

論文2003-40SD-8-1

# 대용량 광 스위치를 위한 2축 자유도 마이크로 미러

## (Two-Axis Rotational Micro-Mirror for High-Capacity Optical Cross-Connect Switch)

金泰植\*, 李相信\*

(Tae-Sik Kim and Sang-Shin Lee)

### 요약

본 논문에서는 큰 회전각을 갖는 2축 자유도 마이크로 미러를 제안하고 제작하였다. 이러한 마이크로 미러는  $N \times N$  대용량 광 크로스 커넥트 스위치(optical cross-connect switch)를 구현하는 데 필수적인 요소이다. 스위치의 용량을 증가시키기 위해서는 각각의 마이크로 미러의 회전각을 크게 해야 한다. 이 미러가 큰 각도로 회전하기 위해서는 상부 전극인 미러 판과 하부전극 사이에 충분한 공간이 확보 되어야 한다. 제안된 구조는 기판미세 가공법 (bulk micromachining)을 이용하여 상부전극인 미러와 하부전극을 각각 다른 기판에 제작한 후, 두 기판을 접합함으로써 쉽게 미러의 회전 공간을 확보하였다. 따라서 미러의 회전 공간 확보를 위한 별도의 구동기(actuator)를 도입할 필요가 없었다. 제작된 마이크로 미러의 성능을 측정 한 결과를 살펴보면, x축과 y축 방향으로의 회전각은 각각  $\pm 5.5^\circ$ 와  $\pm 8.4^\circ$ 였으며, 이 때의 풀인 (pull-in) 전압은 각각 380 V와 275 V였다. 이러한 회전각의 성능은 전 세계적으로 지금까지 보고된 연구결과 중에서 가장 우수한 결과이다.

### Abstract

In this paper, we have proposed and fabricated a two-axis rotational micro-mirror with large tilt angle. Such a micro-mirror is a key element for  $N \times N$  high capacity optical cross-connect switches. The micro-mirror is required to have large tilt angle to increase the capacity of the cross-connect switches. For larger micro-mirror tilt angle, the gap between the grounded mirror plate and the bottom electrode is to be large enough to provide space for the tilting of the mirror. For our proposed structure, the gap was produced in such a way that the grounded mirror plate and the bottom electrode were made separately in different substrates by using the bulk micromachining technology, and combined later by employing self-align technique. As a result, a large tilt angle has been achieved without using additional actuators. The measured tilt angles were as large as  $\pm 5.5^\circ$  and  $\pm 8.4^\circ$  in the x and y direction respectively, and the pull-in voltages for the two directions were 380 V and 275 V respectively. Finally the fabricated mirror was successfully utilized to steer the optical beam. To our knowledge, our micro-mirror has the best performance among the micro-mirrors reported internationally so far.

**Keyword** : mirrors, optical switches, actuators, micromachining.

\* 正會員, 韓國科學技術院 電子電算學科 電氣및電子工學  
(Division of Electrical Engineering, Dept. of Electvical Engineering & Computer Science, KAIST)

※ 본 연구를 수행하는 과정에 많은 도움을 주신 LG중

합기술원 소재재료연구소 MEMS팀의 부종욱 박사  
님 그리고 이영주 박사님께 감사 드립니다.

