

미세 트래킹을 위한 마이크로미러 액츄에이터의 구동 특성

이영주[†], 부종욱[‡], 김수경[‡]

ACTUATION CHARACTERISTICS OF A MICROMIRROR FOR FINE-TRACKING

Youngjoo Yee[†], Jong Uk Bu[‡], and Soo-Kyung Kim[‡]

ABSTRACT

A micromirror actuated by piezoelectric unimorph cantilevers is proposed as a fine-tracking device for high-density optical data storage. Bending motions of the metal/PZT/metal unimorphs translate an integrated micromirror along the out-of-plane vertical direction. The micromirror alters the optical path of the incident laser beam and linearly steers the reflected laser beam by its out-of-plane parallel actuation. Numerical analysis shows that the actuated micromirror can satisfy the tracking speed imposed by the requirement on the access time for the high-density optical data storage up to few tens Gbit/in² owing to the light mass of the micromirror. In this paper, preliminary characteristics of the micro-machined PZT actuated micromirror (PAM) are reported. Only a 360 nm-thick PZT film deposited by sol-gel process shows both good electrical and mechanical characteristics for the fine-tracking actuator. The micromirror can be easily actuated up to several micrometers under low voltage operation condition well below 10 volts.

1. 서론

최근 MEMS(micro electro mechanical systems) 기술을 이용한 초고밀도 정보 저장 장치에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 마이크로머시닝 기술로 미세 가공된 AFM (atomic force microscopy), NSOM(near-field scanning optical microscope) 프로브, SIL(solid immersion lens) 등을 이용한 정보 저장 장치에의 응용은 최근 연구 동향의 좋은 예라 할 수 있다 [1-3]. 그러나, 이러한 연구들은 주로 저장 용량에 관계되는 데이터 비트의 크기를 100 nm 이하로 축소 시키는 방향으로 초점이 맞추어져 있다. 특히, 광 정보 저장 장치의 경우 기존의 광학계를 이용한 콤팩트 디스크(CD)나 디지털 다기능 디스크(DVD) 등은 픽업 광학계의 회절 특성 때문에 기록 밀도를 증가 시키는데 한계가 있다. 이러한 광학계의 회절 한계를 극복하여 광 정보의 저장 밀도를 평방 인치 당 수십 기가바이트 이상으로 증가 시키는 기술이 광 근접장(optical near-field) 기술이며 [4], 광 기록 밀도는 광 디스크의 초 해상 기술(super resolution technique)로 더욱 증가 시킬 수 있다고 알려지고 있다 [5].

한편, 기록 밀도에 대응하는 트랙 피치 이하의 정밀도로 픽업 장치의 위치를 정확히 제어하는 기술 역시 고밀도 정보 저장 장치에 있어 중요한 요소가 된다. MEMS 소자가 본질적으로 내포하는 정밀 구동 특성, 빠른 응답성, 초 소형 경량화의 장점 때문에 마이크로머시닝으로 제작되는 액츄에이터들은 자기 하드디스크 드라이브의 미세 트래킹(fine-tracking) 기구로 연구되고 있다 [6].

본 논문에서는 초소형 구동 미러(actuated micromirror)를 고밀도 광 정보 저장 장치의 미세 트래킹 소자로 제안한다. 그림 1은 스윙 암(swing arm)

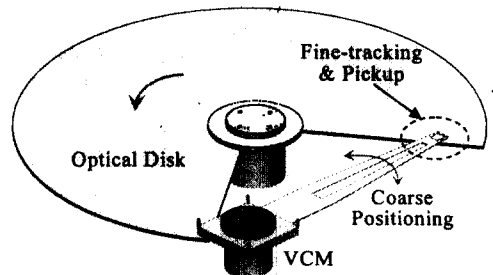


Fig. 1. Schematic drawing of a high-density optical data storage using dual-servo tracking mechanism.

