상부 회생층 형성, (c)(c') 상·하부 회생층 반응성 이온 식각, (d)(d') 스테이플 및 후막 회생층 형성, (e)(e') 미러 형성, (f)(f') 회생층 제거

Fig. 4 Schematics of fabrication process: (a)~(f) on line aa', (a')~(f') on line bb', (a)(a') oxide deposition and electrode formation, (b)(b') lower sacrificial layer, pin, upper sacrificial layer formation, (c)(c') upper and lower sacrificial layer RIE, (d)(d') staple and thick PR sacrificial layer formation, (e)(e') mirror formation, (f)(f') sacrificial layer removal

3.1 전극 형성 공정

(100) n-형 웨이퍼에 절연층으로 쓰일 열산화막을 형성하고 티타늄을 열증착한 후 패터닝한다. 티타늄은 알루미늄 식각액과 높은 선택비를 가지므로 스테이플 형성 공정에서 전극이 손상되는 것을 방지해준다.

3.2 핀-조인트 형성 공정

형성된 중앙 전극 상에 하부 회생층과 핀, 상부 회생층을 형성한다. 회생층으로는 감광제(AZ1512)를 사용하며 이후의 알루미늄 증착, 사진 식각 작업을 위하여 180°C까지 열처리한다. 스테이플의 측벽을 수직으로 형성하기 위해 반응성 이온 식각법(Reactive Ion Etching, RIE)에 의해 상, 하부 회생층을 식각하고, 스퍼터링으로 증착된 알루미늄으로 스테이플을 형성한다. RIE에 의해 식각된 상, 하부 회생층의 수직인 측벽에 알루미늄 막이 충분히 두껍게 형성되게 하기 위해서는 증착시 방향성이 작은 스퍼터링을 이용해야 한다.

3.3 지지 기둥과 미러 형성 공정

두께 8 μ m의 회생층으로 쓰일 후막 감광제(PMER-P LA 900)를 코팅하고 사진 식각 공정에 의해 지지 기둥 형성을 위한 구멍을 제작한다. 이 패턴이 형성된 후막 감광제를 115°C까지 열처리 하고 알루미늄을 열증착한 후 패터닝 하여 미러면과 지지 기둥을 동시에 형성한다.

3.4 회생층 제거 공정

산소 플라즈마를 이용한 ashing에 의해 회생층을 제거한다. 모든 회생층은 동시에 제거되며 회생층 제거 조건은 표 1과 같다.

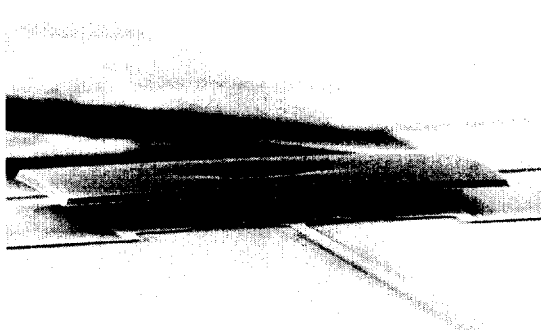
표 1 회생층 제거 조건

Table 1 Sacrificial layer removal condition

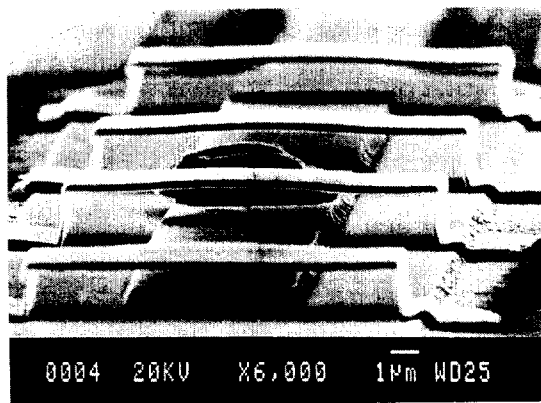
Gas / Flow Rate [sccm]	O ₂ / 200
Chamber Pressure [Pa]	200
Microwave Power [W]	300

