

## Latch-up 특성을 갖는 평면형의 열구동 마이크로 액츄에이터

이종현\*, 권호남, 전진철, 이선규 (광주과학기술원 기전공학과),  
이명래, 장원익, 최창억, 김윤태 (한국전자통신연구원 원천기술연구본부)

### A thermoelastic microactuator with planar latch-up operation

Jong Hyun Lee\*, Ho Nam Kwon, Jin Chul Jun, Sun Kyu Lee (Dept. of Mechatronics, KJIST)

Myung Lae Lee, Won Ick Jang, Chang Auck Choi, and Youn Tae Kim (Telecom. Basic Research Lab., ETRI)

#### ABSTRACT

We designed and fabricated a planar-type thermoelastic microactuator with a latch-up operation for optical switching. Latch-up actuation is prerequisite to implement an optical switch with low power consumption and high reliability. The proposed microactuator consists of four cantilever-shaped thermal actuators, four displacement linkages, two shallow arch-shaped leaf springs, a mobile shuttle mass with a micromirror, and four elastic boundaries. The structural layer of the planar microactuator is phosphorous-doped 12  $\mu\text{m}$ -thick polysilicon, and the sacrificial layer is LTO (Low Temperature Oxide) of 3  $\mu\text{m}$  thickness. The displacement of actuator is as large as 3  $\mu\text{m}$  when the length of actuation bar is 100  $\mu\text{m}$  in length at 5V input voltage. The proposed microactuators have advantages of easy assembly with other optical component by way of fiber alignment in the substrate plane, and its fabrication process features simplicity while retaining batch-fabrication economy.

**Key Words** · Microactuator (마이크로 액츄에이터), Thermoelastic (열탄성), Latch-up (래치업), Surface micromachining (표면 미세가공), Optical switch (광스위치)

#### 1. 서론

WDM (Wavelength Division Multiplexer) 광통신의 필요성 증대에 따라 통신망의 효율적인 운영을 위한 광스위치 (optical switch) 기술의 중요성이 부각되고 있다. 여기에 쓰이는 기존의 기계적 광스위치는 제형성 및 크기에 약점이 있는 반면에, 마이크로 머시닝 (micromachining)에 의한 광스위치는 초소형 미러 (micromirror)의 구동을 통한 매트릭스 (matrix)형의 대용량 광스위칭이 가능하다는 장점이 있다.<sup>1,2</sup> 또한 낮은 소비 전력 및 높은 안정성의 광스위치를 제작하기 위해서는 래치업 (latch-up) 특성을 갖도록 설계하는 것이 바람직하다.

이를 위하여 캔틸레버의 좌굴 (buckling)을 이용한 래치업 특성 및 이를 이용한 전기 스위치에 대하여 연구한 적이 있으나<sup>3,4,5</sup>, 구동방향이 웨이퍼 면과 수직이어서 광화이버 (optical fiber)의 정렬이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이와는 달리 본 연

구에서 제안한 arch 형 광스프링 (leaf spring)의 좌굴 (buckling) 특성을 이용한 광스위치는 구동 방향이 웨이퍼 면과 평행이므로 광화이버의 정렬이 용이할 뿐만 아니라, 제작 과정도 상대적으로 단순하다는 특징을 가지고 있다.<sup>6</sup>

본 논문에서 제안된 마이크로 액츄에이터의 좌굴에 필요한 구동력은 상대적으로 큰 힘을 요구하기 때문에 열탄성 (thermo-elastic)을 이용한 마이크로 액츄에이터를 사용하였다. 또한 액츄에이터의 구동 특성 및 적합성 확인을 위하여 폴리실리콘 표면 마이크로 머시닝 (surface micromachining)으로 시제품 (prototype)을 제작하였으며, 이에 대한 실험을 통하여 buckling mode를 확인하였다. 열구동 액츄에이터의 구성 요소에 있어서는 힌지 (hinge)가 액츄에이터의 성능에 가장 중요한 영향을 미치므로, 정확한 설계 및 해석을 위하여 ANSYS를 이용한 온도 분포, 변형 범위 및 응력 해석을 수행하였다.

