

광디스크용 마이크로미러의 설계 및 제작에 관한 연구

손덕수*, 김종완*, 임경화**, 서화일***, 이우영****

A Study on the Design and Fabrication for the Micro-Mirror of Optical Disk System

Duek-Soo Son*, Jong-Wan Kim*, Kyung-Hwa Rim**, Hwa-Il Seo***, Woo-Young Lee****

ABSTRACT

Optical disk drives read information by replacing a laser beam on the disk track. As information has become larger, the more accurate position control of a laser beam is necessary. In this paper, we report the analysis and fabrication of the micro mirror for optical disk drivers. A coupled simulation of gas flow and structural displacement of the micro mirror using the Finite-Element-Method is applied to this. The mirror was fabricated by using MEMS technology. Especially, the process using the lapping and polishing step after the bonding of the mirror and electrode plates was employed for the process reliability. The mirror size was $2.5\text{mm} \times 3\text{mm}$ and it needed about $35V$ for displacement of $3.2 \mu\text{m}$

Key Words : Micro Actuator(미세 구동기), Micro-mirror(마이크로 미러), Electrodes plates(구동 전극), Dry Deep Si Etching(건식 실리콘 식각), Anodic Bonding(양극접합), Lapping & Polishing(연마공정), Squeeze effect(스퀴즈 효과)

1. 서론

컴퓨터 기술과 네트워크 기술의 발전은 대량의 정보를 저장할 수 있는 기록장치의 필요성을 증대 시켰다. 데이터의 양이 급격히 증가함에 따라 고밀도 대용량의 저장매체가 요구되고 있으며 이에 관한 활발한 연구개발이 진행되고 있다.

DVD 나 CD 같은 광기록장치는 고밀도 기록 및 재생이 가능하고 탈취성이 뛰어나 기억매체로 폭 넓게 사용되고 있으며, 이러한 광기록장치는

디스크 트랙에 레이저 빔을 위치시켜 정보를 읽는데 정보의 대용량화에 따라 저장밀도가 높은 광기록장치가 사용되면서 더욱 정밀한 레이저 빔의 위치제어가 필요하게 되었다.

Fig. 1 은 근거리 광기록방식의 구조를 나타내는 것으로 근거리 기록방법(Near Field Recording Method)은 기존 광디스크 시스템의 원거리 기록방법에 비해 광픽업을 약 $50 \sim 150\text{mm}$ 로 광디스크 표면에 매우 인접되게 위치시켜, 초고밀도 기록 또는 재생시키는 기록 방법이다. 트랙 폭이 매우 좁

2002년 4월 24일
* 한국기술교육대학교 대학원
** 한국기술교육대학교 제어시스템공학과
*** 한국기술교육대학교 정보기술공학부
**** 한국기술교육대학교 기계공학부

아지게 되어 1 단 구동기로는 트랙 방향의 제어가 불가능하므로 2 단 구동기 구조(Double Actuator Type)가 필요하다. 이에 따라 조동 구동기(Coarse Actuator)로 기존 VCM(Voice Coil Motor)을 사용하면서 그 위에 탑재할 Fig. 2 와 같은 구조의 미세 구동기(Micro Actuator)가 필요하게 된다.

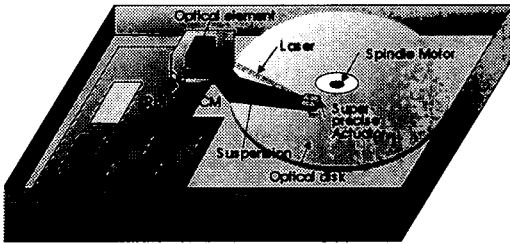


Fig. 1 Structure of the near field recording method

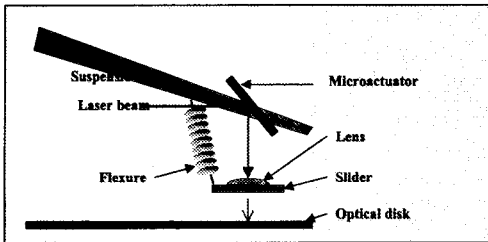


Fig. 2 Structure of the micro actuator

최근에 고밀도의 광기록장치용 미세 구동기에 대해서 많은 연구 개발이 이루어지고 있으며, 그 중에서 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술을 이용한 마이크로 미러⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾는 정밀한 제어가 가능하고 픽업헤드에 탑재될 수 있을 정도로 충분히 작을 뿐만 아니라, 작은 소비 전력을 갖는 장점이 있다.

