

마이크로 렌즈가 집적된 2-자유도 평면구동기의 설계 및 제작

김재흥, 김용권
서울대학교 전기공학부

Integration of a microlens on a in-plane positioning actuator with 2-DOF

Che-Heung Kim and Yong-Kweon Kim
Seoul National University

Abstract - This paper studies on the design and fabrication of a micro in-plane positioning actuator integrated with a microlens. Proposed in-plane actuator is a micro XY-stage which is composed of two linear comb drive actuators being orthogonal to each other. In the fabrication of actuator, the single crystalline silicon substrate anodically bonded with a #7740 glass substrate is used because of simple release and passivation. The structure of actuator is formed on the silicon facet of bonded fixture by chlorine-based deep RIE and then released by isotropic wet etching of glass(#7740) in hydrofluoric acid solution. Fabricated actuator has a large travel range up to $30(\pm 15)\mu\text{m}$ and high resolution less than $0.01\mu\text{m}$ in each direction. Experimented resonant frequency of this actuator is 630Hz. The micro-Fresnel lens is fabricated on the square-shape glass structure prepared in the center of actuator.

전극간의 인력과 서스펜션(suspension)의 평형 메커니즘(mechanism)을 이용하여 평면상의 임의의 위치에 마이크로렌즈를 위치시키도록 설계되었다. 그 개념도를 그림 1에 도시하였다.

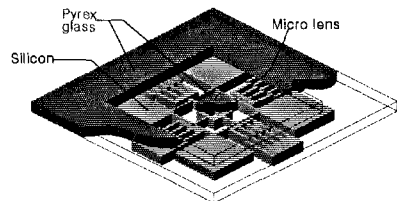


그림 1. 제안된 구동기의 개념도

2.1 평면구동기의 설계 및 제작

2.1.1 수직인 두 축 방향 구동기

평면상의 임의의 위치 제어를 위해서는 독립적인 두 방향 구동이 요구된다. 제안된 평면구동기는 수직인 두 방향 구동의 벡터합으로 수동요소의 최종 위치가 결정되도록 설계되었다(3). 그림 2는 제안된 평면구동기의 mask layout이다.

1. 서 론

광학 시스템에 있어서 집광요소(light-converging element)는 센서의 효율을 증대시킬 뿐만 아니라 높은 밀도의 배체를 구현하는 데 중요한 요소이다. 현대의 광학 시스템에서는 이러한 광학 요소를 외부의 서보시스템(servo system)에 탑재하여 정밀한 위치 제어를 함으로써 광기록 및 광통신 분야에 응용하고 있다. 외부의 서보시스템을 도입하는 경우에는 시스템의 부피가 증가할 뿐만 아니라 높은 정밀도를 구현하기 위해서는 많은 비용이 요구된다. 이러한 난점을 해결하기 위하여 최근에는 반도체 마이크로머시닝을 이용한 실리콘 구동기에 대한 연구가 진행되고 있다. 실리콘 마이크로머시닝 기술로 제작된 구동기는 수 백 Å정도의 정밀도를 구현할 수 있고, 기술적으로 안정한 반도체 기술을 적용함으로써 신뢰도를 향상시키고 대량생산을 통한 비용절감의 효과를 기대할 수 있다. 그러나 마이크로머시닝을 이용하여 제작된 구동기는 높은 정밀도를 얻을 수 있는 반면, 이동 범위가 수 μm 이내로 작은 경우가 대부분이다(1,2). 본 논문에서는 $0.01\mu\text{m}$ 이하의 정밀도를 가지며, $30(\pm 15)\mu\text{m}$ 의 비교적 큰 이동 범위를 갖는 2-자유도 평면구동기를 제작하였고, 구동기와 함께 마이크로렌즈를 제작 및 집적하였다.