接受日字:2002年12月18日, 수정완료일:2003年7月29日

## I. 서론

최근 인터넷, 전자상거래, 멀티미디어 등으로 인한 통신량의 폭발적인 증가로 인하여 대용량 광통신에 대한 필요성이 심각하게 대두되고 있다. 대용량 광통신 시스템을 구현하기 위해서는 수 십 ~ 수 백 개까지의 입력과 출력을 갖는  $N \times N$  광 크로스 커넥트 스위치가 필수적이다<sup>[1]</sup>. 지금까지는 이러한 대용량 스위치를 구현하기 위한 단위 요소로 평면도파로형(Planar lightwave circuit: PLC)  $1 \times 2$  또는  $2 \times 2$  광 스위치 소자와 미세가공 기술(Microelectromechanical Systems: MEMS)에 의해서 제작된 마이크로 미러 소자 등이 주로 이용되어 왔다. 평면도파로형 소자를 이용한 광 크로스 커넥트 스위치의 경우 입출력 용량이 증가함에 따라 전체 소자의 구조가 급격히 복잡해 지고 광 손실이 증가하는 근본적인 문제점을 지니고 있다. 반면에, 마이크로 미러 소자를 이용하여 구현된 광 크로스 커넥트 스위치는 입출력 용량을 증가시키는 것이 매우 용이할 뿐만 아니라, 용량이 증가해도 광 손실도 거의 증가하지 않으며 소자의 구조도 복잡해 지지 않는 등의 장점을 지니고 있다. 또한 광 스위치의 누화(crosstalk)가 작고 파장과 편광에 대한 의존도도 매우 낮다<sup>[2]</sup>. 이러한 장점들을 고려할 때, 마이크로 미러를 이용한 광 크로스 커넥트 스위치는 현재 광 통신 시스템에서 사용되는 전기적 크로스 커넥트 스위치를 대체할 것으로 기대된다<sup>[3]</sup>.

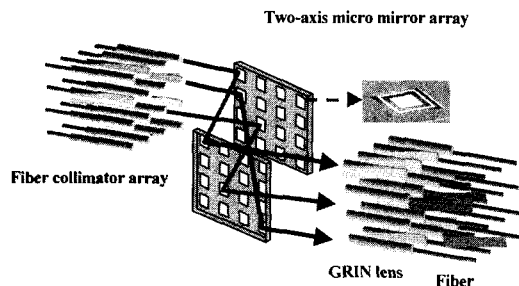


그림 1. 마이크로 미러 배열을 이용한  $N \times N$  광 크로스 커넥트 스위치

Fig. 1. Large-capacity optical cross-connect switch based on a micro-mirror array.

<그림 1>에는 마이크로 미러를 이용한 광 크로스 커넥트 스위치의 구조가 도시되어 있다. 이 스위치는

$N \times N$  배열 형태의 2축 자유도를 갖는 마이크로 미러들과  $N \times N$  광섬유 배열로 이루어져 있다. 본 논문에서는  $N \times N$  대용량 광 크로스 커넥트 스위치를 구현하는데 사용될 수 있는 새로운 구조의 마이크로 미러를 제안하고 미세가공기술을 도입하여 제작하고 특성을 분석하였다. 이 마이크로 미러는 정전기력(electrostatic force)에 의해 구동되며 2축 자유도를 갖는다. 특히, 별도의 구동기(actuator) 없이 미러가 회전할 수 있는 충분한 공간을 확보함으로써 큰 회전각을 얻을 수 있었다. 한편, 지금까지 보고된 미세가공 기술을 이용하여 제작된 미러는 상부전극인 미러판과 하부전극 사이에 충분한 미러 회전 공간을 확보하기 위해서 별도의 구동기를 불가피하게 도입하였다. 예를 들어, 열 구동기(thermal actuator) 또는 스크래치 드라이브 구동기(scratch drive actuator: SDA)를 이용하여 박막미세 가공법(surface micromachining)으로 제작된 미러를 하부전극 위로 일정 높이까지 들어 올림으로써 회전공간을 확보하였다<sup>[4]</sup>. 이와 같이 별도의 구동기를 사용하는 경우에는 공정이 복잡해지고 불필요한 전력소모가 유발된다. 본 논문에서 제안된 마이크로 미러의 구조는 미러판과 하부전극을 각각 독립 기판에 제작한 후 두 기판을 하이브리드(hybrid) 접합시킴으로써 미러의 회전 공간 확보가 매우 용이하다. 또한, 미러판과 하부전극은 기판미세 가공법(bulk micromachining)을 이용하여 제작하였기 때문에 박막미세 가공법(surface micromachining)으로 제작한 미러소자보다 기계적으로 안정하다. 결론적으로, 제작된 마이크로 미러는 최대 회전 각도는  $8.4^\circ$ 를 보였으며, 4개의 하부 전극을 이용하여 임의의 방향으로도 회전 시킬 수 있음을 입증하였다.

