

p+ Si 외팔보 구조를 이용한 광학 소자용 마이크로 구동기

박태규, 양상식
아주대학교 전자공학부

Fabrication of a Micro actuator with p+ Si cantilevers for Optical Devices

Tae Gyu Park, Sang Sik Yang
School of Electronics Engineering, Aju University

Abstract - The paper represents the fabrication of an electrostatic micro actuator for optical devices. The micro actuator consists of a plate suspended four p+ silicon cantilevers and an electrode on a glass substrate. The cantilever curls down because of the residual stress gradient in p+ silicon. When input voltage is applied between the p+ cantilevers and the electrode, the cantilevers are pulled toward the electrode by the electrostatic force. The displacement of the plate is measured with a laser displacement meter for various input voltage and frequencies.

1. 서 론

최근 마이크로머시닝 기술의 발달과 함께 기존의 센서 및 기계소자의 소형화가 가능해지고 이에 따른 대량생산, 원가절감 및 신뢰도 향상 등으로 마이크로 시스템으로의 응용을 가능케 하고 있다. 이러한 마이크로머시닝 기술을 이용하여 각종 광통신 소자의 집적화 및 소형화를 할 수 있고, 광통신 소자의 성능 향상을 이룰 수 있다. 이러한 목적으로 광학 스위치, 스캐너, 홀로그래밍 등의 광학 시스템에 적용하려는 연구가 이루어지고 있다.

이러한 연구 중에는 광학 스위칭 소자나 스캐너로 응용될 마이크로미러나 마이크로 구동기가 대부분이다. Miyauchi 등은 폴리실리콘을 이용한 마이크로미러를 어레이 형태로 제작하였다[1]. 하지만, 이 경우, 광 통신을 위한 광 경로를 스위칭할 수는 있지만, 소자에 인가되는 전압이 수 백V가 필요하므로, 실질적인 응용에는 한계가 있다. 또한 표면도체가공기술을 이용한 미러 어레이에 관한 연구를 Conant 등이 진행하였다[2]. 이 경우, 다층 폴리실리콘을 이용한 공정을 수행함으로써 인해 공정이 복잡해질 수 있다. 그리고, Hiller 등의 많은 연구자들이 제작해 온 기존의 정전력을 이용한 torsional mirror의 경우는 아직까지는 인가전압에 비해 구동되는 구동각에 한계가 있다[3,4].

본 논문에서는 광통신 소자에 적용될 수 있는 마이크로 구동기를 제작한다. 기존의 정전형 구동기와는 달리 고전압이 필요하지 않고 잔류 응력으로 인한 p+ 실리콘 외팔보의 처짐을 이용하여 광학 소자에 적용할 수 있는 마이크로 구동기를 제작하고 시험한다.

2. 마이크로 구동기의 구조

외팔보의 제작은 기존의 Yang[5,6]과 Ok[7]의 논문을 바탕으로 설계 및 해석하고 정전력을 이용하여 저전압에서 큰 변위의 광 경로를 변환시켜주도록 한다. 마이크로 구동기는 길이와 폭이 각각 2 mm, 500 μm인 4개의 외팔보와 1mm×1mm 크기의 평판으로 이루어진다.

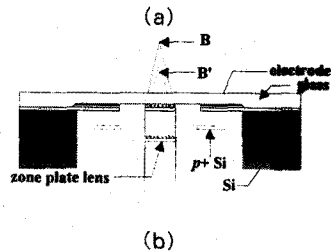
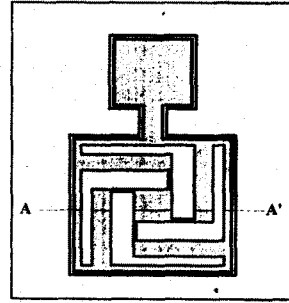


그림 1. 마이크로 구동기의 개념도

- (a) Si substrate 평면도
- (b) 조립후 A-A' 단면도

3. 마이크로 구동기의 정적 변위 해석

본 논문에서는 p+ Si 외팔보 구조를 이용하여 보에 연결된 평판을 수직으로 구동시킨다. 외팔보는 두 대면 전극 사이에 인가되는 정전력에 의해 구동된다. 그림 1은 마이크로 구동기의 개념도이다. 인가된 정전력에 의해 외팔보에 연결된 평판을 구동시킨다. 이때, 평판에 콘 플레이트 렌즈와 같은 광학 소자를 집적한다면 그림 1과 같이 초점을 조절이 가능한 광 픽업에 응용할 수 있게 된다.

