

# $p^+$ Si 외팔보 구조를 이용한 광학 소자용 마이크로 구동기의 제작

論 文  
50C-5-9

## Fabrication of a Micro Actuator with $p^+$ Si Cantilevers for Optical Devices

朴 泰 奎\* · 梁 翔 植\*\*  
(Tae Gyu Park · Sang Sik Yang)

**Abstract** - The paper represents the design and fabrication of an electrostatic micro actuator with  $p^+$  Si cantilevers. The micro actuator consists of a plate suspended by four  $p^+$  silicon cantilevers and an electrode on a glass substrate. The  $p^+$  Si structure is fabricated by the boron diffusion process and the anisotropic wet etch process. The cantilevers of the micro actuator curl down because of the residual stress gradient in  $p^+$  silicon. When the electrostatic force is applied to the  $p^+$  cantilevers, the vertical displacement of the plate can be achieved. The deflection of the cantilever due to the residual stress gradient and the vertical displacement by electrostatic force were calculated. The displacement of the plate was measured with a laser displacement meter for various input voltages and frequencies. The feasibility of the proposed micro actuator for the applications to optical pickup devices or optical communication devices was confirmed by the experiments.

**Key Words** : electrostatic micro actuator,  $p^+$  silicon, cantilever, boron diffusion

### 1. 서 론

최근 마이크로머시닝 기술의 발달과 함께 기존의 센서 및 기계소자의 소형화가 가능해지고 이에 따른 대량생산, 원가절감 및 신뢰도 향상 등으로 마이크로시스템으로의 응용 분야가 넓어지고 있다. 상업화의 요구가 커지고 있는 응용 분야 중 하나가 광학 스위치, 광 픽업, 스캐너, 홀로그래프 등의 광학 시스템이다. 이들 광학용 마이크로 소자 중 대표적인 것으로는 광학 스위칭 소자나 스캐너에 사용되는 마이크로미러와 마이크로 구동기 등을 들 수 있다. Miyauchi 등은 광통신을 위해 광경로를 스위칭할 수 있도록 폴리실리콘을 이용한 마이크로미러를 어레이 형태로 제작하였다[1]. 이 마이크로미러는 정전 방식으로 구동하므로 수 백 볼트의 높은 인가 전압이 필요하여, 실제 응용에는 제약이 있다. 또한, 표면물체 가공기술을 이용한 미러 어레이 제작에 관한 연구를 Conant 등이 진행하였다[2]. 이 미러 어레이의 경우, 다층 폴리실리콘을 이용한 공정을 수행하여야 하므로 공정이 복잡하다. 그 외에도 Hiller 등과 Dickensheets 등이 제작한 정전력을 이용한 비틀림 거울은 인가전압에 비해 미러의 구동각이 작다는 단점이 있다[3,4].

본 논문에서는 광통신 소자에 응용될 수 있는 새로운 구조의 마이크로 구동기를 제안한다. 이 구동기는 기존의 빔살

형 혹은 평판형 정전 구동기와는 달리 잔류 응력 구배로 인해 휘어진  $p^+$  실리콘 외팔보에 정전력을 가하여 큰 변위를 얻을 수 있도록 고안되어 있고 제작 공정이 간단하며, 고전압을 필요로 하지 않는다. 본 논문에서는 마이크로 구동기를 제작하고 그 동작 특성을 시험하여 광학 소자의 구동에 적용 가능성을 보이고자 한다.

### 2. 정전형 마이크로 구동기의 구조

그림 1은 마이크로 구동기의 구조를 나타낸다. 실리콘 기판의 중앙에 있는 평판은 변형이 없도록 충분히 두껍고, 연결된 네 개의 빔이 이 평판을 지지한다. 네 개의 빔은 붕소가 고농도로 도핑된 실리콘층으로서 잔류 응력 구배로 인해 굽어져 있다.  $p^+$  Si 빔에 대면하는 전극은 유리 기판에 있다. 빔과 대면 전극 사이에 전압을 인가하면 정전력에 의해 빔이 유리 기판 쪽으로 당겨지고, 네 빔의 끝단에 연결된 평판도 기판 쪽으로 움직인다. 전압 인가시 단락 방지를 위해 절연층이 대면 전극을 보호한다. 빔의 고정단 쪽에서는 대면 전극과 빔 사이의 간극이 절연층의 두께에 해당하므로 낮은 인가전압으로도 빔이 구동될 수 있다. 만일, 평판에 렌즈와 같은 광학 소자를 집적한다면 그림 1(b)와 같이 초점 조절이 가능하여 광 픽업에 응용할 수 있다.