이러한 마이크로 액츄에이터는 가동부와 정지부의 간격이 수 μm 정도로 작기 때문에 공기의 점성저항, 즉 스퀴즈(Squeeze)효과가 크게 되고, 이로 인하여 가동부를 저전압으로 고속 구동 시키는 것이 곤란한 경우가 있다.⁽³⁾

수 mm^2 정도의 미러를 내부 응력에 의한 휨 없이 평평하게 제작하기 위해서는 기존의 박막증착 방법으로 형성된 막은 사용할 수 없다. 따라서, 미러판으로 복원력이 우수한 단결정 실리콘 웨이

퍼를 주로 사용하고 있으며, 미러판과 구동전극이 각각의 웨이퍼에 제작되어야 하므로 접합공정을 필요로 하게 된다. 기존의 제조 공정⁽¹⁾⁽³⁾은 미러판과 구동전극을 각각 제작함으로써 미러판의 파손 위험이 크고, 재현성이 떨어진다. 또한 접합시 재현성 문제와 접합간격 및 정렬이 어렵다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 미러판의 구조해석 및 운동특성과 가동부와 정지부 사이의 미소 공기막의 점성 및 압축효과를 고려한 고체-유체 커플링 시스템에 대한 유한요소 수해를 수행하여 공기막의 스퀴즈효과가 미러판의 운동특성에 미치는 영향을 분석하며, 또한 제조공정에 있어서 신뢰성과 재현성을 높이기 위하여 미러판과 전극부를 양극접합공정에 의하여 접합하고, 마지막으로 미러면을 릴리즈하는 새로운 공정을 연구하였다. 또한, 연구된 공정에 따라 미러를 제작하고 그 동작 특성을 조사하였다.

2. 마이크로 미러의 설계 및 해석

2.1 구조설계

Fig. 3 은 본 연구의 정전형 마이크로 미러의 구조를 나타낸 것으로, 가동부와 정지부 사이의 정전력(Electro-Static Force)과 비틀림 빔 스프링의 복원력 사이의 관계에 의해 미러는 고속주파수로 회전하게 된다. 비틀림 빔 스프링은 응력집중의 분산을 위해 “ π ”자형 구조를 갖도록 설계하였다.

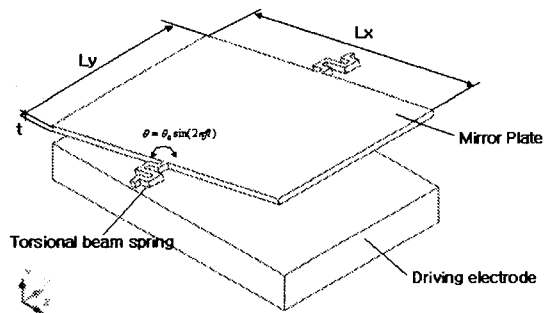


Fig. 3 Structure of the electro-static micro mirror

Table 1 은 본 연구에서 설계한 마이크로미러의 주요사양을 나타내고 있다.

Table 1 Specification of the micro mirror

Micro Mirror	Lx	3.0mm
	Ly	2.5mm
	t(thickness)	60μm
	θ(angle range)	±0.25°
	b'(width of torsional beam spring)	20μm
	l(length of torsional spring)	170μm

2.2 구동원리

정전형 마이크로 미러는 미러판과 구동전극사이의 정전력과 비틀림 빔 스프링의 복원력 사이의 관계에 의해 회전하게 된다. 직류 바이어스 전압인 V_{dc} 는 마이크로 미러의 구동시에 항상 양쪽 전극에 동일하게 가해지고, V_{ac} 는 구동전압이다. Fig. 4(a)에서 $V_{dc} + V_{ac}$ 가 구동전극 1 에 가해지고 $V_{dc} - V_{ac}$ 가 구동전극 2 에 가해지면 미러판은 구동전극 1 방향으로 회전하고, Fig. 3(b)에서 $V_{dc} - V_{ac}$ 가 구동전극 1 에 가해지고 $V_{dc} + V_{ac}$ 가 구동전극 2 에 가해지면, 미러판은 구동전극 2 방향으로 회전한다.

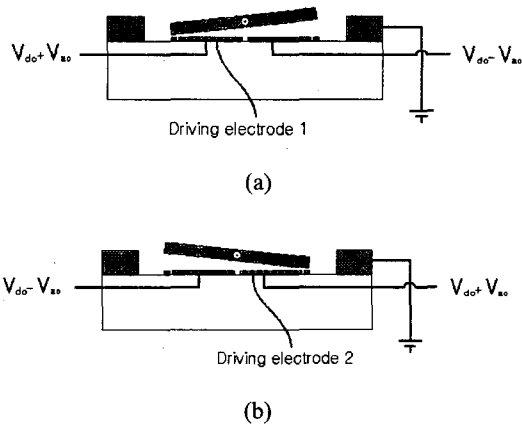


Fig. 4 Operation of the electrostatic micro mirror

미러면과 구동전극 사이의 정전력에 의한 힘은 식 (1)과 같다.

$$F_d = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \frac{L_x L_y V^2}{d^2} \tag{1}$$

여기서 $\epsilon_0 \epsilon_r$ 은 실리콘의 유전율, $L_x L_y$ 는 전극의 면적, V 는 구동전극에 인가한 전압, d 는 미러면과 구동전극사이의 간격이다. 미러가 받는 정전력에 의한 토크는 회전축으로부터 거리와 전극의 면적에 대해 적분해서 식 (2)와 같이 구한다.⁽³⁾

$$T_e = \int x \cdot \left[\frac{dF_d}{dA} \right] dA \tag{2}$$

그리고, 기계적인 복원 토크는 스프링의 탄성계수에 의한 스프링 상수가 K_ϕ 일 때 식(3)과 같이 된다.

$$T_m = -K_\phi \phi \tag{3}$$

미러는 구동전극에 가해진 전압으로부터 얻어지는 정전력에 의한 토크에 의하여 회전하게 되며, 전압을 가하지 않을 경우 기계적인 스프링의 복원 토크에 의하여 원래의 방향으로 회전하게 된다.