평평한 외팔보 내에 잔류 응력이 존재할 경우 외팔보는 처지게 된다. Yang과 Ok 등의 논문을 이용하여 보의 수직변위를 식 (1)을 이용하여 계산한다. 여기서는 박막내의 잔류응력은 표면에 수직인 방향으로는 변화하고, 평행한 방향으로 변화가 없다고 가정한다. 외팔보의 두께가 h인 경우, 외팔보 끝 점(L)에서의 수직 변위, v_L 은 외팔보의 수직변위와 굽힘 모멘트, M_b 와의 관계로부터 구해진다.

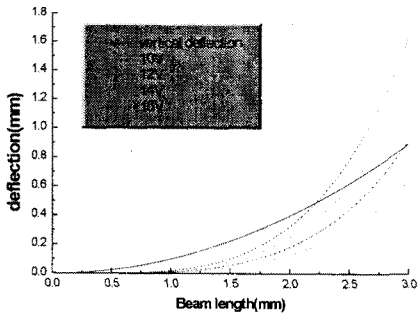


그림 2. 외팔보 길이에 따른 수직 변위

$$v_L = \frac{6L^2}{Eb^3} M_b \quad (1)$$

$$= -\frac{L^2}{E} \left\{ \frac{1}{2} a_1 + \frac{3}{40} h^2 a_3 - \frac{3}{10} h^2 a_4 + \dots \right\}$$

여기서, E는 탄성계수이고, L과 b는 각각 외팔보의 길이와 폭이며, 다항식의 계수는 $a_1 \sim a_4$ 는 참고문헌(7)을 이용한다.

외팔보의 초기 잔류 응력이 없는 경우 정전력, F가 작용할 때, 보의 길이에 따른 외팔보 끝의 수직 변위, δ_{max} 와의 관계는 식 (2)와 (3)과 같다.

$$F = \epsilon_0 A \frac{V^2}{2d^2} \quad (2)$$

$$\delta_{max} = \frac{pL^4}{8EI} \quad (3)$$

여기서, A와 d는 각각 대면전극의 면적과 간극이고, V는 인가전압이다. 그리고, p는 단위 길이당 작용하는 힘, $p=F/L$ 을 말하며, I는 외팔보의 관성모멘트이다. 식 (1), (2), (3)을 이용하여 각각의 외팔보의 길이에 따른 수직변위를 구하면 그림 2와 같다. 이때, 인가전압은 10V, 12V, 14V, 16V이다. 그림 2의 그래프에서 만나는 점은 외팔보의 수직 변위의 평형점을 나타낸다.

4. 제작 공정

본 실험에서는 비저항이 10 ~ 20 Ωcm 이고 두께가 $525 \pm 10 \mu\text{m}$ 인 4 inch, n형, (100) 실리콘 웨이퍼를 사용한다. 그림 3는 마이크로 구동기의 제작 공정도이다. 그림 3(a)와 같이 약 0.6 μm 두께의 열산화막을 습식 산화로 성장시킨 다음, 붕소 도핑할 부분을 BOE(Buffered Oxide Etchant)를 이용하여 제거한다. 산화막을 제거한 후 그림 3(b)와 같이 붕소로 도핑을 수행한다. 붕소의 도핑은 고체 확산원 BN 1100을 이용하여 1100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 720 분 동안 선풍산 (pre-deposition)을 수행하고, HF-LTO+HF 공정으로 BSG를 제거한다. 1100 $^{\circ}\text{C}$, 90분동안 습식 산화로 후 확산 공정을 수행한다.