### 3. 구동기의 변위 해석

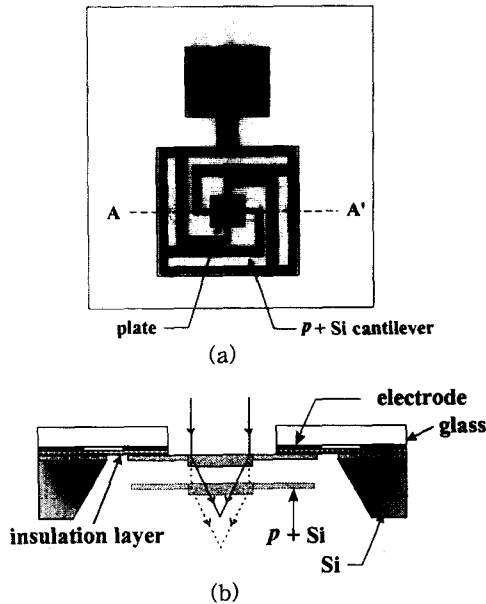
외팔보 내에 잔류 응력이 존재할 경우 외팔보는 처지게 된다. 잔류 응력 분포를 알면 외팔보의 수직 변위를 계산할 수 있다. 본 논문에서는 박막내의 잔류 응력은 표면에 수직

\* 準 會 員 : 亞 洲 大 電 子 工 學 部 碩 · 博 士 統 合 課 程

\*\* 正 會 員 : 亞 洲 大 電 子 工 學 部 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2001年 3月 8日

最 終 完 了 : 2001年 4月 10日



(a) Si 기판 평면도 (b) 조립후 A-A' 단면도

그림 1. 마이크로 구동기의 구조

Fig. 1 The structure of a micro actuator

인 방향으로는 변화하고, 평행한 방향으로는 일정하다고 가정한다. 외팔보의 폭과 두께가 각각  $b$ 와  $h$ 일 때, 빔의 길이 방향 위치  $x$ 에서의 수직 변위  $v_r(x)$ 는 외팔보에 작용하는 굽힘 모멘트  $M_b$ 로부터 구해지고, 이것은 잔류 응력 분포를 나타내는 다항식을 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$v_r(x) = \frac{6x^2}{Ebh^2} M_b = -\frac{x^2}{E} \left\{ \frac{1}{2} a_1 + \frac{3}{40} h^2 a_3 + \dots \right\} \quad (1)$$

여기서,  $E$ 는 탄성계수이고, 다항식의 계수  $a_1$ 과  $a_3$ 은 붕소 도핑 조건에 따라 정해지며 참고문헌[7]에서 제안한 방법으로 계산한다.

외팔보의 잔류 응력이 없고 분포하중  $p$ 가 빔의 전체에 작용할 때, 길이가  $L$ 인 외팔보의 수직 변위  $v_e(x)$ 는 식 (2)와 같다.

$$v_e(x) = \frac{px^2}{2Eh^3} (x^2 - 4Lx + 6L^2) \quad (2)$$

여기서,  $p$ 는 단위면적당 정전력으로서 빔이 절연층에 밀착되었다고 가정하면 식 (3)과 같이 주어진다.

$$p = \epsilon \frac{V^2}{2d^2} \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon$ 과  $d$ 는 각각 절연층의 유전상수와 두께이고,  $V$ 는 인가전압이다. 빔의 두께가  $7 \mu\text{m}$ 이고 길이가  $2 \text{ mm}$ 이고 절연층 두께가  $1 \mu\text{m}$ 일 때 여러 인가전압에 대하여 식 (1)-(3)을 이용하여 외팔보의 중첩된 수직변위  $v_r(x) + v_e(x)$ 를 구하면 그림 2와 같다. 이때, 계산에 사용된  $E$ 와  $\epsilon$ 는 각각  $125 \text{ GPa}$ 와  $8.854 \times 10^{-12} \text{ N/m}$ 이다. 그림 2의 실선은 잔류 응력 만에 의한 외팔보의 변위를 나타내고, 점선들은 균일한 정전력이 외팔보 전체에 작용한다고 가정했을 때 잔류 응력에 의