식 (2)로부터 구한 정전력에 의한 토크와 식 (3)으로부터 구한 스프링의 복원 토크가 평형을 이룰 때, 즉 $|T_m = T_e|$ 일 때 미러의 정상 상태의 회전각을 구할 수 있다.

2.3 유한요소해석

마이크로 미러의 고유진동주파수 및 힌지부에 발생하는 응력분포를 알아보기 위하여 기본 구조 해석을 수행하였다.

또한, 해석 대상인 마이크로미러는 구동부와 정지부 사이에 미소의 공기막이 있으며, 구동부는 Si (실리콘) 재질로 되어 있으면서 높은 주파수로 회전운동을 한다. 따라서, 구동부의 운동에 기인하는 공기막의 운동특성을 관찰하기 위해서는 고체-유체의 커플링 해석방법에 의하여 해를 구하여야 한다.⁽²⁾

Fig. 5 는 유체-고체 커플링 해석 절차를 나타낸 것으로 각 time step 에서 고체 구조물의 시뮬레이션 결과를 구한 후 이를 유체모델의 경계조건 또는 입력조건으로 전환하여 유체요소에 대한 시뮬레이션을 수행하게 되며, time step 을 계속 증가시키며 전체 동작주기에 대하여 계산을 하게 된다.

본 연구에서는 ANSYS/FLOTRAN 유한요소해석 패키지를 사용하여 sequential coupled filed analysis 방법으로 해석을 수행하였다.

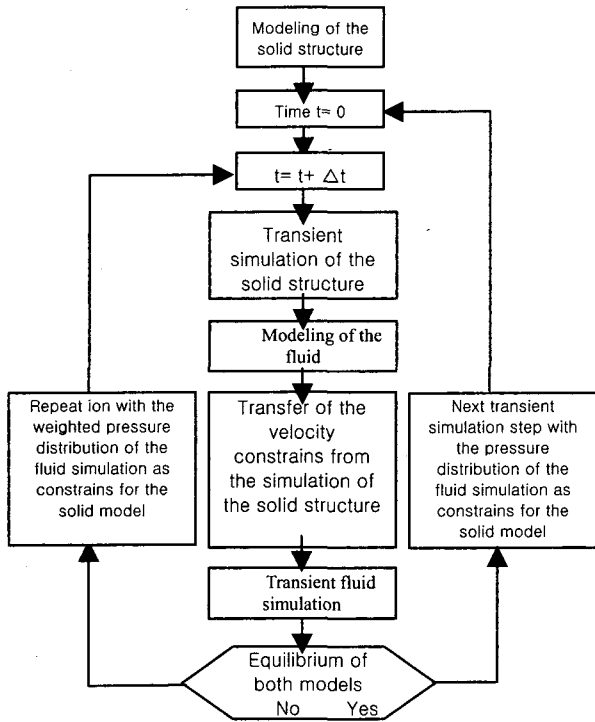


Fig. 5 Principle tructure of fluid-structural-coupling

2.3.1 기본 구조해석

미러판의 기본 구조해석을 위해 유한요소 해석을 하였다. Fig. 6 은 미러판의 첫 번째 모드형상, Fig. 7 은 힌지부에 발생하는 응력분포를 나타낸 것이다.

해석결과 비감쇠 고유진동주파수는 2862Hz 로 계산되었으며, 힌지에 발생하는 최대등가응력은 약 $9.2 \times 10^7 N/m^2$ 이다. 미러판의 소재인 실리콘 (Si)의 항복응력 $7 \times 10^9 N/m^2$ 의 약 1/76 에 해당하는 수준이므로 피로하중이하의 범위에 해당되어 충분히 안전한 설계가 이루어졌다고 판단된다.

2.3.2 구동판의 운동주파수에 의한 영향

구동판인 미러판의 운동주파수에 따른 영향을

알아보기 위하여 3 가지의 해석 case 를 설정하였다. 해석은 구동판이 $\theta = \theta_0 \sin(2\pi ft)$ 로 진동하는 경우 공기막의 압력분포를 구하고, 압력변동에 의하여 공기막이 구동판에 미치는 토크를 계산하게 된다.

