

# 단층 다결정 실리콘 마이크로머시닝 기술로 제작된 정전형 마이크로 미러 어레이의 모델링 및 측정

민영훈<sup>\*</sup>, 김용권  
서울대학교 전기공학부

## Modeling and Measurement of Electrostatic Micro Mirror Array Fabricated with Single Layer Polysilicon Micromachining Technology

Young-Hoon Min<sup>\*</sup>, Yong-Kweon Kim  
School of Electrical Engineering, Seoul National University.

**Abstract**-A silicon based micro mirror array is a highly efficient component for use in optical applications such as adaptive optical systems and optical correlators. A micro mirror array designed, fabricated and tested here is consisted of 5×5 single layer polysilicon, electrostatically driven actuators. In this paper, deflection characteristics and pull-in behavior of the actuators for analog control was studied and particularly, the influence of the residual stress in flexure beams for the restorative force of actuators was considered. The springs are modeled as a residual stress-free spring and a spring with residual stress. In calculation, a mirror with the residual stress-free springs has 30.3N/m spring constant and 31.1V pull-in voltage. On the other hand, a mirror with the stressed springs has 23.6N/m and 27.4V respectively. The experimental result, which is 20.5N/m and 25.5V, shows that the stressed springs are well modeled.

### 1. 서론

광 경로상의 주변환경으로부터 왜곡된 광 신호를 자동적으로 보정함으로써 보다 왜곡되지 않은 광 빔 및 영상을 얻도록 하는 적응 광 시스템(adaptive optical system)이나 패턴인식을 가능토록 하는 광 상관기(optical correlator) 등, 광 응용 기기의 매우 중요한 부품으로써 구동 가능한 마이크로 미러가 사용된다. 특히, MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)공정에 의해 제작되어 정전력으로 구동하는 마이크로 미러는 전통적인 피에조 구동방식의 미러에 비하여 제작이 쉽고, 별도의 조립작업이 필요없으며, 액츄에이터 및 미러가 한 칩(chip)상에 집적될 수 있다. 또한, 저전압구동 및 양방향구동이 가능하고, 전력소비가 적으며, 액츄에이터의 구성밀도가 높을 뿐 아니라 높은 주파수에서 동작이 가능하다. 이러한 방식의 최근 연구동향을 보면, 제한된 어드레싱이 가능한 분할된 미러를 표면 마이크로머시닝(surface micromachining)으로 제작하여 입사광의 위상변조를 실현한 연구<sup>[1]</sup>와 분할된 정전력 구동의 액츄에이터 상면에 기둥을 세우고 멤브레인 미러를 제작한 후 액츄에이터 자체의 변위특성<sup>[2]</sup>과 독립적 컨트롤 구조<sup>[3]</sup> 및 멤브레인 미러의 변위특성<sup>[4]</sup>을 연구한 예가 있으며, 실리콘 몸체가공(bulk micromachining)으로 멤브레인 미러를 제작하고 이 멤브레인 미러 하단부에 전극을 두어 정전력으로 구동되도록 함으로써 입사빔의 위상변조 및 포커싱을 실현한 예<sup>[5][6]</sup>가 있다. 또한, MEMS 공정으로 제작된 육각형의 미러 어레이를 수직 구동함으로써 광의 회절에 의해 기인되는 광 수차를 보정하도록 한 예<sup>[7]</sup> 등이 있다.

본 연구에서는 적응 광 시스템이나 광 상관기로 사용하기 위한 본격적인 마이크로 미러 구조물의 제작에 앞서 기초실험을 목적으로 5×5 개의 미러로 구성된 단층 다결정 실리콘 미러 어레이를 설계, 제작한 후 아날로그 컨트롤 범위에서의 변위특성 및 문턱전압(pull-in voltage)을 측정하여 모델링한 값과의 비교를 행하였다. 특히 구조물의 잔류응력에 의한 영향을 확인하였다.