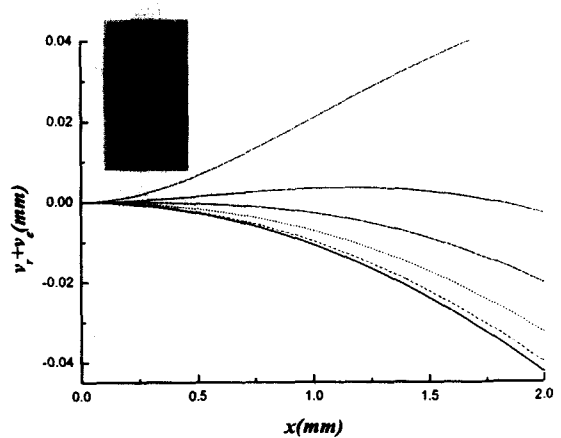


그림 2. 외팔보의 중첩된 수직 변위,  $v_r + v_e$

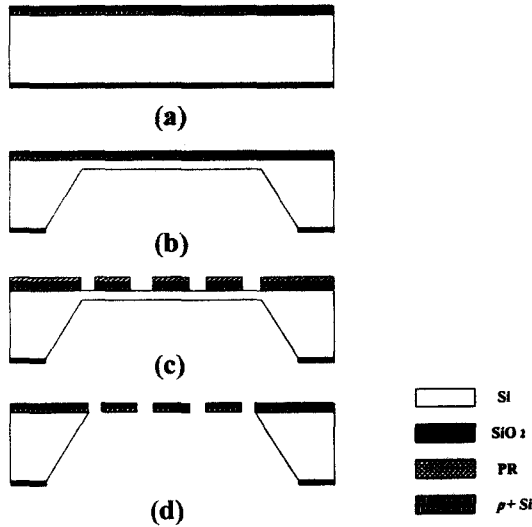
Fig. 2 The superposed vertical deflection of the cantilever

한 변위와 정전력에 의한 변위를 중첩한 결과를 나타낸다. 그림 2에서 인가전압이  $4\text{V}$  이상이면 정전력이 충분히 커서 빔이 대면전극쪽으로 완전히 밀창된다고 볼 수 있으며, 이 때 식 (3)과 같은 분포하중이 빔 전체에 작용한다고 가정한 것이 적절하다. 그러나, 인가전압이  $3\text{V}$  이하이면 빔이 완전히 밀착하지 않으므로, 분포하중이 빔의 일부에만 작용하게 되어 실제로는 변위가 더 아래쪽으로 치저 있게 된다. 이 해석 결과에 의하면 수 볼트 정도의 낮은 인가 전압으로도 평판의 구동 및 위치 제어가 가능하다.

#### 4. 구동기의 제작 공정

본 실험에서는 비저항이  $10 \sim 20 \Omega\text{cm}$ 이고 두께가  $525 \pm 10 \mu\text{m}$ 인 4 inch  $n$ 형 (100) 실리콘 웨이퍼를 사용한다. 그림 3은 정전형 마이크로 구동기의 제작 공정도이다. 그림 3(a)와 같이 약  $0.6 \mu\text{m}$  두께의 열산화막을 습식 산화로 성장시킨 다음, 붕소 도핑할 앞면의 산화막을 BOE(Buffered Oxide Etchant)로 제거한다. 산화막을 제거한 후 붕소도핑을 수행한다. 붕소의 도핑은 고체 확산원 BN 1100을 이용하여  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 720 분 동안 선행산(pre-deposition)을 수행하고, HF-LTO-HF 공정으로 BSG를 제거한다.  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 90분 동안 습식 산화로 후확산 공정(drive-in)을 수행한다.

그림 3(b)와 같이 웨이퍼 뒷면에 식각창을 형성한 후, TMAH를 이용하여 실리콘을 300분동안 식각한다. 이 때, 식각률은 약  $1 \mu\text{m}/\text{min}$ 이다. 그림 3(c)와 같이 웨이퍼의 앞면에  $p+$  구조물을 형성하기 위하여 MA-6 양면 정렬기를 이용하여 사진 공정을 행한 후, BOE를 이용하여 산화막을 제거하고, 등방성 식각액( $\text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{HF} = 85 : 15 : 5$ )을 이용하여 선택적으로  $p+$  층을 제거한다. 이 때, 시편에 마이크로 구동기의 패턴이 완성된다. 남아 있는 실리콘을 EPW(Ethylendiamine : Pyrocatechol : DI Water =  $250 \text{ ml} : 40 \text{ g} : 80 \text{ ml}$ ) 수용액을 이용하여  $115 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 그림 3(d)와 같이 식각한다. 구조물의 보호를 위해  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 낮은 온도에서 식각액을 낮춰서 식각한다. 식각 완료 후 BOE ( $\text{NH}_4\text{F} : \text{HF} = 6 : 1$ ) 용액으로 앞면에 남아 있는 산화막을