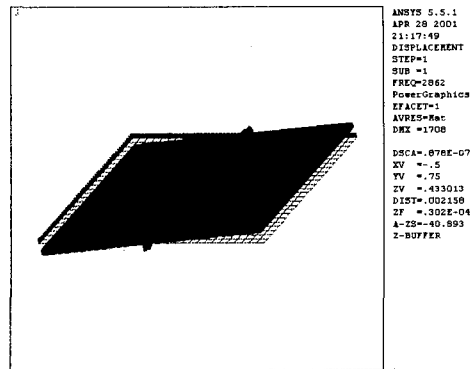


Fig. 6 Mode feature

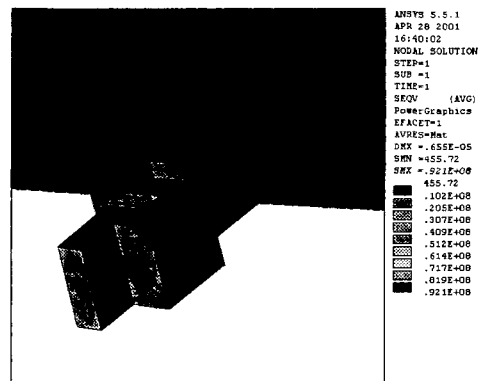


Fig. 7 The stress distribution at torsional beam spring

Fig. 8 은 구동주파수가 $10^2, 10^3, 10^4 Hz$ 일 때 구동판에 분포하는 압력분포를 나타낸 것이다.

Fig. 9 에서 볼 수 있듯이 구동주파수가 증가함에 따라 상당히 큰 비율로 공기막의 최대압력이 증가되는 것을 볼 수 있다.

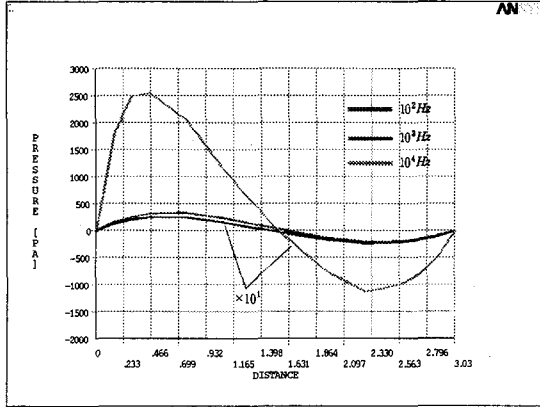


Fig. 8 Pressure distribution at various frequency

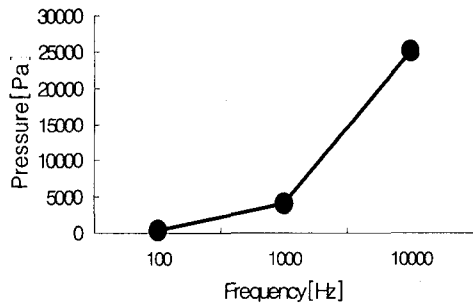


Fig. 9 Maximum pressure at each vibration frequency

3. 제조공정

3.1 마이크로미러의 공정설계

지금까지의 미러 제조 공정들은 $100\mu\text{m}$ 이하의 Si 웨이퍼를 사용하여 미러판을 제작하거나, 일반 Si 웨이퍼를 습식 식각으로 식각해 미러판을 제작하였다. 따라서, 미러판과 구동 전극이 각각의 웨이퍼에 제작되어야 하므로, 각각의 웨이퍼에 제작된 미러면과 구동 전극의 웨이퍼간 접합 공정은 반드시 필요하다.

접합 기술에는 실리콘 직접 접합과 실리콘-유리 양극 접합 기술이 있으며, 실리콘 직접 접합 공정에서는 1000°C 가량의 높은 열처리가 필수이므로 금속 공정 이후에는 적용할 수 없다. 기존의

미러 제조공정에서는 Water Glass Bonding 이나⁽¹⁾ 에폭시 접착제를 이용하는 방법이 사용 되었으나⁽³⁾, 재현성이 떨어지며 정밀한 웨이퍼 정렬과 미러면과 구동 전극간의 간격제어가 어려운 문제점이 있었다. 본 연구에서는 실리콘-유리 양극 접합 기술을 이용하여 웨이퍼간 접합을 행하기로 한다. 따라서 Glass 웨이퍼에는 구동전극이 제작되고, 실리콘 웨이퍼에 미러판을 제작한다. 그러나, 미러판의 두께가 수십 μm 에 불과 하고, 구동전극의 높이와 간격을 합하여도 미러판이 제작될 실리콘 웨이퍼의 두께는 $100\mu\text{m}$ 이하를 요구한다. 이러한 $100\mu\text{m}$ 이하의 웨이퍼를 식각, 세정 등의 공정을 거칠 경우 파손될 위험이 매우 크고, 접합공정도 재현성이 떨어지는 문제점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 웨이퍼간 접합을 행한 후 웨이퍼 손실 공정(Lost Wafer Process)에 의하여 미러판의 두께를 정의 하는 공정을 도입하고자 한다. 이러한 공정은 본 연구에서 새롭게 제안한 공정으로 모든 공정의 마지막 단계에 미러판을 형성하게 되므로 기존의 공정에서 발생하던 미러판에 대한 위험요소, 예를 들어 미러판으로 사용하는 DSP(Double Side Polished) 웨이퍼의 파손, 공정 중 미러판과 환지의 파손, 접합의 어려움, 접합시의 부정확한 정렬의 문제를 해결할 수 있는 공정이다.