4. 제작 결과

그림 5(a)는 제작된 마이크로 미러의 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 사진이다. 회생층이 완벽히 제거되었고, 미러 하부에 미러, 지지 기둥과 핀이 연결된 가동 구조물과 스테이플이 설계대로 제작되었음을 알 수 있다. 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 스테이플의 측벽은 핀의 회전을 방해하지 않도록 수직하게 제작되었고, 핀은 하부의 회생층이 모두 제거되어 중앙 전극 상에 놓여 있다. 제작된 마이크로 미러는 한 쪽으로 기울어질 경우 미러가 기판 바닥인 산화막과 접촉하게 된다.



0009 20KV X950 10µm WD15
(a) 제작된 마이크로 미러의 측면



0004 20KV X6,000 1µm WD25
(b) 희생층 제거 후의 핀-조인트

그림 5 제작된 마이크로 미러와 핀-조인트의 SEM 사진
Fig. 5 SEM image of fabricated micromirror and pin-joint

5. 정특성 측정

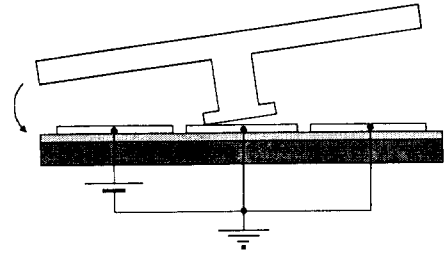
5.1 절연층이 없는 경우

핀과 미러가 바닥과 수평으로 서있고, 핀과 중앙 전극이 전기적으로 연결되어 있고 이를 접지에 연결한 경우(그림 6(a))의 정특성을 측정하였다. 미러들의 하강 문턱 전압은 12~24V의 값을 가졌으나, 이들 미러는 연속적으로 구동시키는 것이 불가능 하였다. 이는 미러가 기울어져 바닥에 닿으면 미러와 바닥면 사이에 점착력이 발생한 결과이다.

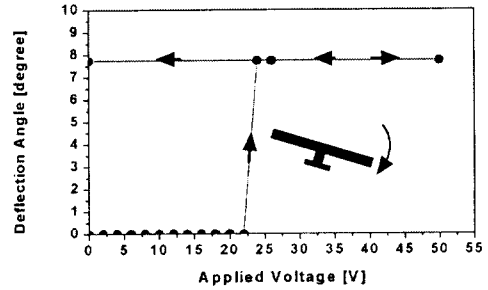
그림 6(b)는 하강 문턱 전압이 24V인 경우로 DC 전압원을 이용하여 인가 전압을 변화시키면서 레이저 프로파일러(KEYENCE VF7500)로 각변위를 측정하였다. 이 정특성 측정 결과를 이상적인 경우에 대한 모델링과 비교해보면 중력에 의한 토크 외에 구동을 억제하는 토크가 존재함을 알 수 있는데 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T = T_{D,th} - T_{G,th} \tag{4}$$

여기서 $T_{D,th}$ 와 $T_{G,th}$ 는 각각 하강 문턱 전압에서의 T_D 와 T_G 값을 나타낸다. 하강 문턱 전압이 12~25V인 경우 ΔT 는 $2.09 \times 10^{-13} \sim 9.15 \times 10^{-13} \text{Nm}$ 의 값을 갖는다. 이 값을 마찰에 의한 기계적인 저항이라고 생각할 수 있다.