(a) pre-deposition and drive-in (Boron)  
 (b) backside Si etch  
 (c) p+ Si layer removal  
 (d) residual Si etch

그림 3. 정전형 마이크로 구동기의 제작 공정도  
 Fig. 3 Fabrication process of the electrostatic micro actuator

제거하여 p+ 외팔보를 이용한 정전형 마이크로 구동기를 완성한다. 파이렉스 유리에 전극을 제작하기 위하여 Cr/Au 층을 증착하고, PR 마스크를 이용하여 습식식각을 수행하여 전극을 제작한다. 제작된 전극 위에 PECVD 질화막을 1 μm 두께로 증착한다. CF<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, Ar 가스를 이용한 RIE로 전선과 연결할 부분의 질화막을 식각한다. 이 때 RIE 마스크로는 PR을 사용한다. 제작된 실리콘 웨이퍼와 고정 전극이 형성된 파이렉스 유리를 맞대고 에폭시를 이용하여 가장자리를 접합함으로써 정전형 마이크로 구동기의 제작을 완료한다.

그림 4는 붕소 도핑 분포를 ASR 장비를 이용하여 측정된 결과이다. p+ Si의 붕소 농도가 5×10<sup>19</sup>/cm<sup>3</sup> 이상에서 식각률이 현저하게 줄어들게 되므로 이 농도에 해당하는 점이 식각 정지점이다. 그림 4에 의해 구동기의 두께는 4~5μm로 예측할 수 있다.

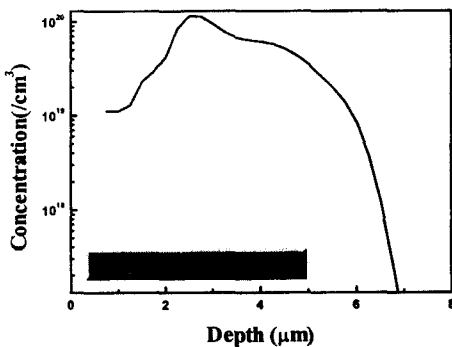


그림 4. ASR 붕소 농도 분포의 측정 결과  
 Fig. 4 Boron Concentration measured with ASR

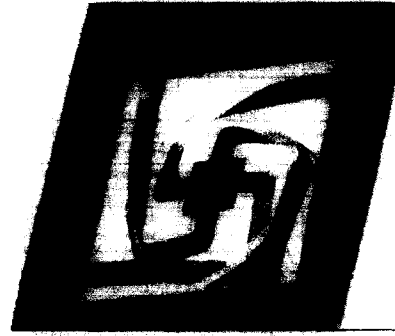


그림 5. 제작된 마이크로 구동기  
 Fig. 5 The fabricated micro actuator

그림 5는 제작된 마이크로 구동기의 사진들이다. 구동기는 길이가 2 mm 인 외팔보에 1 mm×1 mm 인 평판으로 이루어진다.

### 5. 구동기의 특성 시험 결과

그림 6은 구동기의 특성 시험 장치도이다. 함수 발생기 (HP33120A)와 증폭기(Piezo Amplifier EPA102)로 정현파와 정현파의 진폭에 해당하는 전압을 중첩하여 인가될 전압을 발생시키고 주파수를 조절한다. 전압을 인가하면, 외팔보가 정전력에 의해 상하로 진동하고 이에 의해 평판이 구동된다. 이 때, 레이저 변위계(KEYENCE LC-2420)를 이용하여 평판의 변위를 측정한다. 그림 7은 40V<sub>p-p</sub>의 정현파 전압을 주파수를 변화시키며 인가할 때, 레이저 변위계의 출력 전압을 나타낸다. 출력 전압은 평판의 수직 변위를 나타낸다. 변위와 출력 전압의 비는 10 μm/V이다. 주파수가 증가함에 따라 특정 주파수 이상에서 진폭이 작아진다. 그림 8은 정현파 전압을 각각 5V<sub>p-p</sub>, 10V<sub>p-p</sub>, 20V<sub>p-p</sub>, 40V<sub>p-p</sub>로 인가하였을 때, 인가 주파수에 따른 평판의 침투-침투치 수직 변위를 나타낸다. 10V<sub>p-p</sub>의 정현파 전압을 인가할 때 10 Hz에서 10 μm 정도의 변위를 얻었다. 구동 시험에서 공진 현상은 나타나지 않았으며, 마이크로 구동기는 약 1kHz의 대역폭을 갖는다. 해석 결과는 단순히 외팔보만의 결과이지만, 실제 구동 실험 시에는 네 개의 외팔보에 연결된 평판의 변위를 측정하므로, 해석보다는 높은 전압에서 적은 변위로 구동하였다.