이상의 과정을 요약하면, 본 연구의 마이크로미러의 제조공정은 단결정 실리콘 웨이퍼와 구동 전극이 제작된 유리 웨이퍼를 양극 접합 공정에 의하여 접합한다. 접합 후 미러판의 두께를 형성하기 위한 연마에 의한 웨이퍼 손실 공정과 미러판을 형성하는 건식식각 공정을 실행하여 마이크로 구조물을 완성한다.

3.2 구동 전극과 미러판 형성공정

Fig. 10 은 구동전극의 제작공정을 나타내고 있다. 구동전극은 Pyrex 유리 웨이퍼 위에 Lift-off 공정을 이용해 제작하였다.

구동전극을 Pyrex 유리 웨이퍼에 제작하기 위해서 전극 물질인 Au/Cr 을 전자총 증착(E-gun Evaporation) 방법에 의하여 증착하고, Lift-off 법으로 패턴을 형성하였다.

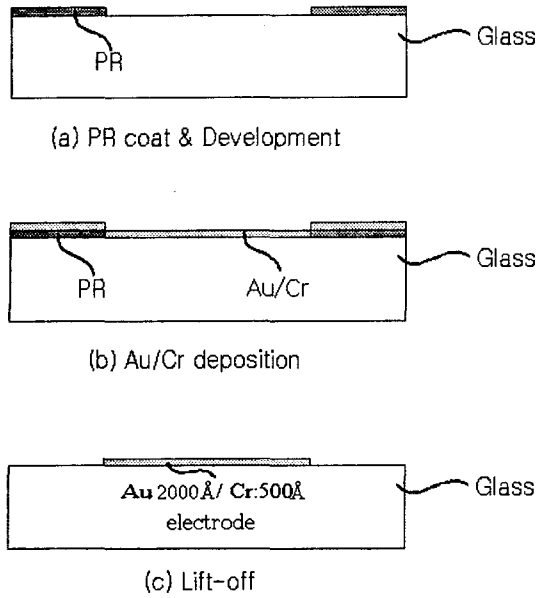


Fig. 10 Fabrication process of the electrodes plates

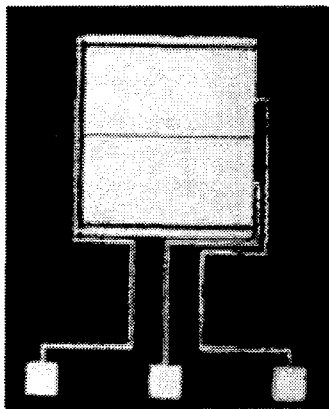


Fig. 11 Photograph of the electrodes plates

Fig. 11 은 제작된 구동전극의 광학현미경 사진이다. 양쪽에 한 개씩 두개의 전극이 있고, 단락방지 전극이 전극부의 끝 단에 있다. 각각의 전극과 단락방지 전극에 본딩 패드가 있다

Fig. 12 은 미러판 제조과정중에서 미러판과 구동전극과의 간격 형성공정이다. 실리콘 웨이퍼와 유리 웨이퍼간의 양극접합을 행하기 위하여 유리 웨이퍼에 제작된 구동전극에 해당하는 부분과 배선을 위한 패드(Pad)부분을 미리 건식 식각하여야

한다. 이때 식각된 깊이는 미러와 구동전극과의 간격이 된다.

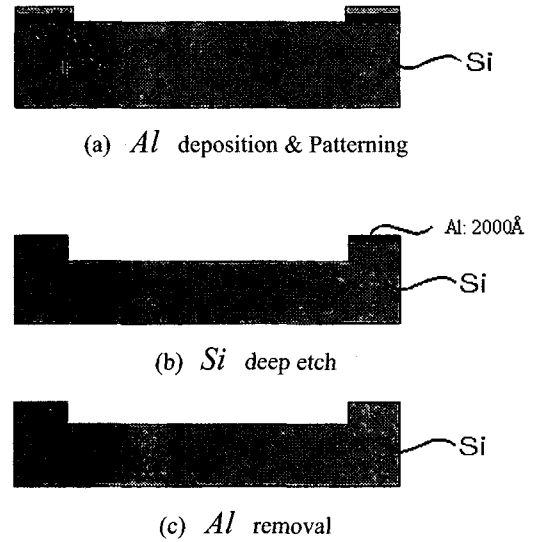


Fig. 12 Fabrication process of the mirror plates

식각은 ICP Deep Si Etcher (제작회사: Plasma-Therm) 장비를 사용하였으며, 식각 마스크로 Al 을 이용한다. 식각된면은 미러판의 뒷쪽면으로 구동전극과 접하는 면이 되므로, 정확한 식각 깊이의 조절과 식각된 면의 균일도의 유지가 중요하다. 식각된 깊이는 약 $9\mu\text{m}$ 이었고, 최대편차는 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 이내이다.