그림 3(c)와 같이 웨이퍼 뒷면에 식각창을 형성한 후, TMAH를 이용하여 실리콘을 300분동안 식각한다. 이때, 식각률은 약 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ 이다. 그림 3(d)와 같이 웨이퍼의 앞면에 p+ 구조물을 형성하기 위하여 사진식각 공정을 행한 후, BOE를 이용하여 산화막을 제거한 후, 등방성 식각액을 이용하여 선택적으로 p+ 층을 제거한다. 이때, 시편에 마이크로 구동기의 패턴이 완성된다. 남아 있는 뒷면의 실리콘을 식각한다. 이때, 식각액은 EPW(Ethylendiamine : Pyrocatechol : DI Water = 250 ml : 40 g : 80 ml) 용액을 사용하여 115 ± 2 $^{\circ}\text{C}$ 에서 수행한다. 구조물의 보호를 위해 9

0 $^{\circ}\text{C}$ 의 낮은 온도에서 식각액을 낮춰서 식각한다. 식각 완료 후 BOE 용액에 처리하여 앞면에 남아 있는 산화막을 제거하여 p+ 외팔보를 이용한 마이크로 구동기를 완성한다. 고정 전극을 제작하기 위하여 파이렉스 유리에 Cr-Au 층을 증착하고, PR 마스크를 이용하여 습식 식각을 수행하여 전극을 제작한다. 절연을 위해 제작된 전극위에 PECVD 질화막을 5000 \AA 가량 증착한다. 이후 질화막을 $\text{CF}_4\text{-O}_2\text{-Ar}$ 을 이용한 RIE를 이용하여 패터닝한다. 제작된 실리콘 웨이퍼와 고정 전극이 형성된 파이렉스 유리를 에폭시를 이용하여 접합함으로써 마이크로 구동기의 제작을 완료한다.

그림 4는 붕소 도핑 분포를 T-SUPREM 시뮬레이션으로 구한 결과이다. p+ Si의 식각 정지를 위한 붕소의 도핑 농도는 $7 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 정도이다. 이를 통해 구동기의 두께는 약 3 μm 이다.

그림 5는 제작된 마이크로 구동기의 사진들이다. 구동기는 길이가 2 mm인 외팔보에 1 mm \times 1 mm인 평판으로 이루어진다.

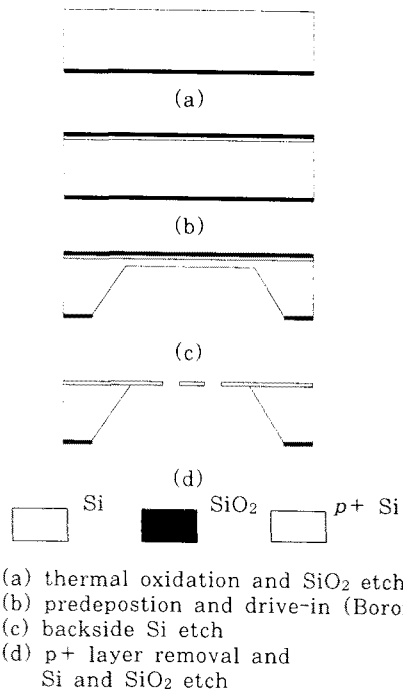


그림 3. 마이크로 구동기의 제작 공정도

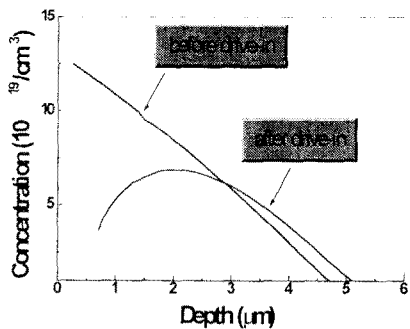


그림 4. T-SUPREM으로 구한 붕소 농도 분포
5. 구동 실험

그림 6은 구동기 특성 시험 장치도이다. 함수 발생기와 증폭기를 이용하여 인가될 전압의 크기와 주파수를 조절한다. 전압을 인가하면, 외팔보가 정전력에 의해 상하로 진동하고 이에 의해 평판이 구동된다. 이때, 레이저 변위계(KEYENCE LC-2420)을 이용하여 평판의 변위를 측정한다. 그림 7은 정현파 전압을 각각 5V_{p-p}, 10V_{p-p}, 20V_{p-p}, 40V_{p-p}를 인가하였을 때, 인가 주파수에 따른 평판의 수직 변위이다. 10V_{p-p}, 10 Hz의 정현파를 인가할 때 10 μm정도의 변위를 얻는다. 마이크로 구동기는 약 1kHz의 대역폭을 갖는다.