[†]LG 전자기술원 소재재료 연구소

[‡]LG 전자 디지털 미디어 연구소

형태의 조동 구동기(coarse actuator)와 미세 트래킹 장치로 구성되는 이른바 이중 서보(dual servo) 제어를 이용한 광 정보 저장 장치의 구동 기구의 개략도이다. 이 그림에서 점선으로 표시된 미세 트래킹 및 픽업 장치는 미세 평행 변위를 갖는 마이크로미러 구동기를 이용하여 구성된다. 마이크로미러의 정밀 구동을 위해서 미러와 집적화 되어 제작되는 박막형 PZT 구동기를 이용하였다. 본 논문에서는 고밀도 광 정보 저장 장치의 미세 트래킹을 위해 제안한 PZT 구동 마이크로미러(PZT actuated micromirror: PAM) 소자의 설계 및 제작 공정을 소개하고, 제작된 PAM의 구동 특성 및 광학적 특성에 관한 측정 결과를 정리하였다.

2. 레이저 빔의 광축 변위 제어

그림 1에 표시된 미세 트래킹 및 픽업 장치의 개념도를 그림 2에 도시하였다. 이 그림에서 원으로 표시된 구동 마이크로미러 모듈은 광원으로부터 방출되는 레이저 빔의 광 경로를 픽업 헤드의 집속 광학계로 변경해주며 또한 광 축의 위치를 정밀 제어하는 미세 트래킹 기능을 수행하게 된다.

MEMS 기술로 제작된 마이크로미러 소자는 바코드 스캐너 [7], 화상 표시 장치 등 다양한 응용 사례가 보고되고 있으나, 이 들을 고밀도 광 정보 저장 장치에 적용하기에는 구동 정밀도가 매우 낮다. 또한, 이 들 대부분은 정전력(electrostatic force)을 이용한 구동 방식을 이용하므로 구동 전압이 수십 볼트 이상으로 정보 저장 장치에 채용하기에는 실용적이지 않다는 단점이 있다. 본 논문에서는 압전체인 PZT를 구동기로 이용하여 구동 전압을 수 볼트 수준으로 낮추고, 마이크로미러의 구동을 미러 면에 수직인 방향으로 평행하게 설계함으로써 구동 정밀도를 향상시키고자 하였다. 그림 3은 PZT 박막 구동기가 일체화된 마이크로미러의 구조

를 보여 준다. 이 그림에서 정사각형의 마이크로미러 박판은 미러를 기준으로 대칭적으로 위치한 네 개의 외팔보(cantilever) 상에 형성된 PZT 구동기(PZT unimorph)에 의해 현가 되며, 네 개의 구동기와 미러는 얇은 회전 힌지(torsion hinge) 구조로 연결되어 외팔보 구동기의 굽힘(bending) 변형이 마이크로미러의 수직 방향 평행 변위로 변환되도록 하였다. 그림 3에 표시된 각각의 외팔보 형태의 PZT 박막 구동기의 굽힘 변형은 PZT 박막의 상하부에 형성된 전도체에 인가된 전압에 의해 유기되는 압전 현상(piezoelectric effect)에 의해 발생하게 된다. 즉, 그림 4와 같이 외팔보 형상으로 릴리즈(release)된 실리콘 질화막 상에 형성된 PZT 박막의 상하부에 이 그림의 (b)와 같이 전압 V_2 가 인가되면, 인가된 전계의 방향과 수직인 방향으로 PZT의 수축이 발생하며, 이로 인하여 그림에 표시된 바와 같이 수직 방향의 굽힘 변형이 일어나게 되어 힌지의 변위 h 가 발생하게 되며, 이 변위 h 는 힌지에 연결된 마이크로미러의 평행 변위로 나타나게 되는 것이다. 외팔보 구조는 두께 방향의 응

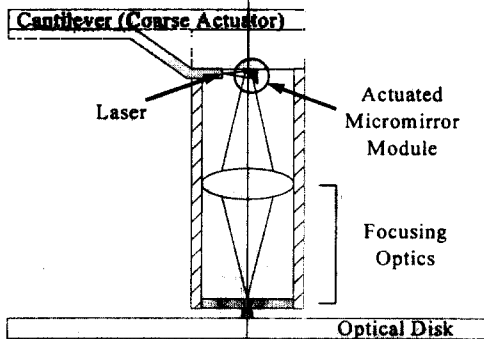


Fig. 2. Pickup head and fine-tracking mechanism using the actuated micromirror for high-density optical data storage.