3.3 양극 접합 및 미러면 형성공정

마이크로 미러의 제작 공정 중에서 양극 접합공정이 가지는 장점 중 하나는 패턴의 정렬이다. 기존의 접합공정은 주로 수동으로 패턴 정렬을 하여서 오차가 많았다. 반면, 양극접합에서는 양면 정렬이 가능한 웨이퍼 전용 정렬기에서 웨이퍼의 패턴 정렬을 할 수 있다.

Fig. 13 은 미러면 형성공정이다. 접합할 두 웨이퍼의 패턴을 정렬하고, 400°C 가량의 열과 1000V 의 전압을 동시에 가하여 실리콘-유리 양극 접합 공정(Si-Glass Anodic Bonding)을 수행하였다. 실리콘-유리 양극 접합이 이루어진 웨이퍼를 실리콘 웨이퍼 부분을 Lapping & Polishing 공정을 이용하여 미러면의 두께를 정의하였다. Lapping &

Polishing 공정 후 미러판 부분에서 다소의 변형은 관찰되었으나 본 연구의 미러 구조 제조에는 영향이 없었다. 제작된 미러판의 두께는 $60\mu\text{m}$ 이었다.

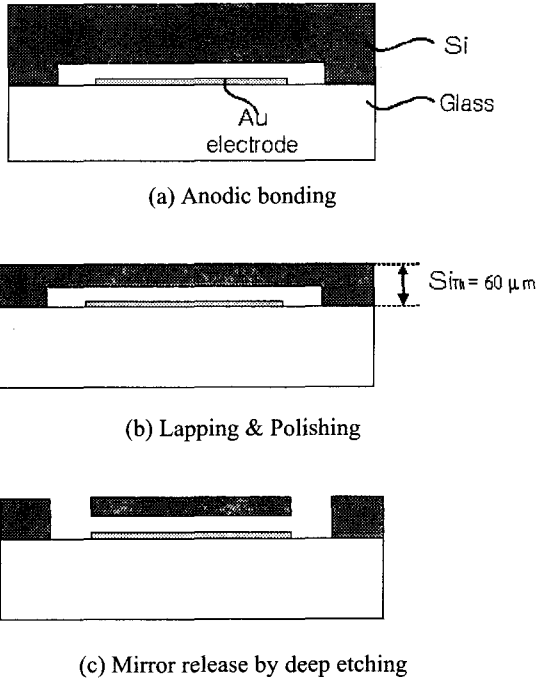


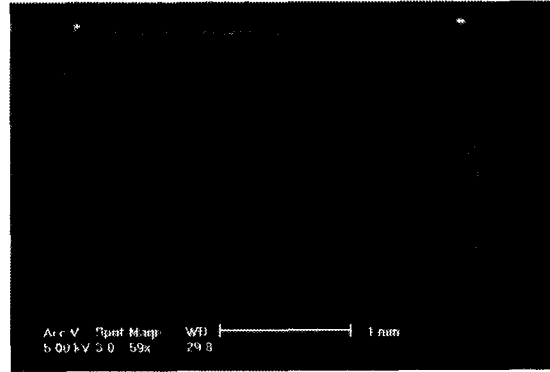
Fig. 13 Fabrication process of the mirror formation

Deep Etching 에 의해서 미러 및 힌지 형태를 완성하였으며, 미러의 크기는 $3.0\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 였다. "ㄴ" 자형 힌지 부분의 폭은 $20\mu\text{m}$ 이었다. Fig. 14 는 완성된 마이크로 미러의 전자현미경 사진이다. (a)는 전체 사진이고, (b)는 "ㄴ"자형 힌지 부분을 나타내었다.

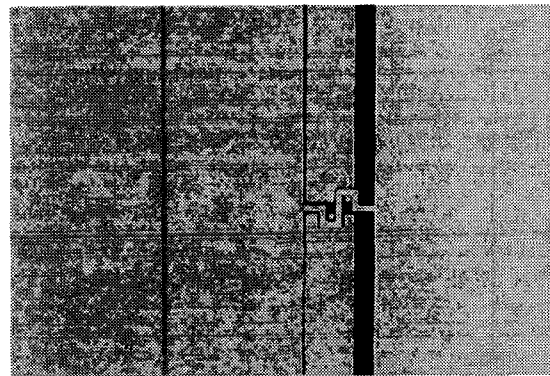
4. 측정 및 검토

4.1 정전압 특성

본 연구에서 제작한 마이크로 미러는 미러면과 미러면 아래의 두개의 구동 전극 사이에 전위차를 주어 그로 인해 발생한 정전력으로 미러면을 움직이게 하는 정전력 구동 방식이다.



(a) Mirror part



(b) Hinge part

Fig. 14 SEM photograph of the micro mirror

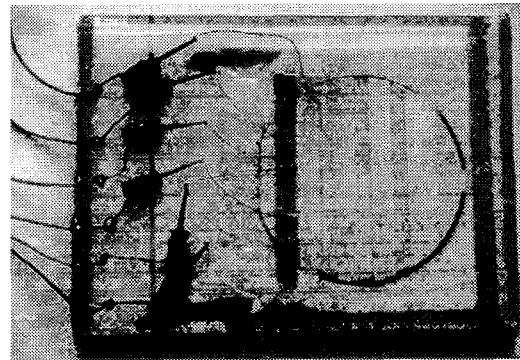


Fig. 15 The micro mirror for measurement

Fig. 15 는 특성측정을 위해 준비된 마이크로 미러 웨이퍼의 사진을 나타내었다. 정전압 특성을

알기 위하여 레이저 변위 센서를 이용하여 전압 대 변위를 측정 하였다.