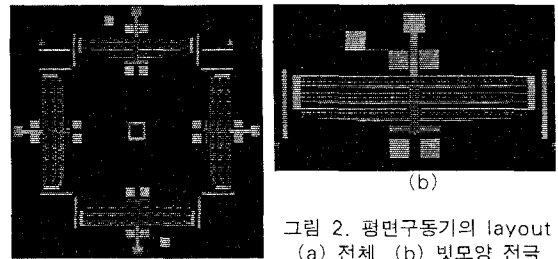


그림 2. 평면구동기의 layout
(a) 전체, (b) 빔모양 전극

2. 본 론

제안된 구동기는 직교하는 한 쌍의 빔모양 액추에이터로 구성된 평면구동기와 수동요소인 마이크로 렌즈가 집적되어있는 구조이다. 평면구동기는 각 방향의 빔모양

제안된 구동기는 저전압에서 큰 구동변위를 얻기 위하여 다단계의 빔모양 전극 배열(cascaded comb electrode)을 도입하였고, 큰 변위에서의 힘 대 변위(force-to-displacement)의 선형성을 고려하여 folded beam 스프링을 채택하였다. folded beam 구조는 단순 beam 구조(clamped-clamped)와 같은 값의 스프링 상수를 갖지만, 단순 beam 스프링이 큰 변위로 갈수록 축력(axial force)의 발생에 의하여 힘 대 변위의 비선형성이 급격히 증가하는 데 반해, 비교적 큰 변위에서도 그 선형성이 유지된다. 또한 folded beam 스프링은 구동시의 side instability 문제에 직결되는 스프링의 stiffness ratio가 단순 beam 스프링과 같은 값으로서 매우 크므로 구동 시 발생하는 좌우 흔들림(torsional motion)을 최소화한다(4,5). 제안된 구동기의 comb finger 간 간극은 $3\mu\text{m}$ 이며, folded beam 스프링의 길이는 $1500\mu\text{m}$, 모든 구조물의 두께는 $30\mu\text{m}$ 이다.

2.1.2 평면구동기의 제작 및 측정

제안된 평면구동기의 제작 공정에는 유리기판 (#7740)과 양극 접합된 실리콘 기판이 사용되었다. 제작공정의 순서는 그림 3과 같다.

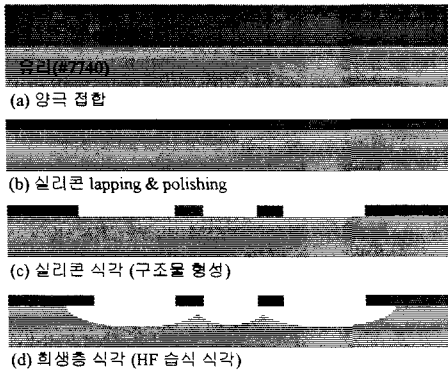


그림 3 평면구동기의 제작 공정

그림 3의 공정은 단 한번의 사진공정과 건식식각 공정을 통하여 액추에이터 구조를 형성하고, 희생층으로 도입된 유리기판을 HF용액에서 습식식각함으로써 쉽게 뜯겨 구조(overhanging structure)의 평면구동기가 제작됨을 보여준다. 도핑(doping)되지 않은 실리콘은 HF 용액에서 식각되지 않으므로 구조물을 보호하기 위한 passivation 층이 요구되지 않는다. 또한 구조물의 희생층으로 도입된 유리 기판은 두께가 수 백 μm 정도로서 구조물이 회생층 식각 후 수 십 μm 이상 바닥으로부터 뜨도록 공정을 조절할 수 있으므로, 구조물이 바닥에 정착(sticking)하는 문제를 사전에 막을 수 있다. 표 1에 양극접합 조건을 제시하였고, 유리기판의 습식식각은 49wt%의 HF용액을 사용하여 상온에서 실시하였다. 제작된 평면구동기는 그림 4와 같다.

표 1. 양극접합 조건(상압, disk-type 전극 사용)

항 목	기판 가열(°C)	인가 전압(V)	접합시간(min)
조 건	380	800	10

*접합시간은 전류가 peak의 10%이하가 되는 시점까지 임.

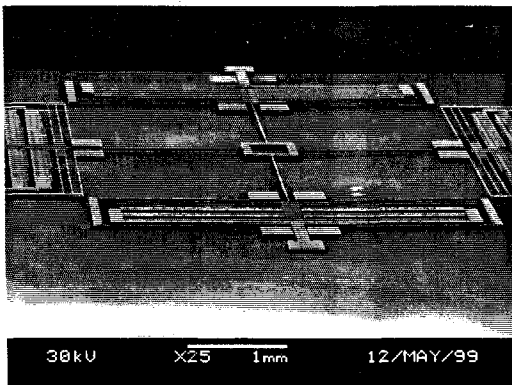


그림 4. 제작된 평면구동기

제작된 평면구동기는 약 40V의 인가전압에 독립된 각 방향에 대하여 정적으로 $\pm 15\mu\text{m}$ 의 이동 거리가 측정되었고, 기계적 공진 주파수는 630Hz이다. 그림 5는 제작된 구동기의 정 전압 특성이다. 제시된 값은 구동기

의 네 방향 중 한 방향의 구동 특성을 측정된 것이다.