(a) 전압 인가 방법을 나타내는 개략도



(b) 정특성 측정 결과

그림 6 핀과 중앙 전극이 전기적으로 연결된 모델의 정특성 측정 결과

Fig. 6 Static characteristics of model with electrically connected pin and center electrode

5.2 절연층이 있는 경우

미러와 바닥면의 점착을 억제하기 위해 희생층이 제거된 시편에 FC(Fluorocarbon)필름을 코팅하고 정특성을 측정하였다. 이 경우 복원력 토크가 존재하였으며, 반복 구동이 가능하여 인가 전압에 대한 미러의 각변위를 레이저 광원과 PIN소자를 이용한 각변위 검출 회로로 측정하였다. 그림 7은 정특성 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 하강 문턱 전압은 107V이고 상승 문턱 전압은 65V로 FC 필름을 코팅하지 않은 경우보다 구동 전압이 증가하였다.

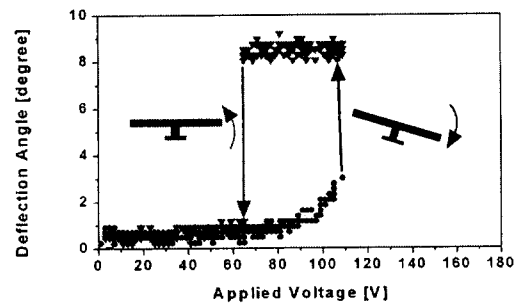


그림 7 FC 필름을 코팅한 시편의 정특성 측정 결과
Fig. 7 Static characteristics of FC film coated sample

FC 필름 코팅 후 반복 구동이 가능해진 것은 기울어진 미러와 기판 바닥과의 계면에서 FC 필름이 점착 방지막으로서의 역할을 하고 있기 때문인 것으로 추정된다. 구동 전압이 증가하고 복원력 토크가 존재하는 원인은 코팅된 FC 필름이 핀과 중앙 전극의 전기적 연결을 방해하는 절연막의 역할을 한 결과로 추정된다. 이를 확인하기 위하여 핀과 중앙 전극 사이에 실리콘 산화막을 형성한 시편을 제작하고 정특성을 측정하였다.

그림 8은 전극 위에 두께 500Å의 PECVD 실리콘 산화막을 형성한 시편의 정특성 측정 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 복원력 토크가 존재하며 구동 전압으로 100V 이상의 값을 가짐을 알 수 있는데 이는 FC 필름이 코팅된 시편에서 나타난 것과 같은 결과이다. 따라서 코팅된 FC 필름은 중앙 전극과 핀의 전기적 연결을 방해하는 절연층의 역할을 하는 것을 알 수 있다.

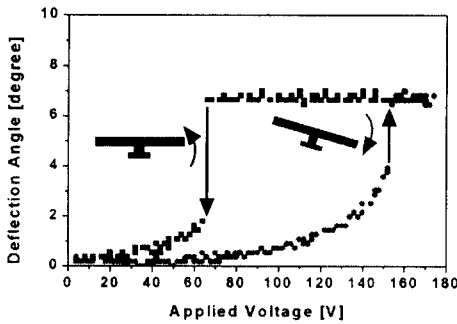


그림 8 중앙 전극 위에 산화막을 코팅한 시편의 정특성 측정 결과

Fig. 8 Static characteristics of sample with oxide layer on center electrode

FC 필름을 코팅한 경우 반복 구동이 가능하였으므로 기울어진 미러가 바닥인 산화막에 닿을 때 발생하는 점착을 억제하는 효과가 있는 것으로 보이나, 전극 위에 산화막을 코팅한 경우에도 반복 구동이 가능하였으므로 억제 성능의 정량적인 분석을 위해서는 각각의 경우에 대한 정확한 lifetime의 측정이 필요하다.

6. 절연층이 있는 경우의 모델링

핀과 중앙 전극 사이에 절연층이 존재하는 경우 구동 전극과 중앙 전극 간에 전위차를 인가하면 핀은 중앙 전극과 전기적으로 분리되어 floating potential을 띄게 된다. 따라서 핀과 중앙 전극 간의 정전력에 의한 토크가 발생하는데 이는 구동 토크와 반대 방향을 띄게 된다. 또한 미러와 구동 전극 간의 전위차 감소로 인해 구동 토크 자체의 크기도 감소하게 된다. 핀 하부에 절연층이 존재하는 경우의 정특성을 예측하기 위해서는 핀에 형성되는 floating potential과 이에 따른 토크(T_F)를 모델링하는 것이 필요하다.