## 2. 열구동 마이크로 액츄에이터의 구조

열구동을 이용한 액츄에이터의 전체적인 구조는 Fig. 1 에 나타나 있다. 이 구조는 1 개의 힌지 (hinge)를 이용하는 경우로서, 구동 bar 는 힌지의 중간에 연직으로 연결되어 있다. Fig. 2 에는 2 개의 힌지가 사용된 구조를 나타내었으며, amplification bar 가 힌지 bar 의 한쪽 끝에 수직으로 연결되어 있음을 알 수 있다

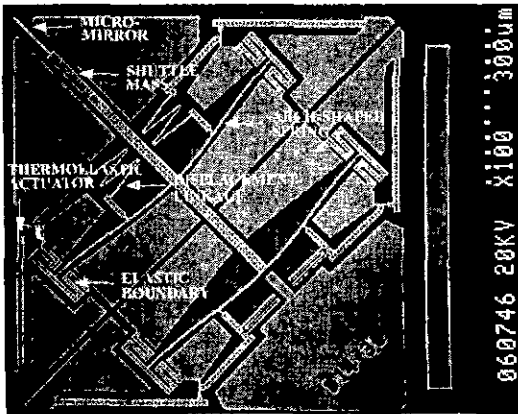


Fig. 1 Overall SEM image of a fabricated thermoelastic microactuator with shallow arch-shaped leaf springs (thickness of polysilicon:  $12\ \mu\text{m}$ , length of clamped hinge:  $14\ \mu\text{m}$ , initial rise:  $30\ \mu\text{m}$ ).

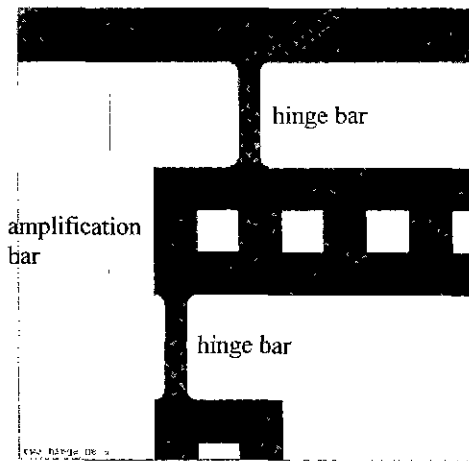


Fig. 2 Schematic of a thermoelastic actuator utilizing 2 hinges in opposite directions.

## 3. Arch 형 판스프링의 좌굴 모드

본 연구에서 사용된 판스프링은 Fig. 3 과 같이 얇은 arch 형태의 빔으로서 2 부분에 집중하중  $F$  가 인가되는 경우이다. 판스프링의 폭, 두께, 길이, 초기 높이 (initial rise)를 각각  $w, t, l, h$  라 할 때, clamped 경계조건을 만족하는 초기 빔의 형상  $v_0(x)$  는 식 (1)로 표현된다

$$v_0(x) = h \sin^2\left[\frac{\pi x}{l}\right], \quad 0 < x < l \quad (1)$$

좌굴 특성을 이용하는 액츄에이터에서는 임계부하  $F_c$ 를 낮추는 것이 매우 중요하다. Fig. 4 에 나타난 3 차 모드의 임계 부하는 1 차 모드보다 작을 것이며, 가장 작은 구동력은 2 차 모드에서 가능할 것으로 예측된다. 좌굴력을 낮추기 위한 다른 방법으로는 arch 형 판스프링의 양끝에 탄성 경계를 생각할 수 있다. 이상과 같은 arch 형 판스프링의 좌굴 거동은 최종적으로 왕복체 (shuttle mass)의 끝에 연직으로 부착된 마이크로 미러의 왕복운동을 통하여 광신호의 ON-OFF 동작으로 연결된다.