## II. 설계 및 제작

본 논문에서 제안된 마이크로 미러의 구조가 <그림 2>에 도시 되어있다. 상부기판은 마이크로 미러와 이를 둘러싸고 있는 짐볼(gimbal)로 구성되어 있으며, 4개의 힌지(hinge)가 미러와 짐볼을 지탱하고 있는 구조이다. 하부기판은 메사(mesa) 구조의 기판 위에 독립된 4개의 하부전극이 형성되어 있다. 이렇게 마이크로 미러와 구동에 필요한 전극을 각각 서로 다른 기판에 독립적으로 제작한 후, 이 두 기판을 정밀하게 결합시켜 상부전극과 하부전극 간에 일정한 간격을 손쉽게 확보하는 방법을 도입하였다. 상부전극과 하부전극이 형성

될 기판으로 (100) 방향의 실리콘 웨이퍼를 사용하여 {111} 면이 드러나도록 KOH 용액에서 식각하면, 식각된 실리콘면의 경사각도는 54.74°가 된다. 따라서 이러한 실리콘 웨이퍼의 식각 특성을 활용하여 복잡한 정렬 공정 없이 두 기판이 정밀하게 접합될 수 있도록 하였다. 제안된 미러의 동작원리를 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 제안된 미러는 짐볼 형태의 마이크로 미러이기 때문에 네 개의 하부전극을 이용하면 임의의 방향으로 미러를 회전시킬 수 있다. 즉, 미러 기판과 하부전극에 일정한 전압을 인가하게 되면 두 전극간에 정전기력이 유도되어 미러기판이 회전하게 된다. 이때 마이크로 미러를 x축과 y축으로 각각 회전시키고자 할 때는 그 방향에 놓여있는 두 개의 전극에 전압을 인가한다. 그리고 x축과 y축으로 동시에 회전시키고자 할 때는 그 방향에 놓여있는 세 개의 전극에 전압을 인가하면 마이크로 미러는 특정 방향으로 회전하게 된다. 한편, 회전각을 크게 하기 위해서는 미러와 하부전극간의 간격이 충분히 커야 한다. 그리고 두 전극사이에서 걸리는 전압이 일정 값 이상이 되면 이것에 의해 발생된 정전기력이 원래의 위치로 되돌아가려는 미러의 복

원력보다 커지기 때문에 미러기판이 하부전극에 달라붙는 풀인(pull-in) 현상이 발생한다. 이로 인하여 최대 동작전압은 풀인 전압에 의해 결정된다.

제안된 마이크로 미러를 FEM (finite element model) 수치 모의 실험 기법을 도입하여 설계하고 특성을 분석하였다. 전극에 인가된 전압에 의한 정전 회전력 ( $T_e$ )과 torsion beam에 의한 복원력 ( $T_m$ )은 다음의 수식 (1)과 (2)로 각각 표시될 수 있다<sup>[5]</sup>. 이 때 W와 L은 미러 면의 폭과 길이를 나타내고, w, t, 그리고 l은 torsion beam의 폭, 두께, 그리고 길이를 각각 나타낸다. d는 상부 전극인 미러 면과 하부전극과의 간격을, 은 진공 유전상수를 나타낸다. <그림 3(a)>와 <그림

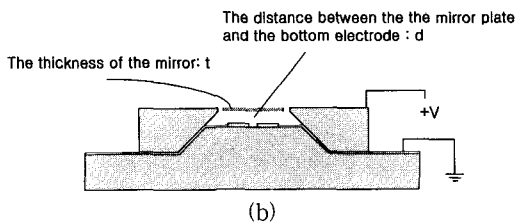
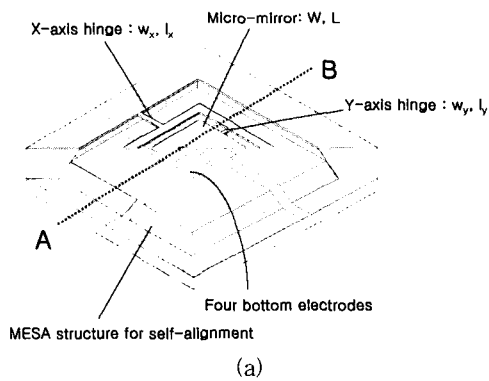
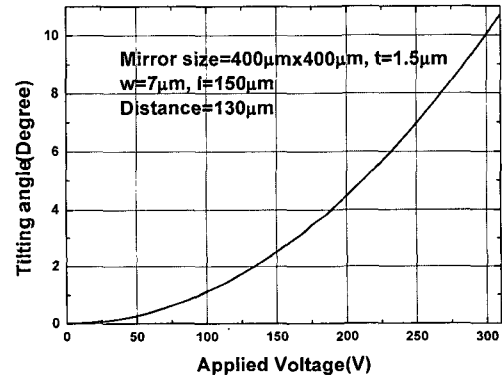
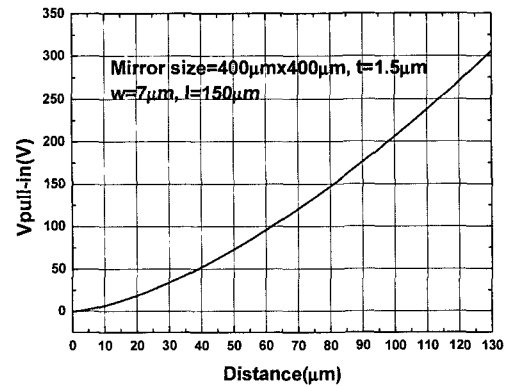