구동 전극과 중앙 전극간에 전위차(V)를 인가할 경우 핀에 형성되는 floating potential을 V_F 라 하면 그림 9의 상·하부 전극(핀과 중앙 전극) 사이에 작용하는 토크는 다음과 같이 주어진다.

$$T_F = \frac{\epsilon_0 D_p V_F^2}{\tan^2 \theta} \left[\ln\left(\frac{1}{C}\right) + C - 1 \right]$$

$$\text{여기서 } C = \frac{d_1}{\epsilon_r l p \sin \theta + d_1} \quad (5)$$

여기서 D_p 는 지면 깊이 방향으로의 핀의 길이이다. 식(5)에서 V_F 의 크기를 해석적으로 구할 수 없기 때문에 유한 요소법을 이용한 시뮬레이션에 의해 모델링하였다. 시뮬레이션에는 그림 9에 주어진 바와 같이 전체적으로 두께 500Å, 비유전율 4.6의 PECVD 산화막이 덮여있는 모델을 사용하였다. 인가 전압(V)과 미러의 각변위(θ)에 따른 floating potential의 변화를 정량화하기 위해 인가 전압 10, 20, 30, 60V에 대하여 각변위를 0° 에서 6° 까지 2° 단위로 변화시키면서 V_F 의 변화를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이터로는 Maxwell을 사용하였다. 그림 10은 시뮬레이션 결과를 보여주는 그래프이다.

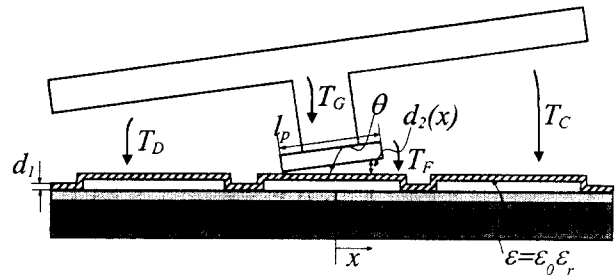


그림 9 T_F 의 계산에 사용된 구조의 개략도

Fig. 9 Schematics of the model used in calculation of T_F

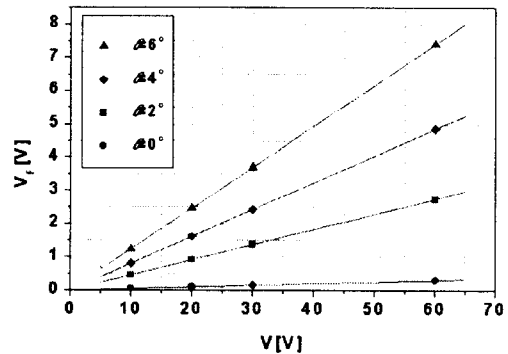


그림 10 미러 및 핀에 형성되는 floating potential과 선형 근사 결과

Fig. 10 Floating potential on mirror plate and pin

시뮬레이션 결과를 이용해 인가 전압, 미러(핀)의 각변위에 대한 floating potential을 구해보면 다음과 같다.

$$V_F = A(\theta) V$$

$$\text{여기서 } A(\theta) = 1.12\theta + 5.39 \times 10^{-3} \quad (6)$$

이 결과를 식(5)에 대입하면 floating potential에 의한 토크의 크기 T_F 가 주어진다.