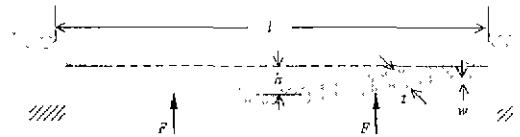


Fig. 3 Geometry of a shallow arch-shaped leaf spring with clamped ends

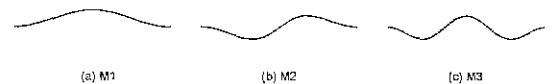


Fig. 4 Buckling mode shapes of shallow arch-shaped leaf spring. (a) 1<sup>st</sup> mode, (b) 2<sup>nd</sup> mode, and (c) 3<sup>rd</sup> mode.

## 4. 마이크로 액츄에이터의 제작

열탄성 마이크로 액츄에이터의 제작 과정은 Fig. 5 에 보인 바와 같이 폴리실리콘을 구조체로 사용한 표면 마이크로머시닝 (surface micro machining)을 사용하였다. 두께  $3\ \mu\text{m}$  의 LTO 가 희생층으로 증착이 되었으며, 대칭적 다층 구조를 갖는 두께  $12\ \mu\text{m}$  의 폴리실리콘이 구조층을 형성하고 있다. 식각 마스크로는 두께  $12\ \mu\text{m}$  의

LTO 가 사용되었다 구조물 pattern 은 포토마스크로부터 마스크 산화막으로, 그리고 연속적인 RIE 공정에 의해 폴리실리콘으로 전사된다. 인(P)이 도핑된 폴리실리콘의 잔류응력 (residual stress)은 1000 °C 에서 1 시간 동안의 어닐링 (annealing) 공정으로 최소화되며, 이때 불순물의 활성화 공정도 동시에 수행된다. 마지막으로, 희생층 제거시 표면장력 등에 의하여 미소구조물이 바닥면에 달라붙지 않도록 하기 위해 무수 HP GPE(Gas Phase Etching) 공정을 사용하였다<sup>7,8</sup>.

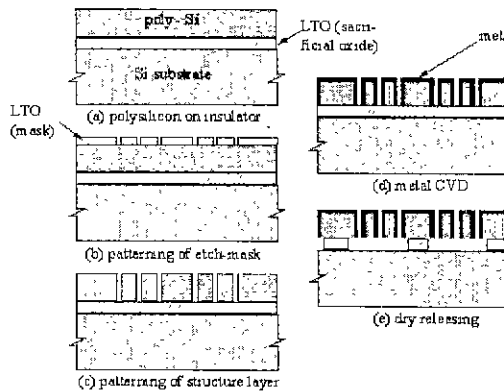


Fig. 5 Fabrication sequence of the thermoelastic micro-actuator with shallow arch-shaped leaf spring.

Fig. 6 은 폴리실리콘으로 제작된 열탄성 마이크로 액츄에이터의 전자현미경 사진을 보여준다 그림에서 두께 12 μm 의 폴리실리콘층이 충분히 평탄하게 가공되어 있으므로, 그 수직면은 광스위처용 마이크로 액츄에이터로 사용될 수 있다.

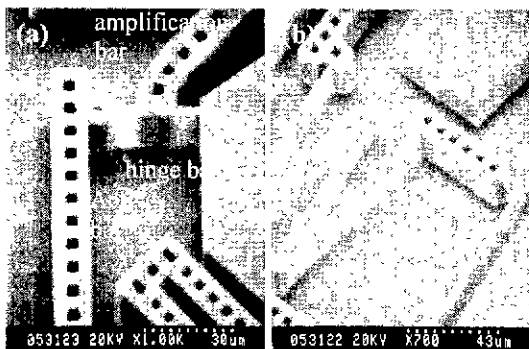


Fig. 6 Detailed SEM image of the fabricated polysilicon thermoelastic microactuator, (a) a clamped hinge of thermoelastic actuator, and (b) a double-folded spring and rotational hinge of displacement linkage

