

로렌츠 힘을 이용한 평면구동형 마이크로 광스위치

고종수[#], 한정삼^{*}

A Laterally Driven Electromagnetic Microoptical Switch Using Lorentz force

Jong Soo Ko[#] and Jeong Sam Han^{*}

ABSTRACT

A laterally driven electromagnetic microactuator (LaDEM) is presented, and a micro-optical switch is designed and fabricated as a possible application. LaDEM provides parallel actuation of the microactuator to the silicon substrate surface (in-plane mode) by the Lorentz force. Poly-silicon-on-insulator (Poly-SOI) wafers and a reactive ion etching (RIE) process were used to fabricate high-aspect-ratio vertical microstructures, which allowed the equipment of a vertical micro mirror. A fabricated arch-shaped leaf spring has a thickness of 1.8 μm , width of 16 μm , and length of 800 μm . The resistance of the fabricated structure for the optical switch was approximately 5 Ω . The deflection of the leaf springs increases linearly up to about 400 mA and then it demonstrates a buckling behavior around the current value. Owing to this nonlinear phenomenon, a large displacement of 60 μm could be measured at 566 mA. The displacement-load relation and some dynamic characteristics are analyzed using the finite element simulations.

Key Words : MEMS(미세기전시스템), Electromagnetic(전자기형), Actuator(액츄에이터), Lorentz Force(로렌츠 힘), Optical Switch(광 스위치), Finite Element Simulation(유한요소해석)

1. 서 론

마이크로미터 단위의 매우 소형화된 센서나 액츄에이터에 대한 실질적인 연구는 미세기전시스템(MEMS) 기술의 등장에 힘입은 바가 크다. 최근 들어 이 기술로 제작된 다양한 상용 제품들의 출시와 이에 따른 급속한 시장의 팽창에 따라, 이 기술은 새로운 산업을 창출할 수 있는 핵심기술로 인식되고 있다. 특히 실리콘을 기반으로 한 미세기전시스템 기술을 이용하여 센서 또는 액츄에이터를 집적회로와 동시에 제작한, 이른바 집적화된 미세

기전시스템의 출현이 가능하게 되었다.

마이크로시스템에서의 액츄에이터는 큰 힘과 큰 구동변위 그리고 빠른 응답속도를 가질수록 유리하다. 그동안 미소 액츄에이터의 구동을 위하여 정전기형^{1, 2} 열형^{3, 4} 압전형⁵⁻⁷ 등 여러가지 구동방식이 시도되었지만, 이들은 앞에서 언급한 세가지 요구사항을 모두 만족시키기에는 미흡한 점이 있었다. 이에 비하여, 전자기형은 위의 세가지 사항을 두루 만족시킬 수 있는 구동방식으로 판단된다. 하지만 현재까지 발표된 전자기형 마이크로 액츄에이터는 구동체 위에 자성재료가 판 형태로

^{***} 접수일: 2005년 3월 16일; 게재승인일: 2005년 8월 9일

[#] 교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail mems@pusan.ac.kr, Tel: (051) 510-2488

^{*} 안동대학교 기계공학부

증착되어 있거나 코일이 구동체의 외부에 감겨있는 형태로써, 제작공정이 복잡하고 충분한 전자장을 발생하기가 어려웠다.⁸⁻¹¹ 그 뿐만 아니라, 코일을 가미한 기존의 전자기형 액츄에이터는 구동 원리상 구동체의 운동방향이 기판에 수직인 방향으로 한정되어 있었다.^{12, 13}

본 논문에서는 평면구동이 가능한 전자기형 마이크로 액츄에이터(LaDEM)를 이용하여 제작한 광스위치(optical switch)의 기본구동 특성 이해와 유한요소해석을 통한 하중-변위 관계 및 동적특성에 관하여 논의한다.