구동 토크 또한 floating potential에 의해 변화하게 되

는데 이는 다음과 같다.

$$T_D = \frac{\epsilon_0}{2} (V - V_F)^2 D (\csc \varphi_0 - \csc \varphi_x)$$

여기서 $\varphi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{h - l \sin \theta}{l \cos \theta} \right)$

$$\varphi_x = \tan^{-1} \left[\frac{h - (l - l_e) \sin \theta}{(l - l_e) \cos \theta} \right] \quad (7)$$

그림 9에 도시한 미러의 움직임에 영향을 미치는 4가지 토크 중 중력에 의한 토크(T_G)와 구동 전극의 반대편 전극과 미러간의 정전력에 의한 토크(T_C)는 T_D 와 T_F 에 비해 충분히 작은 값을 가지므로 그 영향을 무시할 수 있다. 따라서 식(8)과 같은 평형식에 의해 미러의 움직임이 결정된다.

$$T_D + T_F = 0 \quad (8)$$

정특성 측정 결과를 이용하여 모델링 된 구동 토크 T_D 와 floating potential에 의한 토크 T_F 의 크기를 비교해 보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 모델링에는 접촉점에서의 기계적인 영향이 배제되었으므로 T_F 는 실제보다 작은 값을 갖게 된다. 따라서 인가 전압에 따라 각변위가 증가하거나 감소하는 구간에서는 구동 토크와 복원력 토크가 평형을 이루어야 하므로, T_D 는 T_F 보다 크거나 비슷한 크기를 갖으며 하강 문턱 전압 이상의 전압이 인가될 경우 T_D 는 T_F 보다 큰 값을 가져야 한다. 그림 11에 나타난 구동 토크와 복원력 토크의 비를 보면 이러한 경향을 확인할 수 있다.

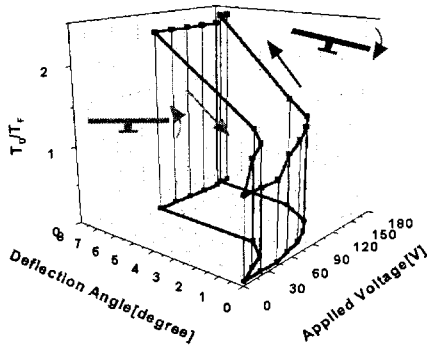


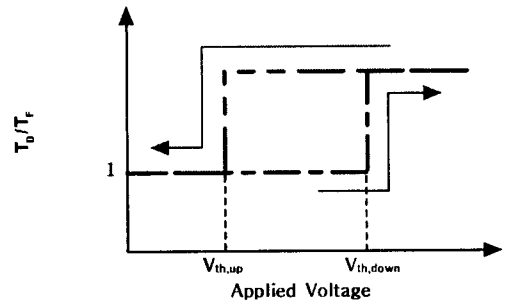
그림 11 인가 전압과 회전각에 따른 구동 토크와 floating potential에 의한 복원력 토크의 비

Fig. 11 Ratio of driving torque and restoring torque vs. input voltage and deflection angle

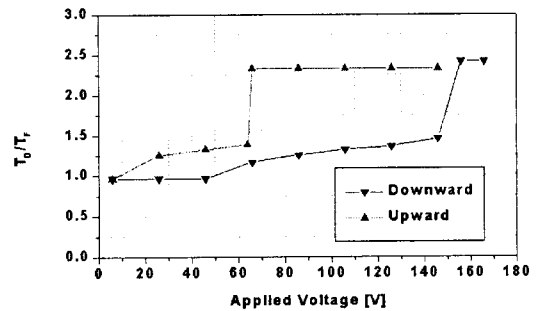
인가 전압에 따른 구동 토크와 복원력 토크의 비를 그림 12에 2차원으로 도시하였다. 그림 12(a)에서 $V_{th,down}$ 은 미러의 하강 문턱 전압이고 $V_{th,up}$ 은 상승 문턱 전압이다. T_D 와 T_F 이외의 요소가 존재하지 않는 이상적인 경우 인가 전압에 따른 구동 토크와 복원력 토크의 비는 그림 12(a)와 같이 나타나게 되나, 실제로는 가동부와 고정부의 접촉점에서 기계적인 영향이 존재하여 그림 12(b)와 같은 결과가

나타나게 된다.