### 2. 모델링

정전력으로 구동되는 마이크로미러의 모델을 그림 1에 나타내었다.

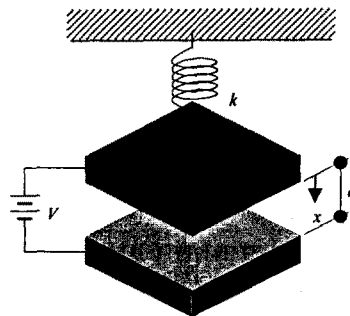


그림 1. 정전력 구동 모델

정전력으로 준정적으로 빔을 당길 경우, 스프링의 복원력과 평형을 이루게 된다. 그러나 빔이 내려올수록 정전력이 강해지므로 어느 정도가 지나면 복원력보다 커지게 되어 갑자기 바닥에 붙어 비린다. 이 때의 전압이 문턱전압(Pull-in voltage)이다. 이 때, 정전력을  $F_e$ , 스프링에 의한 복원력을  $F_k$ 라 하면 각각 식(1)과 (2)로 주어진다.

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A V^2}{(d-x)^2} \tag{1}$$

$$F_k = -kx \tag{2}$$

이 때,  $\epsilon_0$ 는 공기의 유전율,  $A$ 는 전극의 면적,  $d$ 는 초기의 거리,  $k$ 는 스프링상수,  $x$ 는 변위를 나타낸다. 식(1),(2)로부터 정전력과 복원력이 같아지는 점을 구하면  $x=d/3$  이 되고 이 때의 전압(pull-in voltage)은 식(3)으로 된다.

$$V_{pull-in} = \left[ \frac{8kd^3}{27\epsilon_0 A} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

이 때  $d$ 는 양 전극사이에 공기가 있는 것으로 가정된 간극이며 유전체가 존재할 경우에는 식(4)와 같은 실효간극으로 표현된다.

$$d = (d)_{air} + \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_A} \right) d_A + \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_B} \right) d_B + \dots \quad (4)$$

본 연구에서의 스프링은 그림 2와 같이 한쪽이 고정되어 있고 다른 한쪽은 미러에 고정되어 각도변화가 없이 미러와 평행하게 움직이는 네개의 빔으로 구성되어 있으며, 각 빔은 길이  $L$ , 폭  $w$  및 두께  $t$ 로 구성되어 있다.

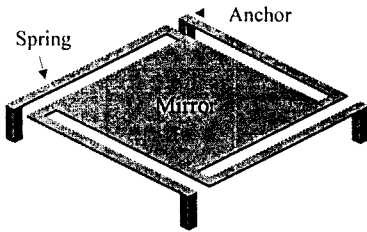


그림 2. 구조물의 구성

이 빔에 의한 스프링 상수  $k_1$ 을 구해 보면 식(5)가 되고 내부 잔류응력에 의한 스프링 상수  $k_2$ 는 식(6)과 같이 표현될 수 있다.<sup>[20]</sup> 여기서  $E$ 는 영률,  $\sigma$ 는 응력,  $\nu$ 는 포아송 비를 나타낸다.

$$k_1 = 4 \times \frac{12EI}{L^3} = \frac{4Ewt^3}{L^3} \quad (5)$$

$$k_2 = 4 \times \frac{\sigma(1-\nu)wt}{2L} \quad (6)$$

따라서 복원력을 결정하는 스프링상수는 식(7)으로 된다.

$$k = k_1 + k_2 = 4 \left( \frac{Ewt^3}{L^3} + \frac{\sigma(1-\nu)wt}{2L} \right) \quad (7)$$

또한, 실리콘 웨이퍼 자체를 한쪽 전극으로 사용하였기 때문에 스프링 요소 자체에 작용하는 정전력이 복원력을 감소시키게 된다. 빔이 한쪽은 고정되어 있고 다른 한쪽이 내리감에 따라 빔의 각 부분에 작용하는 정전력은 다르게 되므로 이를 빔의 길이에 따라 적분함으로써 빔 전체에 작용하는 정전력을 구할 수 있고 이를 스프링 복원력에 관계하는 변위의 함수로 나타낼 수 있다.