## 5. FEM 에 의한 특성 해석

부가되는 전압에 따른 구조물의 온도분포 및 열변형, 응력을 해석하기 위하여 ANSYS 를 사용하여 FEM 해석을 수행하였다. ANSYS 에는 구조물에 인가되는 전위차로 인한 온도분포 및 열변형을 동시에 해석할 수 있는 연성영역 해석(Coupled-field analysis) 방법을 이용하였다 3-D coupled-field solid (Solid 5)를 사용하여 모델링 하였으며, Table. 1 에 사용된 Si 및 SiO<sub>2</sub> 의 물성치를 나타내었다

Table 1 Material properties of Si and SiO<sub>2</sub>

	Si	SiO <sub>2</sub>
Elastic modulus (GPa)	160	73
Poisson ratio	0.22	0.17
Thermal expansion coeff. (10 <sup>-6</sup> )	2.6	0.55
Thermal conductivity (W/m K)	157	1.4
Electrical resistivity (Ω m)	0.52x10 <sup>-4</sup>	0.1x10 <sup>-10</sup>

로딩 (loading)조건으로는 힌지의 양쪽 끝에 있는 앵커 (anchor)의 상단면에 5V 의 전위차를 가하며, 하단면은 TEC (Thermoelectric Cooler)를 사용하여 24°C 로 일정하게 냉각시킨다. 해석을 수행한 결과, 온도분포를 Fig 7 에 보였으며, 앵커 부분에 대한 열전도의 영향으로 힌지 아래쪽, 즉 구조물의 중간경도에서 최대 436°C 의 온도 상승이 발생하며, 이로 인해 구동 bar 의 끝에서 최대 3μm 정도의 변위가 발생함을 알 수 있다 또한 Fig. 8 에 보인 응력해석 결과로부터 원으로 표시된 힌지의 바깥 부분에 최대응력 646MPa 이 발생하였으며, 이는 실리콘의 항복 응력 (yield strength)인 7GPa 의 1/10 이하에 불과한 수치에 해당된다.

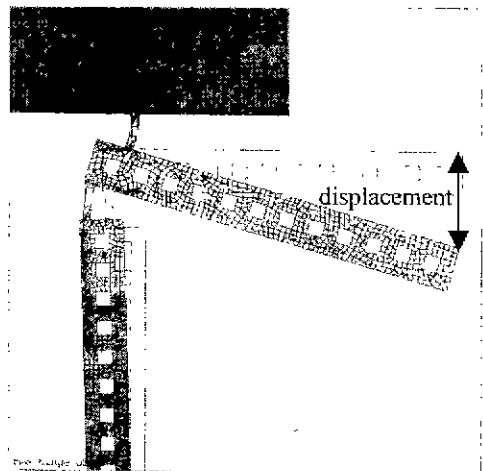


Fig 7 Temperature distribution and thermal deformation.

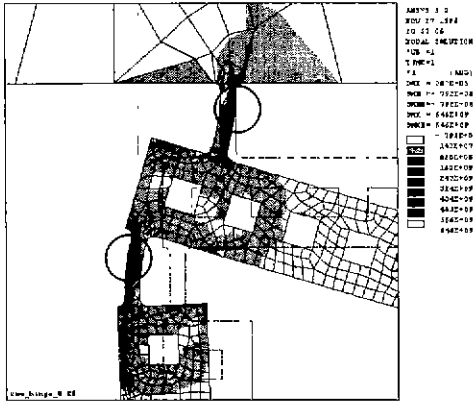


Fig 8 Distribution of principle stress in micro hinges.

## 6. 좌굴 모드 실험

액츄에이터에 사용된 arch 형 판스프링의 좌굴 현상을 분석하기 위하여 shuttle mass 를 tip 으로 구동하였다. Fig. 9 에 보인 바와 같이, 좌굴은 3<sup>rd</sup> mode 로 거동함을 확인하였으며, 안정된 latch-up 을 위해서는 displacement linkage 의 복원력을 고려해야 함을 알 수 있었다.