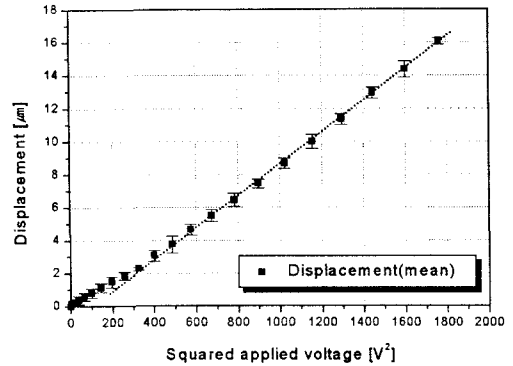


그림 5. 구동기의 정전압 특성

그림 5의 그래프에서 가로축은 인가전압의 제곱으로 서 빗모양 전극의 정전인력에 비례하는 값이고, 세로축은 구동 변위이다. 빗모양 구동기에서 정전인력과 스프링의 복원력간의 평형식은 다음 식 (1)과 같이 주어진다.

$$x = \frac{N\epsilon_0 h}{gk} V^2 \quad \text{식 (1)}$$

x 는 구동 변위, N 은 전극의 개수
 h 는 전극의 두께, g 는 전극간 간격
 k 는 시스템의 스프링 상수, V 는 인가 전압

제작된 구동기는 그림 5에서 제시된 바와 같이 인가 전압 40V, 구동 변위 $15\mu\text{m}$ 이내에서 비교적 선형적인 힘 대 변위 관계를 보인다. 이 때 위 결과를 비례상수 $15\mu\text{m}/40^2\text{V}$ 의 직선으로 가정하면, 약 1V의 전압 제어 로 $0.01\mu\text{m}$ 정도의 정밀도를 얻을 수 있다.

2.2 8-phase 프레넬 렌즈의 설계 및 제작

프레넬 렌즈는 대표적인 회절렌즈로서 굴절렌즈에 비하여 매우 적은 부피를 갖는 것이 특징이다. 프레넬 렌즈는 여러 개의 존 플레이트(zone plate)로 이루어져 있으며, 각각의 존 플레이트는 렌즈를 통과한 빛이 정해진 초점에서 모두 보강 간섭(constructive interference)을 일으키도록 위상을 지연시켜 빛을 초점에 수렴시킨다. 이러한 관계를 만족시키는 위상 방정식을 풀면 각 존 플레이트의 위치와 반경에 따른 두께는 각각 식(2)과 식(3)으로 주어진다.

$$r_m = \sqrt{2\lambda fm + (\lambda m)^2} \quad \text{식 (2)}$$

$$d_m(r) = \frac{\lambda(m+1) - \sqrt{f^2 + r^2}}{n_{FL} - n_i} \quad \text{식 (3)}$$

r_m 은 m 번째 존 플레이트의 반경
 $d_m(r)$ 은 m 번째 존 플레이트의 반경에 따른 두께
 λ 와 f 는 각각 빛의 파장과 초점거리
 n_{FL} 과 n_i 는 각각 렌즈와 공기의 굴절률

위 식(2)에서 얻어진 존 플레이트의 두께 식은 반경에 따라 연속적인 값을 갖는다. 그러나 이러한 연속적인 두께 형상은 실제 공정으로 획득하는 것이 거의 불가능하

므로 일정 두께 구간을 양자화하는 binary 렌즈를 제작하였다. 곡면렌즈를 양자화한 binary 렌즈의 회절 효율은 다음과 같은 식(3)으로 주어진다.

$$\eta(I) = |\sin \alpha(1/I)|^2 \quad \text{식 (3)}$$

여기서 I는 단(step)의 수이다. 식(3)에 의하면, 2단으로 양자화하는 경우 즉, $\eta(2)$ 는 0.41이고, $\eta(8)$ 은 0.95, I가 16을 넘으면 회절효율은 99%를 넘게 된다. 그림 6는 2단, 4단(I=2,4)인 경우에 대한 공정 개념도이고, 그림 7은 제작된 8-phase 프레넬 렌즈의 사진이다.