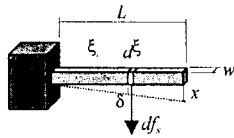


그림 3. 스프링의 길이에 따른 근사 변위

그림 3과 같이 스프링 길이에 따른 변위를 근사적으로 비례한다고 가정하면 스프링 길이방향의 임의위치에서의 변위  $\delta(\xi)$ 는  $(x/L)\xi$ 로 둘 수 있다. 따라서, 스프링자체에 작용하는 정전력을  $F_s$ 라 하면 다음과 같이 쓸 수 있다. 여기서, 정전력의 작용점은 식(8)로 둘 수 있으며, 네개의 스프링이 있으므로 식(9)와 같이 되고, 최종적으로  $F_s$ 는 식(10)으로 되어 스프링의 복원력을 감소시키는 힘으로 작용하게 된다.

$$\xi = \frac{\int \xi df_x}{\int df_x} \quad (8)$$

$$F_s = \frac{4}{L} \int \xi df_x = \frac{4}{L} \int \xi df_s = \frac{4}{L} \int \xi \frac{\epsilon_0 V^2 w}{(d - (x/L)\xi)^2} d\xi \quad (9)$$

$$F_s = \left( \frac{2}{L} \right) (\epsilon_0 w V^2) \left( \frac{L}{x} \right)^2 \left( -\frac{x}{d-x} + \ln \frac{d-x}{d} \right) \quad (10)$$

### 3. 설계 및 제작

제작된 미러 어레이의 전자현미경 사진을 그림 4에 나타내었다. 5×5 미러는 각각 독립적으로 구동될 수 있도록 배선을 하였으며, 각각 전압을 인가할 수 있는 패드를 마련하였다.

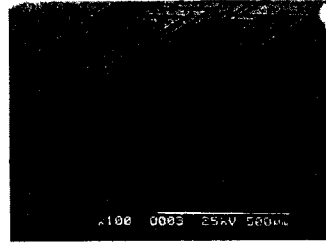


그림 4. 제작된 미러어레이

단층의 다결정 실리콘으로 구성되어 있어서 실리콘 웨이퍼와 패드사이의 인가된 전압차에 따라 각각의 미러가 수직 구동하게 되며, 구동되는 미러를 제외한 패드, 배선 및 복원력을 위한 스프링구조를 지지하는 지지부는 웨이퍼 면에 절연막을 사이에 두고 고정되어 있다. 그림 5는 미러 어레이의 한 픽셀을 나타내었으며 각각의 패드에 인가되는 전압은 도핑된 다결정 실리콘 배선을 통하여 각각의 미러 픽셀로 인가되게 된다.

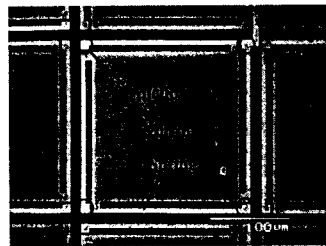


그림 5. 미러 어레이의 한 픽셀

제작공정은 그림 6에 나타내었으며, 그림 6의 (c)공정까지는 서울대 반도체공동연구소에서 실시한 제1회 MEMS MPC (Multi-Project Chip) 프로그램에 의해 제작되었다.