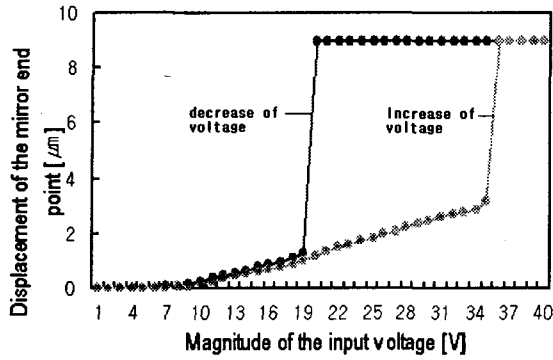


Fig. 16 Displacement of the mirror end point

미러판과 한쪽 전극에만 정전압을 인가하였고, 그 결과 변위는 Fig. 16 와 같이 인가전압 35V 까지 증가 하였으며, 이때의 변위는 약 $3.2\mu\text{m}$ 이고 그 이상의 전압에서는 최고 변위 값인 $9\mu\text{m}$ 을 보였다. 하강문턱 전압은 20V 이고, 상승문턱 전압은 35V 이다.

4.2 주파수 응답

마이크로 미러의 동적응답 특성을 측정하기 위하여 Fig. 17 과 같이 실험 장치를 구성하였다. 정현파 이동(Sine-sweeping) 가진하면서 레이저 변위 센서에서 나오는 신호를 동적 신호 분석기(Dynamic Signal Analyzer)에 입력하여 주파수 응답 함수를 구하였다.

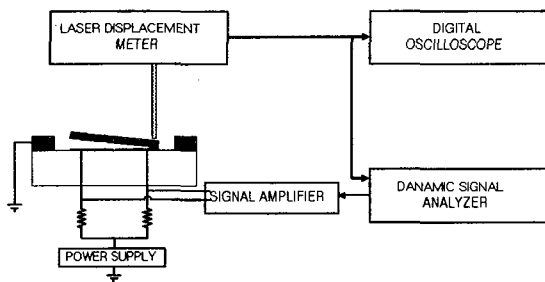


Fig. 17 Experimental setup for operation of the micro mirror

마이크로 미러의 양쪽 전극에 항상 동일한 직류 바이어스 전압과 위상이 정확히 반전되고 동기가 일치하는 신호를 입력하기 위하여, 동적 신호 분석기의 정현파 이동 신호를 하나의 신호 증폭기로 증폭하여 전압 분배기 회로를 거쳐 양쪽의 전극에 구동전압으로 인가하였다.

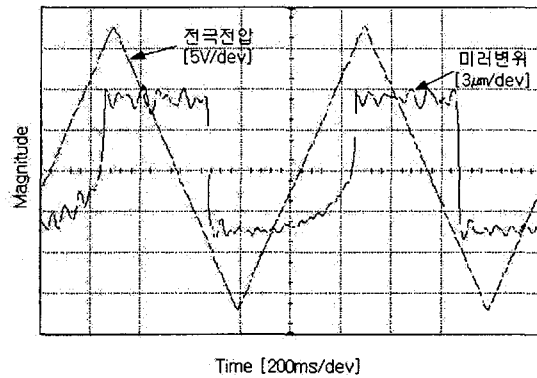


Fig. 18 Waveform response of the mirror by the triangle wave

Fig. 18 은 구동 실험 장치 구성도와 같이 구성하고, 한쪽 전극에 V_{dc} 를 20V 인가하고, 주파수 1Hz 의 삼각파를 신호 증폭기를 통하여 인가 하였을 때의 출력 파형이다.

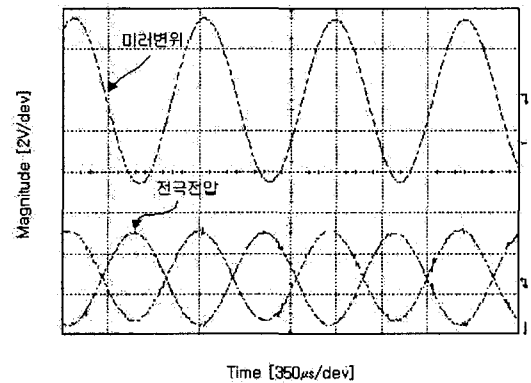


Fig. 19 Waveform response of the mirror by in the sine wave

Fig. 19 는 양쪽 전극에 직류바이어스전압을 20V 와 5V 정현파를 반전된 형태로 인가했을 때

미러 속도의 변화를 나타낸 것이다. 입력전압 주파수는 2KHz였으며, 입력전압과 일치해 미러가 움직이고 있다는 것을 보여준다.