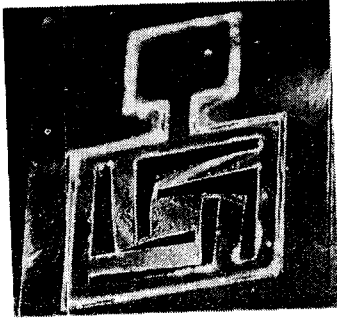


그림 5. 제작된 마이크로 구동기

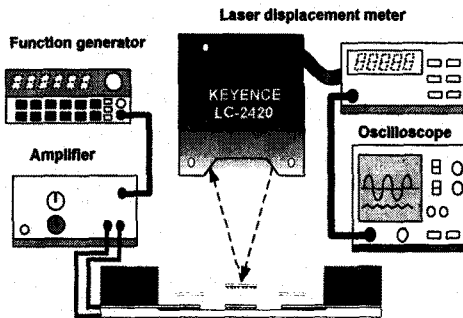


그림 6. 구동 실험 장치도

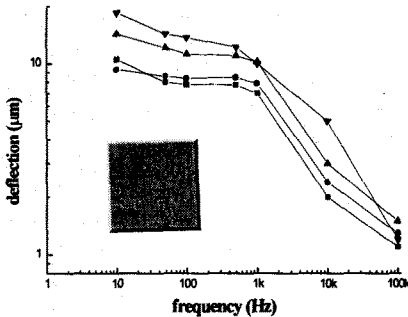


그림 7. 주파수에 따른 구동기의 변위 특성

6. 결 론

본 논문에서는 광통신 소자에 적용가능한 정전형 마이크로 구동기를 제작하였다. 구동기는 4개의 외팔보와 보에 연결된 평판으로 이루어 진다. p+ 실리콘의 식각 정지막을 이용하여 제작된 구동기는 수 ~ 수십 V의 범위에서 구동된다. 구동기의 이러한 수직 변위는 광 픽업 헤드의 초점 조절이나 광학 스위치와 같은 광통신 시스템에 적용될 수 있다. 앞으로 구동기의 구조를 개선하여 보다 효율적으로 광학 소자에 이용될 수 있는 마이크로 구동기를 제작할 예정이다.

본 연구는 정보통신부가 지원하는 1999년도 정보통신 우수 시범학교 지원사업의 연구과제 '차세대 통신 기반기술 연구'의 연구비 지원으로 이루어진 결과이며, 지원에 감사합니다.

(참 고 문 헌)

- [1] D. Miyauchi, H. Toshiyoshi, H. Fujita, "Optical cross-connect switch by silicon micromachining," *MOEMS 97*, pp.253-258, 1997
- [2] R. A. Conant, P.M. Hagelin, U. Krishanmoorthy and O. Solgaard, Kam, Y. Lau, R. Muller, "A raster scanning Full motion vide display using polysilicon micromachied mirrors," *Transducers 99*, 1999
- [3] K. Hiller, M. Wiemer, R. Hahn, C. Kaufmann, S. Kurth, K. Kehr, T. Gessner, W. Dotzel, "Fabrication of high frequency microscanners by using low temperature silicon wafer bonding," *Transducers 99*, 1999
- [4] D. Dickensheets, G. S. Kino, "Silicon micromachined scanning confocal optical microscope," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 7, No. 1, 1998
- [5] E. H. Yang, S. S. Yang, S. H. Yoo, "A Technique for Quantitative Determination of the Profile of the Residual Stress along the Depth of p+ Silicon Films," *Applied Physics Letters*, Vol. 67, No. 7, pp. 912-914, 1995.
- [6] E. H. Yang, S. S. Yang, "The Quantitative Determination of the Residual Stress Profile in Oxidized p+ Silicon Films," *Sensors and Actuators A*, Vol. 54, pp. 684-689, 1996.
- [7] O. C. Jeong, T. G. Park and S. S. Yang, "The effect of the Drive-in Process Parameters on the residual stress Profile of the p+ silicon thin film," *Transactions of KIEE*, Vol. 48C, No. 9, pp. 665-671, 1999.