그림 2. 제안된 마이크로 미러의 구조 (a) 개략도 (b) 단면도

Fig. 2. Proposed micro-mirror structure. (a) Schematic configuration of the mirror (b) Cross-sectional view of the micro-mirror (A-B)



(a)



(b)

그림 3. 수치 모의 실험결과 (a) 인가 전압에 따른 회전각도 (b) 상부전극과 하부전극간의 거리에 따른 풀인 전압

Fig. 3. Numerical simulation results. (a) Tilt angle as a function of the applied voltage (b) Pull-in voltage as a function of the distance between the upper electrode and the bottom electrode

표 1. 마이크로 미러의 설계변수와 설계 값  
Table 1. Design parameters for the proposed micro-mirror

변수	d	W	L	t	w <sub>x</sub>	w <sub>y</sub>	l <sub>x</sub>	l <sub>y</sub>
130설계 값(μm)	130	400	400	1.5	7	3	150	60

3(b)>는 인가 전압에 따른 회전 각도와 두 전극 사이의 거리에 따른 풀인 전압을 각각 나타낸다. 본 논문에서는 10°의 회전 각을 목표로 하였으며, 이 때 요구되는 설계 변수의 값이 <표 1>에 나타나 있다.

$$T_c = \frac{\epsilon V^2 W}{2} \int_0^L \frac{x}{\left\{ \left( \frac{d}{\sin \theta} - x \right) \theta \right\}^2} dx$$

$$= \frac{\epsilon V^2 W}{2\theta^2} \left\{ \frac{L \sin \theta}{d - L \sin \theta} + \log \left( 1 - \frac{L}{d} \sin \theta \right) \right\} \quad (1)$$

$$T_m = 2 \times \frac{Gwt^3}{l} \theta \left\{ \frac{1}{3} - 0.21 \frac{t}{w} \left( 1 - \frac{t^4}{12w^4} \right) \right\} \quad (2)$$

다음으로 제안된 마이크로 미러를 제작하는 공정에 대해서 살펴보고자 한다. 먼저, 제안된 마이크로 미러의 상부전극인 미러의 제작공정이 <그림 4(a)>에 도시되어 있다. 미러를 만들기 위한 초기 기판으로 (100) 방향의 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. KOH 용액에서 마스크로서의 역할과 미러 기판으로 사용하기 위해 실리콘 웨이퍼 위에 LPCVD (low pressure chemical vapor deposition)를 이용하여 낮은 장력 (40Mpa)의 실리콘 나이트라이드 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 층을 웨이퍼의 양면에 1.5 μm 두께로 증착하였고, 미러 표면으로는 알루미늄 (Al)을 사용하였다. 미러판 아래의 실리콘을 KOH 용액에서 식각하여 <그림 4(b)>와 같이 membrane 구조를 만들고 미러판과 짐볼아래의 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 제외한 표면에 드러난 Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>를 제거하여 미러를 완성하였다. 이때 혼합가스 (CHF<sub>3</sub>:O<sub>2</sub>=50:5 sccm)와 RIE (reactive ion etching) 장비를 이용하여 Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>를 제거하였다. 다음으로 <그림 4(b)>에는 하부전극에 대한 제작공정 과정이 도시되어 있다. 하부전극을 메사구조로 만든 이유는 하부전극을 상부전극과 하이브리드 접합시킬 때 정밀한 정렬을 쉽게 하기 위한 정렬 구조체로 사용하기 위해서이다. (100) 방향의 실리콘 웨이퍼를 KOH용액에서 식각하여 빗면이 {111} 면이 되게 하여 54.74°의 경사각을 갖는 메사구조를 만들었다. 이때 KOH 용액 마스크로는