2. 구동 원리

본 전자기형 액츄에이터의 구동 원리는 Fig. 1에 도시된 바와 같다. 이 액츄에이터는 기본적으로 미세기전시스템 기술로 제작되는 상부 실리콘 칩과 하부의 상자성체로 구성된다. 실리콘 기판의 하부에 부착된 상자성체는 실리콘 기판에 수직인 방향으로 자기장을 형성한다. 이때 아치형의 판 스프링에 전류를 흘리면, 판 스프링을 따라 로렌츠 힘(Lorentz force)이 발생하게 되고, 인가된 전류가 증가함에 따라서 아치형의 판 스프링은 Fig. 1의 점선 모양과 같이 반대 방향으로 구동되게 된다. 반대 방향으로 휘어진 상태에서 전류를 끊으면 판 스프링의 복원력에 의하여 원래의 형상으로 되돌아 간다. 이 때에 단위 길이의 판 스프링에 발생하는 로렌츠 힘은 아래와 같이 주어진다.

$$f_l = i \times B \quad (1)$$

여기서 i 는 판 스프링으로 흐르는 전류, B 는 자속 밀도를 나타내는 벡터 물리량이다.

판 스프링의 양단에는 "ㄷ"자 형태의 유연구조물이 연결되어 있어 판 스프링이 움직일 때에 평면 방향의 유연성을 높여 변위 확대에 도움이 된다. 판 스프링의 길이 방향으로의 형상 $y(x)$ 는 아래의 식과 같이 정현함수(sine function)의 형태로 되어 있으며, 중앙부에서의 초기 높이는 $h=20 \mu\text{m}$ 이다.

$$y(x) = \frac{h}{2} \cos\left(2\pi \frac{x}{l}\right) \quad 0 \leq x \leq l \quad (2)$$

고횡단면비(high-aspect-ratio)를 지닌 미소 구조체의 제작을 위하여 poly-SOI(poly-silicon-on-insulator) 웨이퍼를 사용하였으며, 이러한 고횡단면비 구조를

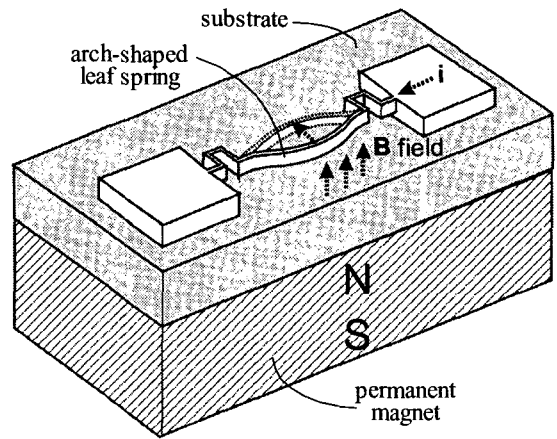


Fig. 1 Working principle of the laterally driven electromagnetic microactuator (LaDEM)

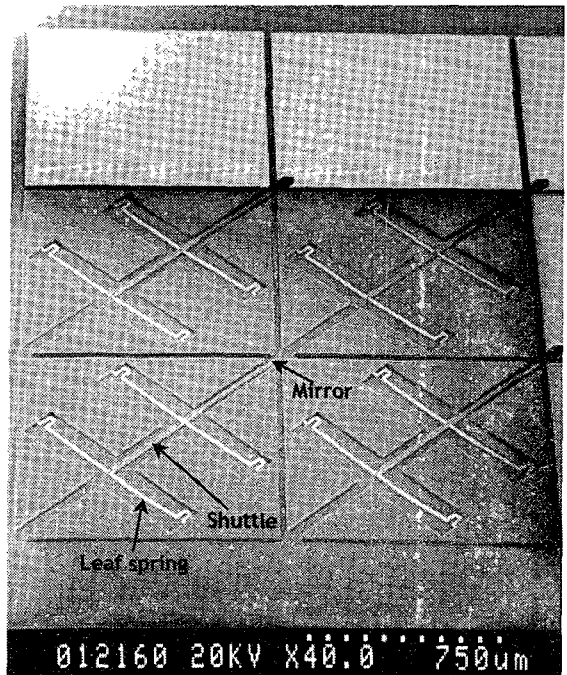


Fig. 2 Scanning electron micrograph of the fabricated 2x2 array-type optical switch