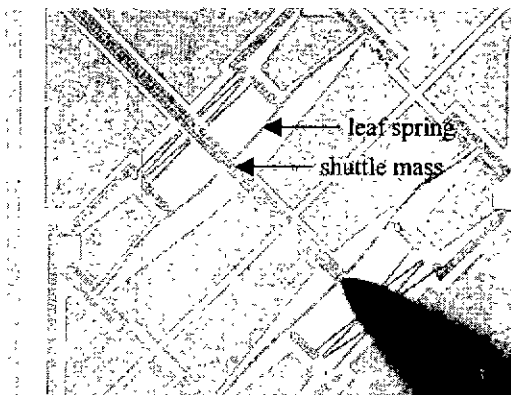


Fig. 9 SEM image showing the buckling mode of two shallow arch-shaped leaf springs.

## 7. 결론

WDM 광통신의 필요성 증대에 따라 통신망의 효율적인 운영을 위한 광스위치 (optical switch) 기술의 중요성이 부각되고 있다. 본 연구에서는 이를 위한 낮은 소비전력 및 높은 안정성을 가진 래치업 특성의 광스위치를 설계하고 제작하였다. 제안된

마이크로 액츄에이터는 열탄성으로 구동되며, 4 개의 변위 확대기, 2 개의 얇은 arch 형 판스프링, 1 개의 운동체, 그리고 4 개의 탄성 경계조건으로 구성 되어 있다. 광스위치 구조체는 12  $\mu\text{m}$  두께의 폴리 실리콘으로 되어 있으며, 회생층은 3  $\mu\text{m}$  의 저온 산화막을 사용하였다. 변위는 5V 구동과 100  $\mu\text{m}$  길이의 구동 bar 를 사용할 때 3  $\mu\text{m}$  정도로 나타났으며, 변위를 확장하기 위해서는 힌지의 최적화와 구동 bar 를 길게 하는 방법이 가능하다 본 연구의 래치업 광스위치는 웨이퍼면과 나란하게 설계되어 있어 기존 방법에 비하여 광 화이버의 정렬이 유리하다는 것과 함께 제작이 매우 용이하다는 장점이 있다

## 후 기

본 연구는 교육부 BK21 사업의 지원을 받아 수행되었음을 밝힙니다.

## 참고문헌

- [1] L. Y. Lin, E. L. Goldstein, and R. W. Tkach. "Free-space micromachined optical switches for optical switching." *IEEE J. Selected Topics Quantum Electronics*, 5(1), pp. 4-9 (1999)
- [2] W. H. Juan, and S. W. Pang. "High aspect ratio Si vertical micromirror arrays for optical switching," *IEEE/ASME J. of MEMS (Microelectromechanical Systems)* 7(2), pp. 207-213 (1998)
- [3] G. J. Smitzes, *An Introduction to the Elastic stability of structures*, 4th edition, Prentice-Hall, chap. 7, pp. 171-215 (1976)
- [4] W. Fang, J. Wickert. "Post-buckling of micromachined beams," *IEEE Workshop on MEMS (Microelectromechanical Systems)*, pp. 182-187 (1994)
- [5] H. Matoba et al., "A Bi-stable snapping microactuator," *IEEE Workshop on MEMS (Microelectromechanical Systems)*, Oiso Japan, pp. 45-50 (1994)
- [6] J. H. Lee, M. L. Lee, W. I. Jang, C. A. Choi, and Y. T. Kim, "A planar latch-up microactuator driven by thermoelastic force," *Proc. SPIE*, vol. 4176, *Micromachined Devices and Components V*, Santa Clara, California, pp. 264-271 (Sept 18, 2000)
- [7] R. Legtenberg, J. Elders, and M. Elwenspoek, "Stiction of surface micromachined structures after rinsing and drying model and investigation of adhesion mechanisms," *Int Conf on Solid-State Sensors and Actuators*, pp.198-201 (1993)
- [8] J. H. Lee, W. I. Jang, C. S. Lee, Y. I. Lee, C. A. Choi, J. T. Baek, and H. J. Yoo. "Characterization of anhydrous HF gas-phase etching with CH<sub>3</sub>OH for sacrificial oxide removal," *Sensors & Actuators*, A64, pp. 27-32 (1998)