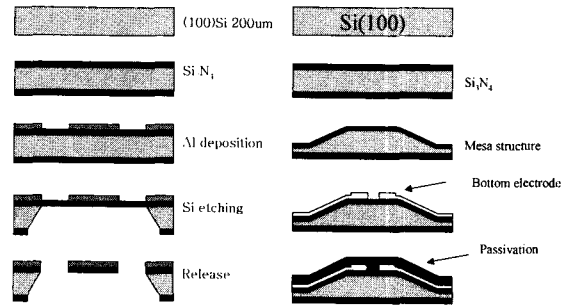


그림 4. 마이크로 미러의 제작공정 과정 (a) 미러판 (b) 하부전극

Fig. 4. Fabrication procedure for the micro-mirror. (a) Micro-mirror plate (b) Bottom electrode

LPCVD로 증착시킨 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (두께 1,500Å)를 이용하였다. KOH 용액에서 식각하여 메사구조를 만든 후 식각 용액 마스크로 사용된 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 완전히 제거하고 <그림 4(b)>와 같이 실리콘기판과 전극과의 절연을 위해 다시 실리콘기판 위에 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 증착하였다. 전극으로는 Cr/Au (200Å/ 2,000Å)를 사용하였으며, 미러가 제작된 상부기판과 하부기판을 하이브리드 접합시킬 때 상부기판인 실리콘과 4개의 하부전극이 접촉되어 전극과 전극이 단락 (short) 되는 것을 방지하기 위해 ECR (electron cyclotron resonator) 장비를 이용하여 200°C 정도의 저온에서 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 하부전극 위에 증착하였다.

### III. 실험 결과

<그림 5(a)>와 <그림 5(b)>는 제작된 마이크로 미러의 상부전극인 미러기판과 하부전극의 구조를 보여주는 전자현미경 (SEM) 사진이다. 특히, 메사구조로 제작된 하부 전극에서 전극과 본딩 패드(bonding pad)를 잇는 금속 선이 90 μm 정도의 단차를 갖는 메사의 빗면에서 끊어지지 않고 잘 연결되어 있음을 알 수 있다. <그림 5(c)>는 미러가 형성된 기판과 하부전극이 형성된 기판을 하이브리드 접합시킨 결과를 보여주는 데, 미러 아래에서 4개의 전극을 확인 할 수 있다. <그림 6>은 제작된 미러의 스위칭 특성을 보여 주고 있다. X축과 y축으로의 회전 각도는 각각 ±5.5°와 ±8.4°이며, 이때 풀인 전압은 x축 회전의 경우 380 V, y축 회전의 경우 275 V임을 알 수 있다.

미러의 x축 스위칭 특성은 모의 실험결과와 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다.

이것은 미러를 x축으로 회전시키면 미러와 짐볼이

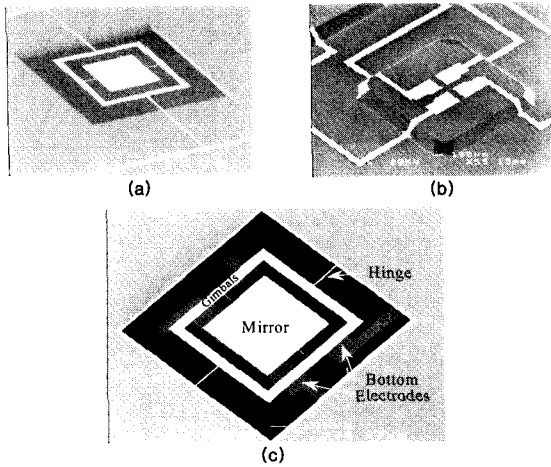


그림 5. 제작된 마이크로 미러의 SEM 사진 (a)상부전극인 미러 (b)하부전극(c)하이브리드 결합된 마이크로 미러

Fig. 5. Scanning electron micrograph(SEM) pictures of the fabricated micro-mirror. (a) Micro-mirror plate (b) Bottom electrode (c) Assembled micro-mirror