통하여 제작 및 구동 시 발생할 수 있는 자중 또는 고착 현상에 의한 처짐을 미연에 방지할 수 있

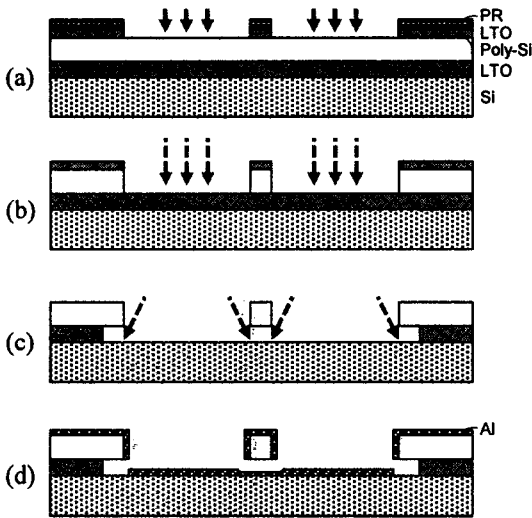


Fig. 3 Fabrication process of the optical switch: (a) photolithography and LTO etching; (b) polysilicon etching by RIE; (c) LTO etching; (d) Al deposition

링과 판 스프링의 중앙에 위치한 셔틀(shuttle), 그리고 셔틀의 끝에 위치한 수직 미소 거울로 구성되어 있다. 광 스위치의 구동에 있어서 가능한 낮은 전력 소모가 요구되는데, 이를 위해서는 판 스프링의 강성이 낮을수록 좋다. 그러나, 미소 거울 면에서의 안정적인 반사특성을 얻기 위한 구조체의 거동관점에서 보면, 셔틀의 운동이 좌우(횡) 또는 수직 방향으로 흔들림이 없이 전후(종) 방향으로만 움직이는 것이 가장 좋기 때문에 이를 위해서는 구조체에 적절한 강성이 뒷받침 되어야 한다. 이렇듯 광 스위치의 설계에서 최저 전력 소모와 구동체 거동의 안정성이라는 서로 상충되는 관점이 존재하는데, 이 두 설계 방향을 적절히 조절하는 것이 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 미소 광 스위치에 고횡단면비를 가지는 구조를 사용하여 평면운동을 유연하게 하는 반면에 상하 방향의 운동을 억제하였으며, 한 쌍으로 이루어진 판 스프링을 적용함으로써 거울의 전후 방향에 대한 좌우 방향의 강성을 크게 높여 미소 거울의 안정적인 전후 방향의 평면운동을 도모하였다.

3. 광스위치 제작

광스위치의 제작을 위하여 625 μm 두께의 5 inch 실리콘 웨이퍼 위에 3 μm 두께의 LTO (low temperature oxide)를 증착하고, 그 위에 16 μm 두께의 다결정실리콘을 다시 증착하여 polysilicon/LTO/silicon 의 적층구조를 가진 Poly-SOI 웨이퍼를 준비하였다.

제작공정은 Fig. 3 과 같이 한 장의 마스크만을 이용하여 완성된다. RIE(reactive ion etching) 공정에 대한 식각방지막(etch mask)을 형성하기 위하여 다결정실리콘 위에 1.2 μm 두께의 LTO 를 증착하였다. 증착된 LTO 는 사진작업에 이은 건식 식각공정을 통해 미소 패터닝된다(Fig. 3a). 다음 공정으로 RIE 방법을 통하여 16 μm 두께의 다결정실리콘을 수직 방향으로 완전히 식각한다(Fig. 3b). 이 공정을 통해 다결정실리콘 미소구조체 형상이 완성된다. RIE 공정이 끝난 웨이퍼를 HF 와 NH_3F 가 6:1 비율로 섞인 BHF(buffered HF) 용액에 담구어, 다결정실리콘 아래에 있는 3 μm 두께의 LTO 를 습식 식각한다(Fig. 3c). 이러한 습식 식각공정을 통해 실리콘 기판에 붙어 있던 다결정실리콘 구동체는 실리콘 기판으로부터 뜨게 된다. 원래 3 μm 두께