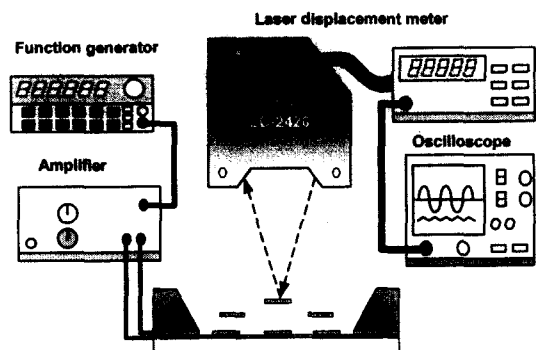


그림 6. 구동 시험 장치도  
 Fig. 6 Performance test set-up

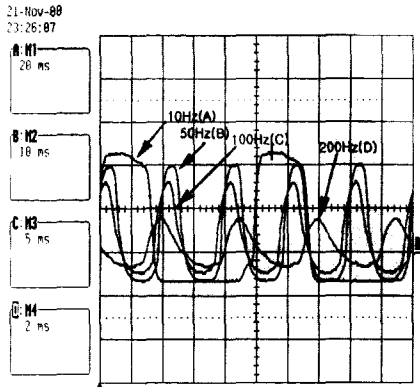


그림 7. 주파수에 따른 레이저 변위계 출력 파형  
Fig. 7 The output of the laser displacementmeter

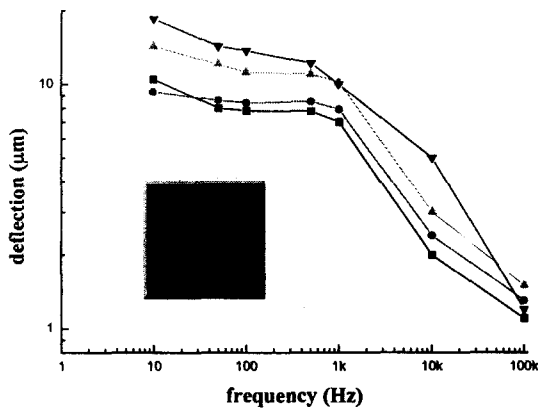


그림 8. 주파수에 따른 구동기의 변위 특성  
Fig. 8 The peak-to-peak deflection vs. frequency

### 6. 결 론

본 논문에서는 광통신 소자에 적용가능한 정전형 마이크로 구동기를 제작하였다. 구동기는 4개의 외팔보와 보에 연결된 평판으로 이루어진다. 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.

#### 감사의 글

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 micromaching," *MOEMS 97*, pp.253-258, 1997
- [2] R. A. Conant, P.M. Hagelin, U. Krishnamoorthy and O. Solgaard, Kam. Y. Lau, R. Muller, "A raster scanning Full motion video 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.

### 저 자 소 개



#### 박태규 (朴泰奎)

1975년 6월 5일 생. 1998년 아주대 제어계측공학과 졸업. 현재 동 대학원 석·박사 통합과정. 주관심 분야 : 정전형 마이크로 구동기의 설계 및 제작, p+ 박막의 특성해석, 마이크로 펌프의 설계 및 제작  
Tel : 031-219-2488, Fax : 031-212-9531  
E-mail : jackptg@madang.ajou.ac.kr



#### 양상식 (梁翔植)

1958년 1월 16일 생. 1980년 서울대 공대 기계공학과 졸업. 1983년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1988년 U. C. Berkeley 졸업(공학박). New jersey Institute of Technology 연구 조교수. 현재 아주대 공대 전자공학부 교수. 주관심분야 : 마이크로 소자의 Mechanism과 Actuation, Motion Control과 Nonlinear Control  
Tel : 031-219-2481, Fax : 031-212-9531  
E-mail : ssyang@madang.ajou.ac.kr