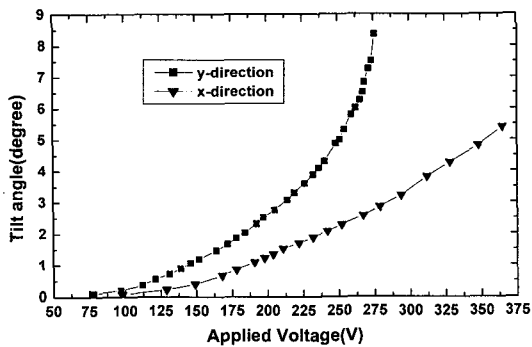


그림 6. 측정된 마이크로 미러의 회전 특성  
Fig. 6. Measured rotation characteristics of the fabricated micro-mirror.

함께 회전하는데, 이때 비대칭 형태로 제작된 하부전극이 집볼에 영향을 미쳐 미러가 x-y 방향으로 회전함으로써 x축으로의 회전 각도가 줄어들고 풀인 전압이 증가하게 되었다고 생각된다. Y축 방향으로의 미러 회전은 비대칭 형태의 하부전극에 의한 영향을 거의 받지 않기 때문에 모의 실험 결과와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 미러의 y축 방향의 회전 특성은 풀인 전압이 300 V에서 회전 각도가 10°가 되도록 설계하였지만, 실험 결과 풀인 전압 275 V에서 회전 각도 8.4°를 얻었다. <그림 7>은 이러한 이론적인 특성과 실험결과와의 차이를 유발하는 원인을 알아보기 위한 모의 실험 결

과이다. 모의실험을 통하여 분석한 결과 상부전극과 하부전극 사이의 거리를 120 μm로 했을 때 측정결과와 일치함을 알 수 있다. CCD 카메라로 미러의 동작을 확인한 결과 미러에 전압을 인가하면 미러가 -z축 방향으로 움직인 후 y축으로 회전함을 알 수 있었다. 따라서 측정된 회전각도와 풀인전압이 모의실험 결과와 다른 이유는 상부전극과 하부전극 사이의 거리가 설계된 값보다 작기 때문이라고 생각된다. 또한, 미러를 릴리스(release)시킬 때 혼합가스 (CHF<sub>3</sub>:O<sub>2</sub> = 50:5 sccm)와 RIE 장비를 이용하게 되는데 혼합가스에 의해 torsion beam의 두께와 폭도 함께 전식 식각되어 설계값 보다 얇아졌기 때문에 풀인 전압이 낮아졌다고 생각된다.

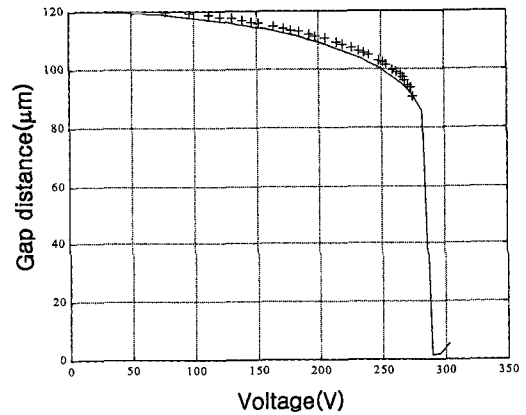


그림 7. 상부전극과 하부전극간의 거리에 따른 모의 실험결과(실선)와 측정결과(+)의 비교  
Fig. 7. Comparison between simulation (solid line) and measured (+) results as a function of the distance between two electrodes.

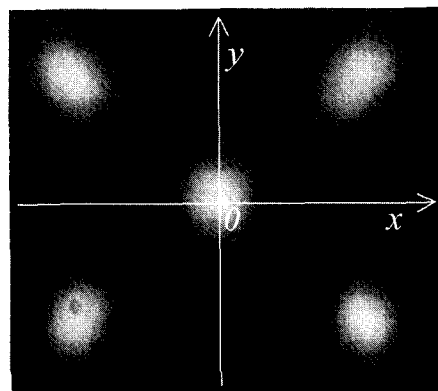


그림 8. 제작된 마이크로 미러를 이용한 평행빔 광경로 스위칭  
Fig. 8. Steering of optical collimated beam with the fabricated micro-mirror.