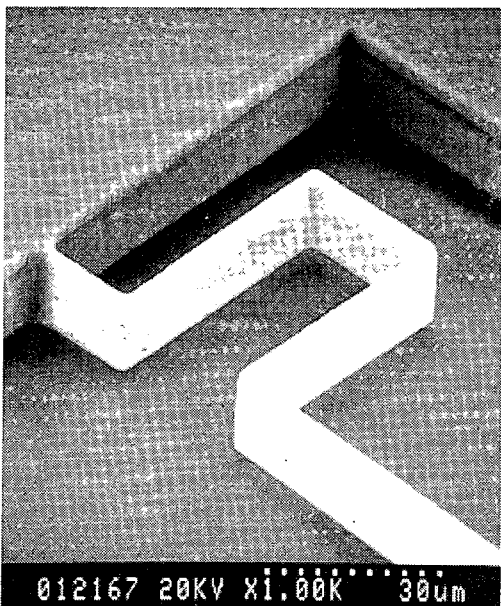


Fig. 4 Scanning electron micrograph of the fabricated "ㄷ" shaped meandering structure

다. 설명한 구동 원리를 이용하여 설계된 광 스위치는 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 한 쌍의 판 스프

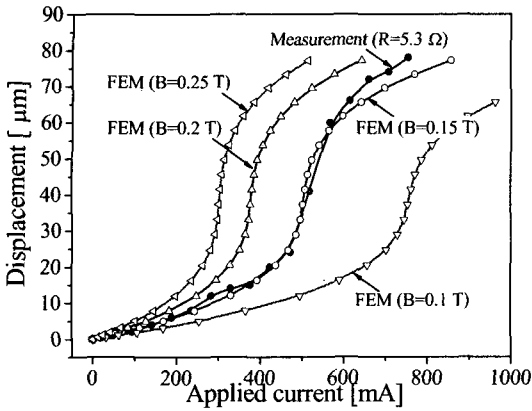
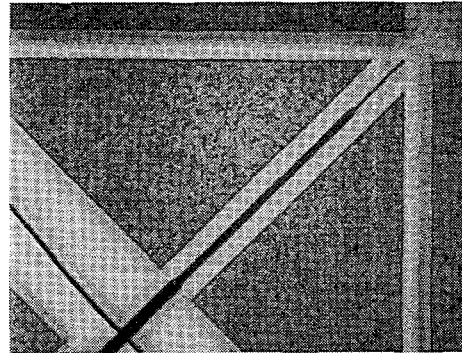


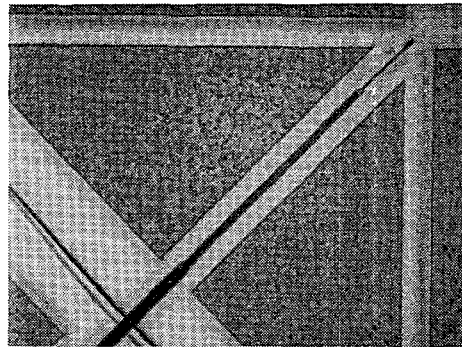
Fig. 5 Displacement of the optical switch by the measurement and the finite element method

의 LTO 식각을 위해서는 15 분이 소요되지만, 본 공정에서는 60 분 동안 식각하였다. 이렇게 오랜 시간동안 식각한 이유는 LTO 를 측면방향으로 과 식각하여 다음 공정인 Fig. 3(d)의 금속 증착시 실리콘 기판 위에 증착된 금속과 다결정실리콘 위에 증착된 금속간의 전기적인 절연을 도모하기 위함이다. 제조공정은 Fig. 3(d)와 같이 알루미늄 증착공정으로 끝나게 된다. 스퍼터링(sputtering) 방법으로 증착된 알루미늄은 다결정실리콘 구조체의 윗면뿐만 아니라, 좌우 옆면에도 증착된다. 비교적 균일하게 증착된 알루미늄층은 판 스프링의 전기전도도를 크게 높일 뿐 아니라, 거울면의 반사도를 크게 향상시킨다.