여러 주파수를 바꾸어 반복 실험을 해보았고, 주파수 응답을 측정하기 위하여 정현파 이동 신호를 인가하여 동적 신호 분석기를 통하여 주파수 응답 함수를 구하였다.

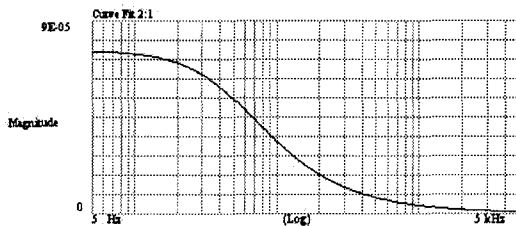


Fig. 20 Waveform frequency response of the micro mirror

Fig. 20 은 동적 신호 분석기를 통하여 구한 주파수 응답 함수의 그래프이다. 주파수가 증가함에 따라 응답이 급격히 감소하고 있으며, 고유진동 주파수도 예상치보다 매우 낮게 나타나고 있다. 이는 미러면과 구동전극간의 공기저항에 의한 스퀴즈(Squeeze)효과 때문이라 생각된다.⁽²⁾⁽⁵⁾ 이의 해결을 위해서는 전극부에 복수개의 홈(groove)을 설치하는 것 등을 통해 스퀴즈효과를 저감 시켜야 할 것으로 생각된다.

5. 결론

광 기록장치의 2 차 위치 제어용 초정밀 구동기 적용을 위해 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술을 이용한 마이크로 미러를 설계, 해석 및 제조하고 그 특성을 조사하였다.

미러판의 기본 구조해석결과 해석결과 비감쇠 고유진동주파수는 2862Hz 로 계산되었으며, 힌지에 발생하는 최대등가응력은 약 $9.2 \times 10^7 N/m^2$ 충분히 안전한 설계가 이루어졌다고 판단되며, 구동주파수가 증가함에 따라 공기막의 스퀴효과에 의한 압력 값이 매우 큰 비율로 증가한다.

마이크로 미러는 미러판 부분과 구동전극 부분으로 이루어졌다. 미러판은 건식 실리콘 식각(Dry Deep Si Etching)에 의해서 제조되었고, 그 크

기는 $3.0mm \times 2.5mm$ 였다. 구동전극은 글라스 웨이퍼(Pyrex Glass Wafer)에 제조되었다. 글라스 웨이퍼와 실리콘 웨이퍼는 양극접합(Anodic Bonding)에 의하여 접합되었으며, 두 부분의 간격은 약 $9\mu m$ 이었다. 실리콘 웨이퍼 부분의 연마공정(Lapping & Polishing)에 의해서 미러판의 두께를 정의하고, Deep Etching에 의해서 미러판을 릴리즈하였다.

본 연구에서의 미러 제조공정은 접합공정이 이루어지고 난후에 미러면의 두께 및 형태를 형성함으로써, 매우 얇은 실리콘 웨이퍼를 사용하거나, 완성된 미러판을 가지고 다른 공정을 진행할 때 실리콘 웨이퍼 혹은 미러판의 흰지 부분이 파손될 가능성을 줄일 수 있었으며, 접합공정에서 미러판과 구동전극의 정밀한 정렬 및 간격으로 조립이 가능하였다.

마이크로 미러의 기본적인 동작특성인 인가전압대 동작 변위를 알기 위해서 레이저 변위 측정기를 이용하여 측정하였다. 최저 구동전압인 8V에서 변위를 갖기 시작하고, 35V에서 변위는 $3.2\mu m$ 이고 그 이상의 전압에서는 미러면이 구동전극에 닿아 최고 변위인 $9\mu m$ 를 보였다. 또한 전극에 정현파 전압을 인가했을 때 시간지연없이 전극전압과 일치하는 움직임을 나타내었다. 동적 특성을 조사한 결과 주파수가 증가함에 따라 응답이 급격히 감소하였는데 이는 공기저항에 의한 스퀴즈 효과 때문일 것이라 판단되며, 이의 해결을 위한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 1999-1-304-007-3) 지원으로 이루어졌으며, 재단의 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. M. Sekimura, M. Yonezawa and K. Uchimar, "Electrostatic torsion mirror," Technical Digest of the 18th Sensor Symposium, pp. 167-170, 1988.
2. D.S.Son, J.W.Shim, H.I.Seo, K.H.Rim and W.Y.Lee, "Study on the design of the micro-mirror considering the squeeze effects of gas film," Journal of the Microelectronics & Packaging Society, Vol. 7, No.1,

- pp. 29-34, 2000.
3. J.H.Chon, H.K.Chang and Y.K.Kim, "Design and fabrication of mirror for optical storage," Proceedings of 99 Conference of the Korean Sensors Society, pp. 173-176, 1999.
 4. D.L.Dickensheets and G.S.Kino, "Silicon micromachined scanning conformal optical microscope," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 38-47, 1998.
 5. N. Uchide, etc, "Damping of Micro Electrostatic Torsion Mirror caused by Air film Viscosity," 일본정밀공학회지, Vol. 65, No. 9, pp. 1301-1305, 1999.