Floating potential에 의한 T_D 의 변화와 T_F 의 형성 이외의 구동에 영향을 미치는 인자의 존재는 핀과 중앙 전극의 사이에 절연막이 없는 경우에도 구동 전압이 이상적인 경우보다 큰 값을 갖는 실험 결과로부터 확인할 수 있다. 마이크로 액추에이터의 구동시 전기적인 원인이나 대기중의 습기에 의한 점착이 큰 영향을 미치게 된다. 본 논문에서 제안한 구조의 경우 구동시 구조물간의 접촉에 의한 저항이 존재하게 된다. 이러한 원인들에 의해 그림 12(b)와 같이 구동시 T_D 와 T_F 이외의 요소가 존재하지 않는 이상적인 경우와 다른 결과를 나타내게 된다.



(a) 이상적인 경우



(b) 실험 결과

그림 12 인가 전압에 따른 구동 토크와 floating potential에 의한 복원력 토크의 비

Fig. 12 Ratio of driving torque and restoring torque vs. input voltage

제작된 시편들의 정특성 측정 결과를 그 구조적인 특성과 함께 비교하면 표 2와 같다.

표 2 미러의 구조에 따른 정특성
Table 2 Static characteristics of fabricated micromirror

핀 하부 절연막	구동 전압[V]	미러 초기 상태	반복 구동	복원력 토크
1	없음	12~25 기판 바닥과 수평	불가능	없음
2	FC 필름	>100 기판 바닥과 수평	가능	있음
3	실리콘 산화막	>100 기판 바닥과 수평	가능	있음

6. 토 의

그동안 마이크로 구조물의 점착(stiction)에 관해 다양한 접근과 해석이 시도되어 왔다. A. Rump et al.은 구조물의 접촉에 의한 점착시 표면의 거칠기와 실제 접촉 면적이 큰 영향을 미치는 것을 확인하고, 점착력의 크기 측정을 시도한 바 있다[13]. 본 논문에서 제시한 핀-조인트에 의해 지지되는 마이크로 미러의 경우 핀 하부와 중앙 전극, 미러의 끝단과 기판 사이에 가동 구조물과 고정부의 접촉이 이루어지게 된다. 핀과 중앙 전극 사이에 절연막이 없는 경우 핀과 중앙 전극간의 점착력에 의해 구동 전압이 이상적인 경우보다 증가하였다. 한쪽으로 기울어진 미러의 끝단은 기판의 실리콘 산화막과 접촉하게 되는데, 이 부분의 점착력이 큰 것이 반복 구동을 방해하는 요인이다. 따라서 가동부의 전기적인 연결을 유지하면서 전극이나 기판과 같은 고정부와의 접촉을 최대한 억제함으로써 미러의 성능을 더 개선할 수 있다.

핀과 중앙 전극 사이에 절연막이 있는 경우에 대하여 제안된 토오크 평형식이 실험 결과와 완벽하게 일치하지 않았는데, 이는 핀과 중앙 전극 같은 가동부와 고정부의 접촉점에서 존재할 수 있는 다양한 원인에 기인한 점착과 기계적인 저항이 구동을 방해하는 방향의 토오크에서 고려되지 않았기 때문이다.

7. 결 론

알루미늄 핀-조인트를 사용한 마이크로 미러를 설계, 제작하였다. 금속 박막과 감광제 회생층을 적층하는 구조물 제작 공정과 산소 플라즈마를 이용한 회생층 제거 공정을 확립하고 재현성을 확인하였다.