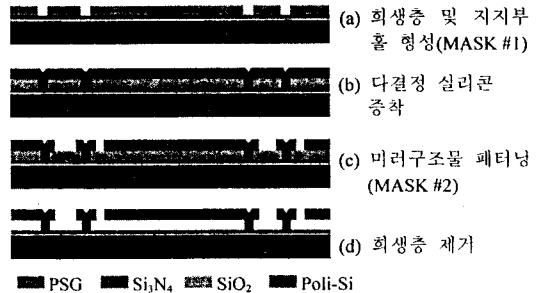


그림 6. 제작공정

먼저 실리콘 웨이퍼 위에 절연을 위한 열 산화막을 형성시키고 실리콘 질화막을 증착하였다. 희생층(PSG)을 증착한 후 지지부(Anchor)를 패터닝(MASK#1)하고 RIE를 사용하여 홀을 형성하였다(a). 여기에 다결정 실리콘을 증착(b)한 후, 미러 구조물을 패터닝(MASK#2)하였다(c). 희생층 제거는 HF 용액을 사용한 후, 세척하였다(d).

#### 4. 측정 및 실험결과

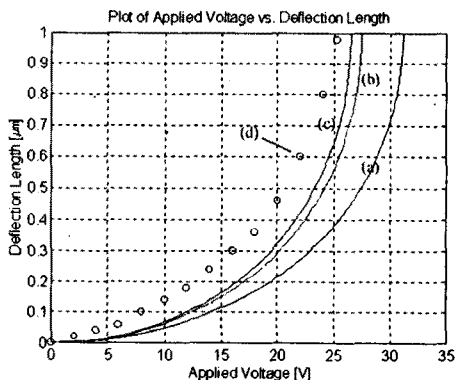
완성된 미러 어레이 재료의 기계적 특성 및 크기에 대한 측정값을 표 1에 나타내었다. 막의 두께 및 구조물의 크기는 레이저를 이용한 비접촉 형상측정기로 측정하였다.

표 1. 제작된 구조물의 특성 및 크기의 측정값

막의 두께 (μm)	1 열 산화막	0.086
	실리콘 질화막	0.25
	희생층 (PSG)	3.0
	다결정실리콘	3.7
기계적 특성 (다결정실리콘)	1 잔류변형률 (%)	-0.026 (compressive)
	1 응력구배 (Pa/μm)	-0.71 × 10 <sup>6</sup>
	1 응률 (Pa)	155 × 10 <sup>6</sup>
	1 포와송 비	0.22
구조물의 크기 (μm)	미리크기	173 × 173
	스프링 (L × w × t)	173 × 5 × 3.7
	초기간격 (d)	3.0 * (3.055)

1 MEMS MPC에서 제공한 결과 2 다결정실리콘의 일반값(11) \*식(6)에 의한 보정값

완성된 미러 어레이를 이용하여 임의의 픽셀에 대하여 문턱전압(pull-in voltage)과 인가전압에 대한 변위를 측정하였다. 비접촉식의 레이저 변위계 (KEYENCE사의 LC-2400A, LC-2420)를 사용하였으며 이 기기의 레이저 빔의 크기는 20 μm × 12 μm이고 해상도는 0.01 μm이며, 샘플링 주파수는 50 kHz이다. 모델링에 의해 식(7)에서 계산된 값은 스프링 상수가 잔류응력을 고려하지 않았을 경우에 30.3 N/m, 고려할 경우 23.6 N/m가 되고 이에 대한 문턱전압은 식(3)에 의해 각각 31, 1V, 27.4V가 얻어지는데 임의로 선택한 12개의 픽셀을 측정할 결과 문턱전압이 평균 25.5V, 표준오차 4.23%가 얻어졌다. 이는 스프링 상수가 20.5N/m임을 나타내는 것이다.