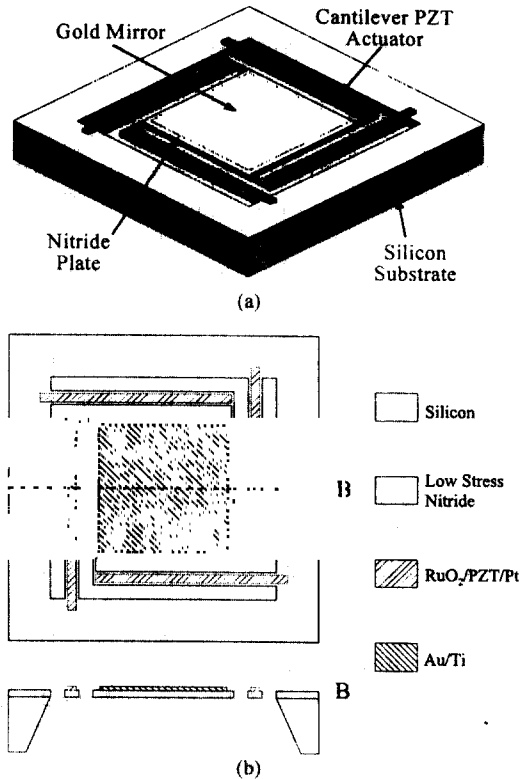


Fig. 3. Device structure of the PAM for nano-steering of the laser beam. (a) Three-dimensional schematic of the PAM. (b) Plain and cross-sectional device structure of the PAM.

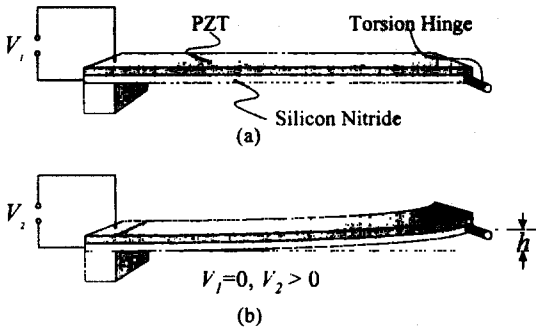


Fig. 4. Bending motion of the cantilever PZT unimorph due to the applied actuation voltage.

력 분포의 변화에 의해 변형이 쉽게 일어나게 되므로 [8], PZT 구동기는 낮은 구동 전압에서도 큰 굽힘 변형을 얻을 수 있게 되는 것이다.

이와 같은 원리에 의해 구동되는 마이크로미러는 광 디스크 기판 면에 대해 45도를 이루는 서브 마운트(sub-mount)에 장착되어 광원으로 부터 입사되는 레이저 빔을 픽업 장치의 집속 광학계로 반사하여 주며, 레이저 빔의 광축을 평행하게 변경시킬 수 있게 되어 고밀도 광 정보 저장 장치의 데이터 트랙을 추수(following) 할 수 있게 된다. 그림에서 레이저 광축의 변위 d 는 마이크로미러의 구동 변위 h 의 $\sqrt{2}$ 배가 됨을 알 수 있다.