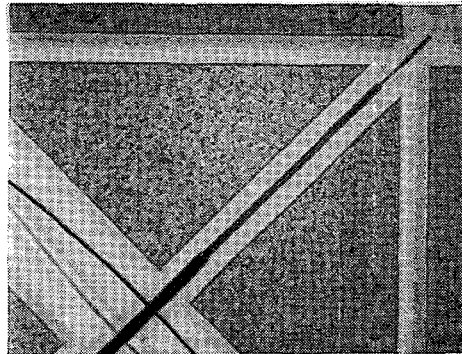
Fig. 2 는 제작된 2x2 배열형 광 스위치를 나타내며, Fig. 4 는 판 스프링의 양단에 위치한 "C"자 형태의 유연구조물을 전자주사 현미경(SEM)으로 확대 촬영한 것이다. 마지막으로 제작된 광 스위치는 단위 칩으로 절단된 후에 0.3 T의 자속밀도를 가지는 NdFeB 자석 위에 부착된다.



(a) 0 mA



(b) 377 mA



(c) 566 mA

Fig. 6 Microphotographs of actuating sequence of the optical switch by increasing the applied current

4. 실험결과 및 고찰

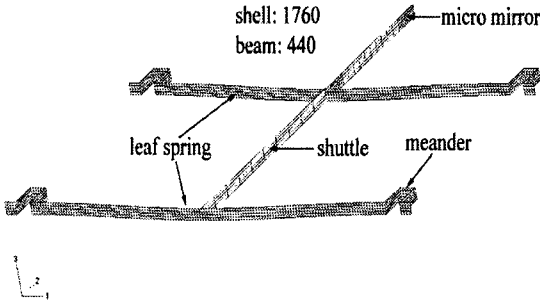


Fig. 7 Finite element for the load-displacement and the transient response analysis

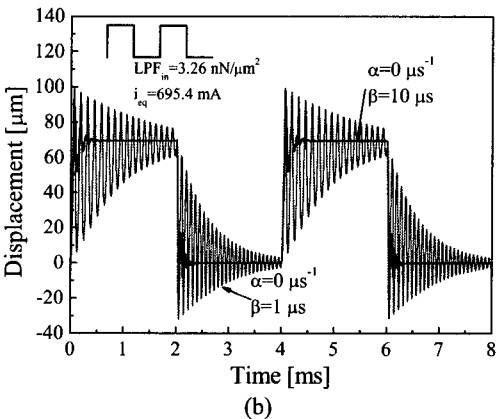
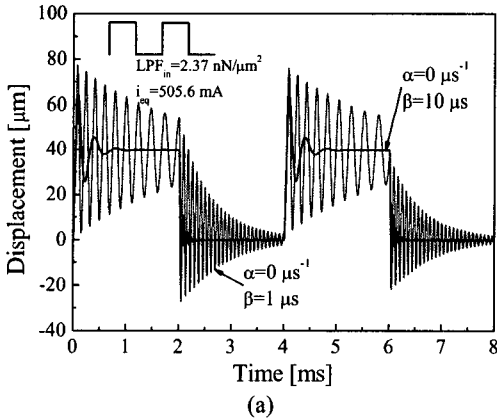


Fig. 8 Transient responses to a square load: (a) $LPF_{in}=2.37 \text{ nN}/\mu\text{m}^2$; (b) $LPF_{in}=3.26 \text{ nN}/\mu\text{m}^2$