(a),(b),(c): 계산결과, (d): 실험결과  
(a): 잔류응력이 없는 경우 (b): 잔류응력이 있는 경우  
(c): 잔류응력과 스프링에 가해지는 정전력도 함께 고려한 경우

그림 7. 인가전압에 대한 변위

그림 7에 인가전압에 대한 변위를 도시하였다. 그림 7의

(a)는 잔류응력을 고려하지 않았을 경우의 모델링 결과이고 (b)는 고려하였을 경우이며 (c)는 식(10)에 의해 스프링 자체에 인가되는 정전력도 고려한 경우이다. 단, 응력구배에 의해 스프링의 끝단이 초기위치에서 약 0.5 μm 처져 있음을 고려하였다. (d)는 실제의 측정 값이다. 그림에서 알 수 있듯이 잔류응력을 고려한 경우 실험치에 근접하였다. 잔류응력을 고려하지 않았을 경우에 모델링에 의한 값과 실험치와의 스프링상수 및 문턱전압의 오차는 각각 47.8%, 22.0%였으며, 고려한 경우는 각각 15.1%, 7.4%였다. 또한 그림 7의 (c)에서 볼 수 있듯이 스프링에 인가되는 정전력을 함께 고려한 경우에는 더욱 실험치에 근접하였다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 적응 광 시스템이나 광 상관기로 사용하기 위한 본격적인 마이크로 미러 구조물의 제작에 앞서 기초실험을 목적으로 5 × 5 개의 미러로 구성된 단층 다결정 실리콘 미러 어레이를 설계하였고 MEMS MPC로 제작된 미러의 성능을 측정하고 이를 모델링한 결과와 비교하였다. 마스크 2장으로 간단한 미러 어레이를 구성(fill-factor: 67%)할 수 있었으며 특히, 잔류응력의 영향을 확인하였다. 광학분야에 응용되는 미러를 측정함에 있어서 전용 측정시스템과 FEM 해석을 통하여 보다 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각되지만 모델링에 의한 근사식 만으로도 만족할 만한 결과를 얻었다.

#### Acknowledgment

본 논문을 위한 미러 어레이는 서울대 반도체공동연구소에서 실시한 제 1회 MEMS MPC 프로그램에 의해 제작되었으며, 구조물의 물성치도 MEMS MPC에서 제공 받았습니다. 이에 서울대 반도체공동연구소에 깊은 감사올 드립니다.

#### 참고문헌

- [1] R.K.Tyson, Principles of Adaptive Optics, Academic Press, 1991
- [2] T.Lin, "Implementation and characterization of a flexure-beam micromechanical spatial light modulator", *Opt. Eng.*, Vol.33, No.11, 1994
- [3] R.Krishnamoorthy, T.Bifano, "MEMS array for deformable mirrors", *SPIE*, Vol.2641, 1994
- [4] T.Bifano, R.Krishnamoorthy, "Surface Micromachined Deformable Mirrors", *SPIE*, Vol.2641, 1995
- [5] T.Bifano et. al, "Continuous-membrane surface-micromachined silicon deformable mirror", *Opt. Eng.*, Vol.35, No.5, 1997
- [6] G.Vdovin, S.Middelhoek, "Deformable Mirror Display with Continuous Reflecting Surface Micromachined in Silicon", *IEEE MEMS*, 1995
- [7] G.Vdovin, "Spatial light modulator based on the control of the wavefront curvature", *Optics Comm.*, Vol.115, 1995
- [8] G.Vdovin, S.Middelhoek and P.M.Sarro, "Technology and applications of micromachined silicon adaptive mirrors", *Opt. Eng.*, Vol.36, No.5, 1997
- [9] M.C.Roggeman, "Use of micro-electro-mechanical deformable mirrors to control in aberrations in optical systems : theoretical and experimental results", *Opt. Eng.*, Vol.36, No.5, 1997
- [10] M.A.Michaliecek, V.M.Bright and J.H.Comtois, "Design, fabrication, modeling and testing of a surface micromachined device", *Proc. 1995 ASME Dynamic Systems and Control Division*, 1995
- [11] W.N.Sharpe, Jr., B.Yuan, and R.Vaidyanathan, "Measurements of Young's Modulus, Poisson's Ratio, and Tensile strength, of Polysilicon", *IEEE MEMS*, 1997