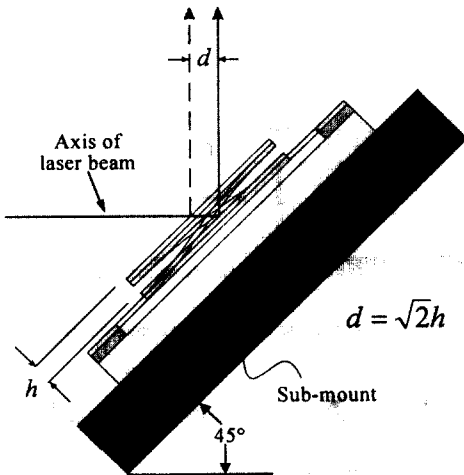


Fig. 5. Principle of steering the laser beam by the PAM.

3. 설계 및 구동 특성 해석

정사각형의 마이크로미러의 한 변의 크기를 각각 250 μm , 500 μm , 1000 μm 로 나누어 설계하였으며, 회전 힌지의 폭은 10 μm 로 동일하게 하였다. 특히 힌지의 위치는 외팔보의 릴리즈 된 끝 부분

과 정사각형 마이크로미러의 각 변의 중앙부를 연결하도록 설계하였다. 현가된 마이크로미러는 고정부인 실리콘 기판으로부터 100 μm 떨어져 있게 하였다. PZT 액츄에이터가 형성되는 실리콘 질화막의 외팔보의 두께는 50 μm 으로 균일하게 하였으며, 그 길이는 설계된 마이크로미러의 크기에 따라 결정된다. 예를 들어 250 μm 크기의 마이크로미러를 현가하는 외팔보의 길이는 230 μm 이며, 500 μm 크기의 마이크로미러용의 외팔보는 355 μm 의 길이를 갖는다. 마이크로미러 및 외팔보 구동기의 뼈대 구조물로 이용되는 실리콘 질화막의 잔류 응력은 소자의 신뢰성 및 구동 특성을 결정 짓는 중요한 변수이다. 본 연구에서는 저압 화학 기상 증착법(LPCVD)에 의해 실리콘의 함량이 많은 저 응력 실리콘 질화막을 이용하였으며, 이 막의 잔류 응력은 30 MPa 이하이며 두께는 2 μm 로 설계하였다. 구동기로 이용되는 PZT 박막의 두께는 360 nm이며, 마이크로미러의 반사 막으로는 80 nm 두께의 얇은 금 박막을 이용한다. 그림 6에는 반사 막으로 사용되는 금 박막의 입사되는 레이저 빔의 파장에 따른 반사도를 측정한 결과이며, 650 nm의 적색 레이저를 광원으로 이용할 경우의 반사도는 93%에 달한다. PZT 박막 구동기의 상하부 전극으로 쓰이는 금속을 선정하는 것 역시 PAM의 신뢰도를 결정짓는 주요 요소이다. 본 연구에서는 PZT 박막과의 접착성(adhesion) 및 PZT 박막에 미치는 전기적 특성 등을 고려하여 상부 전극으로는 RuO₂를 사용하였고, 하부 전극으로 백금을 채택하였다.

설계된 치수 및 물질을 바탕으로 PAM의 구동 특성을 유한 요소법을 이용하여 예측하였다. PAM의 공진 1차 모드는 네 개의 외팔보에 의해 현가된 마이크로미러 플레이트가 그림 7(a)와 같이 기판 평면을 기준으로 평행을 유지하며 수직 방향



Fig. 6. Reflectivity of the 80 nm-thick gold film with respect to the wavelength of the incident laser beam.

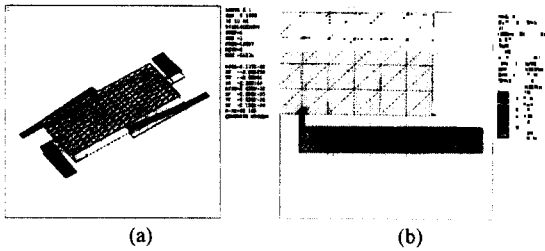


Fig. 7. FEM simulation results by ANSYS. (a) First mode resonance of PAM. (b) Stress distribution during actuation.