제작된 판 스프링의 치수는 두께, 폭(기판에 수직인 방향의 치수), 전체 길이가 각각 $1.8 \mu\text{m}$, $16 \mu\text{m}$, $800 \mu\text{m}$ 이었으며, 판 스프링 한 쌍의 저항은 약 5.3Ω 이었다. Fig. 5의 검정 실선은 인가전류에 따른 미소 거울의 변위를 측정된 결과를 나타낸다. 인가전류가 증가할수록 미소 거울의 변위가 서서히 증가하다가 임계전류값(약 400 mA)을 넘어서부터 변위가 갑자기 증가하는 좌굴특성을 가진다는 것을 알 수 있다. 이러한 좌굴현상으로 556 mA 의 인가전류에서 약 $60 \mu\text{m}$ 의 큰 변위를 얻을 수 있었다. Fig. 6은 인가전류에 따른 미소 거울의 변위를 확대 촬영한 사진이다. Fig. 6(b)와 (c)로부터 미소 거울이 종방향으로 현격히 전진하였다는 것을 확인할 수 있다.

이러한 하중과 변위 관계를 유한요소해석을 통한 계산 결과와 비교 검토함으로써 이후에 해석 모델을 통한 설계의 향상을 도모하고자 하였다. 유한요소해석에 사용된 모델은 Fig. 7과 같으며 쉘요소와 빔요소를 이용하여 미소 구조체의 폴리실리콘 부분과 증착된 알루미늄 부분을 모델링하였다. 유한요소해석에는 비선형 후좌굴(nonlinear post-buckling)현상에 이용되는 Riks 방법을 이용하였고,¹⁴ 판 스프링에 발생하는 로렌츠 힘은 등가의 압력이 판 스프링에 작용하는 것으로 가정하여 모델링하였다.¹⁵ 이 때에 등가 압력은 식(1)의 단위 길이당 발생하는 로렌츠 힘을 단위 길이당 압력이 작용하는 면적으로 나누면 얻을 수 있다. Fig. 5처럼 몇 가지 자속밀도에 따른 하중과 변위의 관계를 도시한 결과, 실제 사용된 상자성체의 자속밀도의 1/2에 해당하는 $B=0.15 \text{ T}$ 에서 해석과 측정 결과가 가장 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 1) 해석에 사용된 치수가 실제 제작된 구조체의 치수와 약간 다를 수 있고, 2) 재질의 물성치가 제작 시 변경될 수 있고, 3) 광 스위치와 상자성체의 부착시 상호간의 정렬에 따라 판 스프링 주위의 실제 자속 밀도가 변화할 수 있기 때문에 발생하는 것으로 추정되나, 이 문제에 대해서는 추가적인 제작과 해석을 통한 검토가 필요하다고 생각된다. 또한, 하중과 변위 선도에서 변위가 약 $60 \mu\text{m}$ 를 넘는 경우에 측정과 해석 결과에서 차이가 약간 발생하지만 전체적인 양상은 매우 잘 일치하므로 이를 설계에 충분히 이용할 수

있으리라 판단된다.

현재까지는 광 스위치의 동적 특성을 측정할 수 있는 측정 장비가 마련되지 않은 상태이므로, 우선 유한요소해석을 통하여 광 스위치의 기본적인 동적 특성을 살펴보고자 한다. 해석에서 감쇠를 모델링하기 위하여, 유한요소해석을 이용한 구조물의 동적 해석에 널리 사용되는 Rayleigh 감쇠를 이용하였다. 본 문제의 Q 계수(Q factor)를 1 과 10 으로 각각 가정하여 그 때의 Rayleigh 감쇠계수에 대한 동적 해석을 수행하였다. 이 때, Rayleigh 감쇠계수 $\alpha=0 \text{ s}^{-1}$ 이라고 가정하면, β 는 다음 관계에서 구해진다.

$$Q = \frac{1}{2\xi} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\xi}{\pi f} \quad (4)$$

여기서, ξ 는 감쇠비, f 는 공진주파수로서 본 문제에서는 13667 Hz 이다. 이로부터 약 $\beta=1 \mu\text{s}$ 와 $\beta=10 \mu\text{s}$ 의 Rayleigh 감쇠계수가 각각 구해진다.