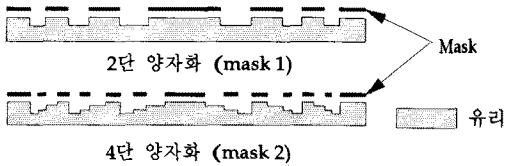


그림 6. binary 프레넬 렌즈의 제작 공정 개념도

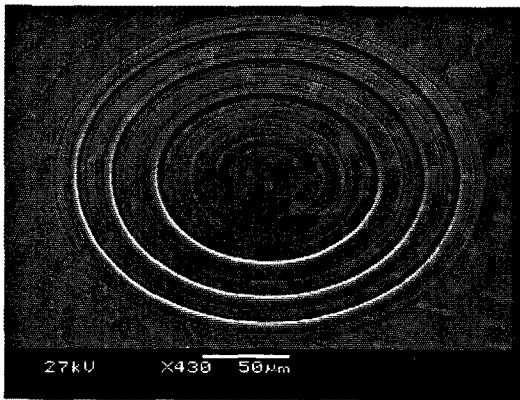


그림 7. 8-phase 프레넬 렌즈

2.3 마이크로렌즈와 구동기의 집적

마이크로렌즈와 구동기의 집적은 그림 11과 같은 통합 공정으로 이루어진다.

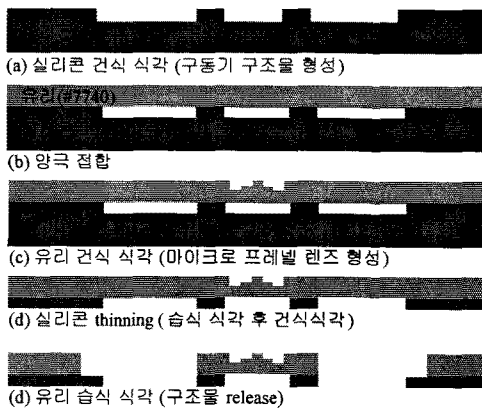


그림 8. 마이크로렌즈와 구동기의 집적공정

그림 8의 공정에서 마이크로렌즈는 (b)의 양극접합 공정 직후에 유리의 건식식각을 통하여 제작되어 구동기에 집적된다.

3. 결 론

유리 기판과 실리콘 기판의 양극접합 공정을 이용한 2-자유도의 평면구동기를 제작하였다. 제작된 구동기는 약 40V의 인가 전압 대하여 수직인 각 방향으로 $\pm 15 \mu\text{m}$ 의 이동 범위와 0.01 μm 이하의 정밀도를 가진다. 구동기에 집적되는 마이크로 렌즈는 회절렌즈인 8-phase의 프레넬렌즈가 UV 사진 식각 공정으로 제작되었다.

(참 고 문 헌)

- [1] P.-F. Indermuehle, C. Linder, J. Brugger, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooji, "Design and fabrication of an overhanging xy-microactuator with integrated tip for scanning surface profiling", Sensors and Actuators A, 43, pp.346-350, 1994.
- [2] P.-F. Indermuehle and N. F. de Rooji, "Integration of large tip with high aspect ratio on an xy-microstage for AFM imaging", Transducers'95, pp.652-655, 1995
- [3] 김재홍, 안시홍, 임형택, 김승권, "XY-stage에 의해 정적인 변위를 갖는 미세 프레넬(Micro-Fresnel lens)의 설계 및 제작", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, MS05, pp. 2515-2517, 1998
- [4] Rob Legtenberg, A W Groeneveld and M Elwenspoek, "Comb-drive actuators for large displacements", J.Micromech. Microeng., 6, pp.320-329, 1996.
- [5] Chris Seung-Bok Lee, Sejin Han, and Noel C. MacDonald, "Multiple depth, single crystal silicon microactuators for large displacement fabricated by deep reactive ion etching", Solid-state sensors and actuator workshop, pp.45-50, 1998.