마지막으로, 제작된 마이크로 미러를 이용하여 실제로 광빔(optical beam)의 경로를 스위칭하는 실험을 수행하였다. <그림 8>은 광섬유로부터 출력되는 평행빔(collimated optical beam)을 미러에 입사시키고 미러에 적당한 전압을 인가하여 빔의 경로를 스위칭한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 미러를 일정 각도로 회전시킴으로써 이차원 공간에서 임의의 방향으로 빔의 경로를 스위칭 할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 얻어진 실험결과를 고려할 때, 본 논문에서 제작된 마이크로 미러는 대용량 광 크로스 커넥트 스위치의 핵심 요소인 마이크로 미러 배열을 구현하는데 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 기대된다

#### IV. 결론

본 논문에서는 대용량 NxN 광 크로스 커넥트 스위치에 응용될 수 있는 마이크로 미러를 제안하고 제작하였다. 이 마이크로 미러는 별도의 구동기 없이 충분한 회전 공간을 확보함으로써 회전각을 획기적으로 증가시킬 수 있었다. 제작된 소자의 측정결과 x축과 y축의 회전 각도는 각각  $\pm 5.5^\circ$ 와  $\pm 8.4^\circ$ 였으며, 풀인 전압은 각각 380 V와 275 V였다. 이 측정된 회전각도는 지금까지 국제적으로 보고된 결과 중에서 가장 우수한 결과 중의 하나이다.

#### 참고 문헌

- [1] L. Lin, E. Goldstein, and R. Tkach, "Free-space micromachined optical switches with submilli-second switching time for large-scale optical crossconnects," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 10, pp. 525~527, 1998.
- [2] S. Kartalopoulos, Introduction to DWDM technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.
- [3] S. Lee, L. Huang, C. Kim, and M. Wu, "Free-space fiber-optic switches based on MEMS vertical torsion mirrors," J. Lightwave Technol., vol. 17, pp. 7~13, 1999.
- [4] D. Neilson, V. Aksyuk, S. Arney, N. Basavanahally, K. Bhalla, D. Bishop, B. Boie, C. Bolle, J. Gates, A. Gottlieb, J. Hickey, N. Jackman, P. Kolodner, S. Korotky, B. Mikkelsen, F. Pardo, G. Raybon, R. Ruel, R. Scotti, L. Zhang, and R. Giles, "Fully provisioned 112x112 micro-mechanical optical cross-connect with 35.8 Tb/s demonstrated capacity," in Proc. Optical Fiber Communication Conference 2000, vol. 4, pp. 202~204, Mar. 2000.
- [5] Tae-Sik Kim, Sang-Shin Lee, Youngjoo Yee, Jong Uk Bu, Hyun-Ho Oh, Chil-Geun Park, and Man-Hyo Ha, "Electrostatic micromirror with built-in large air-gap for wide range of rotational actuation," in Optical MEMS 2001, Okinawa, Japan, pp. 99~100, Sept. 2001.
- [1] L. Lin, E. Goldstein, and R. Tkach, "Free-space

#### 저 자 소개



金泰植(正會員)

1996년 2월 : 동아대학교 전자공학과 학사. 1999년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 석사. 1999년 8월~2002년 1월 : LG 종합기술원 연구원. 2002년 3월~현재 : 한국과학기술원 박사과정



李相信(正會員)

1991년~1997년 : 한국과학기술원(KAIST) 전기및전자공학과에서 학사, 석사, 박사학위 취득. 1997년~1998년 : 미국 USC에서 postdoctoral research associate로 근무. 1998년~2001년 : LG전자기술원에서 선임연구원으로 근무. 2001년~2002년 : 미국 Novera Optics사에서 optical engineer로 근무. 2001년 9월~현재 : 광운대학교 전자공학과에서 조교수로 근무. <주관심분야 : Microwave photonics, nano photonics, 광통신용소자(도파로 및 MEMS), Bio photonics 등>