Fig. 8 은 사각파(square pulse)의 하중의 크기가 각각 LPF=2.37 과 3.26 nN/ μm^2 일 때의 과도 응답을 두가지 감쇠값에 대하여 각각 계산한 결과를 나타낸다. 이 두 하중의 크기는 각각 대략 506 과 696 mA 의 인가전류가 가해지는 경우에 구조체에 발생하는 로렌츠 힘의 크기로, Fig. 5 에서 약 40 μm 와 70 μm 의 구동을 가능하게 크기의 하중이다. 해석 결과에서 광 스위치의 응답은 전류의 인가에 대단히 빨리 응답함을 알 수 있고, 감쇠값에 따라서 약 5 ms 과 2 ms 이내에 각각 수렴함을 확인할 수 있다. 또한, 각각의 입력 하중에 수렴한 변위값은 앞의 Riks 방법으로 계산한 변위값인 40 μm 와 70 μm 에 일치함을 알 수 있다.

단일모드의 광섬유에서 나오는 광선의 직경이 10 μm 보다 작기는 하지만 광섬유에서 나온 광선의 직경은 광선이 직진함에 따라서 가우시안 빔이론(Gaussian-beam theory)에 따라 넓어지게 된다. 따라서, 작은 거울면은 거울의 가장자리에 입사된 광선을 회절시키거나 산란시키는 좋지 않은 영향을 미칠 뿐만 아니라, 패키징에서 광 스위치와 광섬유의 정렬을 매우 어렵게 만든다. 통상적으로 광 스위치와 광섬유 사이에는 특정한 거리가 존재하게 되므로, 본 논문의 제작에 사용된 다결정실리콘의 두께

인 16 μm 는 실제 거울면으로 적용하기에는 다소 작다고 여겨진다. 그러나, 직경이 커진 광선을 축소시킬 수 있는 마이크로 렌즈가 광 스위치와 함께 제작된다면 이 작은 거울면도 충분히 사용 가능하다. 만약에 마이크로 렌즈의 집적이 힘들 경우는 100 μm 정도 두께의 상부실리콘을 가진 SOI 웨이퍼와 DRIE(deep reactive ion etching)공정을 이용하여 광 스위치를 제작할 수 있다.^{16,17}

위에서 구체적으로 언급을 하지는 않았지만, 제작된 다결정실리콘과 알루미늄의 복합 미소 구조체는 충격과 피로 파괴에 대하여 공히 우수한 특성을 보였다. 이는 충격에 약한 다결정실리콘이 연성 재질인 알루미늄 코팅으로 취약점이 많이 보완되었기 때문으로 생각된다. 한편, 본 연구에서 사용한 알루미늄은 다른 금속에 비해 산화가 쉽게 되고 반사도가 상대적으로 떨어지는 단점이 있으므로 실제 응용에서는 알루미늄 대신에 금 또는 백금을 증착하는 것이 유리하다. 또한, 로렌츠 힘은 자속밀도에 직접적으로 비례하므로 자속밀도가 상대적으로 높은 자성체를 사용한다면 최적설계 등을 통하여 구조체의 형상을 최적화 함으로써 인가전류를 크게 낮출 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 전자기 구동력을 이용하여 평면구동이 가능한 2x2 배열형 광 스위치를 제작하였다. 제작된 광 스위치에서 아치 형상의 판 스프링은, 초기에는 인가전류가 증가할수록 변위가 서서히 증가하다가 임계전류값(약 400 mA)을 넘어서부터 변위가 갑자기 증가하는 좌굴특성을 보였다. 그 결과로 556 mA 의 인가전류에서 약 60 μm 의 큰 변위를 얻을 수 있었다. 유한요소해석을 통하여 하중과 변위의 경향과 기본적인 동적 응답을 미리 확인할 수 있어서 이후에 이를 통한 성능 최적화가 충분히 가능할 것이다.