제작된 마이크로 미러의 정특성을 모델링하고 제작된 시편으로 측정하여 결과를 비교하였다. 핀과 중앙 전극 사이에 절연막이 존재할 경우 핀에 형성되는 floating potential에 의해 복원력 토오크가 작용하게 됨을 확인하였고, 그 원인을 해석적인 방법과 유한 요소법(Finite Element Analysis)을 이용하여 규명하였다. 핀 하부와 중앙 전극 사이에 적절한 두께의 절연막을 형성함으로써 구조물의 기계적인 변형 없이 복원력 토오크가 작용하는 미러를 제작할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- [1] Jong-Woo Shin, Yong-Kweon Kim, Ho-Seung Kim, Bum-Kyoo Choi, "Fabrication of Micro Mirror Array with Vertical Spring Structure," *Proc. of ETFA '96*, vol. 2, pp. 408-412, 1996.
- [2] Seok-Whan Chung, Jong-Woo Shin, Yong-Kweon Kim, Bong-Soo Han, "Design and Fabrication of Micromirror Supported by Electroplated Nickel Posts," *Sensors and Actuators*, A54, pp. 464-467, 1996.
- [3] Larry J. Hornbeck, "128×128 Deformable Mirror Devices," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 30, pp. 539-545, 1983.
- [4] Raji Krishnamoorthy, Thomas Bifano, "MEMS Arrays for Deformable Mirrors," *Proc. of SPIE*, vol. 2641, pp. 96-104, 1995.
- [5] John H. Comtois, Victor M. Bright, Steven C. Gustafson, M. Adrian Michalick, "Implementation of Hexagonal Micromirror Arrays as Phase-Mostly Spatial Light Modulators," *Proc. of SPIE*, vol. 2641, pp.76-87, 1995.
- [6] Gleb Vdovin, Simon Middelhoeck, "Deformable Mirror Display with Continuous Reflecting Surface Micromachined in Silicon," *Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp.61-65, 1995.
- [7] M. Adrian Michalick, John H. Comtois, and Heather K. Schriener, "Design and Fabrication of Optical MEMS Using a Four-Level, Planarized, Surface-Micromachined Polycrystalline Silicon Process," *Miniaturized Systems with Micro-Optics and Micromechanics III*, SPIE vol. 3276, pp. 48-55, 1998.
- [8] Kristofer S. J. Pister, "Hinged Polysilicon Structures with Integrated CMOS TFTs," *Proc. of IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop*, pp. 136-139, 1992.
- [9] K. S. J. Pister, M. W. Judy, S. R. Burgett, and R. S. Fearing, "Microfabricated Hinges," *Sensors and Actuators*, A33, pp. 249-256, 1992.
- [10] N. C. Tien, O. Solgaard, M-H. Kiang, M. Daneman, K. Y. Lau, R. S. Miller, "Surface-Micromachined Mirrors for Laser-Beam Positioning," *Proc. of the 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, vol. 2, pp. 352-355, 1995.
- [11] Patrick B. Chu, Phyllis R. Nelson, Mark L. Tachiki, and Kristofer S. J. Pister, "Dynamics of Polysilicon Parallel-Plate Electrostatic Actuators," *Proc. of the 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, vol. 2, pp. 356-359, 1995.
- [12] John H. Comtois, M. Adrian Michalick, Carole Craig Barron, "Fabricating Micro-Instruments in Surface-Micromachined Polycrystalline Silicon," *Proc. of the 43th International Instrumentation Society of America*, pp. 169-179, 1997.
- [13] A. Rump, U. Gösele, F. Fischer, P. Hein, J. Marek, H. Münzel, S. Pintër and M. Schöfthaler, "Investigating Mechanisms of Adhesion in MEMS by Capacitance-Voltage Measurements with Micromachined Comb-Structures," *Technical Digest of the 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, vol. 1, pp. 500-503, 1999.

저 자 소 개



지 창 현 (池 昌 炫)

1995년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 전기·컴퓨터공학부 박사과정
Tel : +82-2-888-5017, Fax : +82-2-873-9953
E-mail : maserati@chollian.net



김 용 권 (金 容 權)

1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 졸업(석사). 1990년 동 경대학교 대학원(공박). 1990년 히다찌 중앙 연구소 연구원. 1992년~현재 서울대 전기·컴퓨터공학부 부교수

Tel : +82-2-880-7440, Fax : +82-2-873-9953

E-mail : yongkkim@chollian.net