본 논문에서 제작한 전자기형 마이크로 액츄에이터는 큰 변위와 빠른 응답속도를 두루 갖추었을 뿐만 아니라, 한 장의 마스크 만을 이용한 간단한 제조공정과 극소형으로 제작 가능하다는 장점이 있다. 그러므로 이 액츄에이터는 본 논문에서 예시한 광 스위치뿐만 아니라, 셔터 및 광 감쇠기를 포함한 여타의 광 소자(μ -optical devices), 펌프, 밸브 및 믹서를 포함한 미세유체 제어소자

(μ -fluidic devices), 릴레이와 같은 전기소자(μ -electric devices) 등 미소 액츄에이터가 필요한 다양한 분야에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구사업(과제번호 R08-2003-000-10964-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Petersen, K. E., "Dynamic micromechanics on silicon: techniques and devices," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 25, No. 10, pp. 1241 – 1250, 1978.
- Akiyama, T., Staufer, U. and deRooy, N. F., "Atomic force microscopy using an integrated comb-shape electrostatic actuator for high-speed feedback motion," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, No. 21, pp. 31 – 41, 2000.
- Riethmüller, W. and Benecke, W., "Thermally excited silicon microactuators," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 35, No. 6, pp. 758 – 763, 1988.
- Jeong, O. C. and Yang, S. S., "Fabrication and test of a thermopneumatic micropump with a corrugated p⁺ diaphragm," *Sensors Actuators*, Vol. 83, pp. 249 – 255, 2000.
- Akedo, J. and Lebedev, M., "Piezoelectric properties and poling effect of Pb(Zr,Ti)O₃ thick films prepared for microactuators by aerosol deposition," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, No. 11, pp. 1710 – 1712, 2000.
- Debeda, H., Freyhold, T. V., Mohr, J., Wallrabe, U. and Wengelink, J., "Development of miniaturized piezoelectric actuators for optical applications realized using LIGA technology," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 8, No. 3, pp. 258 – 263, 1999.
- Sohn, J. W., Choi, S. B., "Energy harvesting for bioMEMS using piezoelectric materials," *J. of the KSPE*, Vol. 22, No. 6, pp. 199-206, 2005.
- Ruan, M., Shen, J. and Wheeler, C. B., "Latching micromagnetic relays," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 10, No. 4, pp. 511 – 517, 2001.
- Capanu, M., Boyd, J. G. and Hesketh, P. J., "Design, fabrication, and testing of a bistable electromagnetically actuated microvalve," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 9, No. 2, pp. 181 – 189, 2000.
- Ji, C. H. and Kim, Y. K., "Fabrication and experiments on electromagnetic micromirror array with bulk silicon mirror plate and aluminum spring," *Tech. Dig. Transducers '01, 11th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators*, Munich, Germany, pp. 1320 – 1323, 2001.
- Ahn, C. H. and Allen, M. G., "A fully integrated surface micromachined magnetic microactuator with a multilevel meander magnetic core," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 2, No. 1, pp. 15 – 22, 1993.
- Dario, P., Croce, N., Carrozza, M. C. and Varallo, G., "A fluid handling system for a chemical micro-analyzer," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 6, pp. 95 – 98, 1996.
- Feustel, A., Krusemark, O. and Müller, J., "Numerical simulation and optimization of planar electromagnetic actuators," *Sensors Actuators*, Vol. 70, pp. 276 – 282, 1998.
- ABAQUS Theory Manual Version 5.8, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 1998.
- Han, J. S., Ko, J. S., Kim, Y. T. and Kwak, B. M., "Parametric study and optimization of a micro-optical switch with a laterally driven electromagnetic microactuator," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 12, pp. 939 – 947, 2002.
- Juan, W. H. and Pang, S. W., "High-aspect-ratio Si vertical micromirror arrays for optical switching," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 7, No. 2, pp. 207 – 213, 1998.
- Marxer, C., Thio, C., Grétilat, M. A., deRooy, N. F., Bättig, R., Anthamatten, O., Valk, B. and Vogel, P., "Vertical mirrors fabricated by deep reactive ion etching for fiber-optic switching applications," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 6, No. 3, pp. 277 – 285, 1997.