Fig. 8. Plain (a) and Three-dimensional view (b) of the PAM during actuation.

상하 운동을 하게 된다. 또한, 구동 중의 응력 분포는 그림 7(b)에 나타난 바와 같이 힌지와 미러 플레이트가 연결되는 부위에서 집중 된다. 또한, 그림 8에는 직류 구동 전압이 인가된 경우의 마이크로미러 및 외팔보 액츄에이터의 형상을 보여 준다. 이들 결과로부터 구동 중 마이크로미러 내부에는 변형이나 응력 변화가 전혀 나타나지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 표 1에는 미러의 크기에 따른 공진 주파수를 정리하였다. 이 결과로부터 PAM은 고밀도 광 정보 저장 장치의 데이터 탐색 시간을 결정하는 서보 대역폭(servo bandwidth)을 만족시킬 수 있으며, 이는 PAM이 고속 탐색에 적합하다는 것을 보여 준다.

Table 1. Simulated resonance frequency of PAM

Mirror Size (μm^2)	First mode Resonance (kHz)	Second mode Resonance (kHz)
250 × 250	33.3	54.1
500 × 500	10.1	16.4
1000 × 1000	2.43	3.94

4. PAM의 제작 공정

마이크로머시닝 기술 및 반도체 일관 제조 공정 기술을 이용하여 PZT 박막 구동기가 일체화된 마이크로미러를 제작하였다. 그림 9에는 PAM을 제작하기 위한 개략적인 공정 흐름도를 도시하였다. P형의 불순물이 도핑된 (100) 실리콘 웨이퍼에 저압 화학 기상 증착법으로 $2\ \mu\text{m}$ 의 저응력 실리콘

질화막을 증착한 후, 웨이퍼의 앞면에 $150\ \text{nm}$ 두께의 백금 박막을 스퍼터링(sputtering) 방법으로 증착한다. 증착된 백금 박막 위에 솔-겔(sol-gel) 방법으로 PZT 박막을 도포 및 열처리 과정을 거쳐 $360\ \text{nm}$ 두께로 형성한 후, 상부 전극으로 이용될 RuO_2 박막을 $150\ \text{nm}$ 두께로 스퍼터링 하여 증착한다 (a). 외팔보 형태의 압전 박막 액츄에이터로 이용되는 $\text{RuO}_2/\text{PZT}/\text{Pt}$ 적층 캐패시터 형상을 자체 정렬(self-aligned) 기법을 이용하여 사진 묘화 공정 및 건식 식각(dry etching) 공정을 이용하여 그림 9의 (b) 및 (c) 단계에서 형성한다. 건식 식각은 반응성 이온 식각(reactive ion etching: RIE)을 이용하며, 식각 과정에서 주로 사용되는 기체는 Cl_2/O_2 이다. 그림의 (d) 단계에서와 같이 금 박막을 형성(patterning)하여 반사 막을 형성한 후, 마이크로미러 플레이트의 하부에 있는 실리콘을 KOH 용액에서 이방성 식각하여 (e)와 같이 선택적으로 제거한다. 최종적으로 적층 캐패시터 형상의 PZT 박막 액츄에이터를 지지해 주는 질화막 외팔보 및 힌지, 마이크로미러 플레이트를 웨이퍼의 앞면에 미리 형성되어 있는 식각 마스크를 통하여 건식 식각하여 릴리즈하고 각각의 개별 PAM 칩(chip) 들을 잘라내어(dicing) 제작 공정을 완료하게 된다 (f). 그림 10은 제작이 완료되어 패키징(packaging) 하기 직전의 PAM 소자를 전자 현미경으로 관찰한 사진이다. PAM 소자의 크기는 $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ 이며 두께는 실리콘 웨이퍼의 두께인 $525\ \mu\text{m}$ 이다. 릴리즈된 외팔보 PZT 액츄에

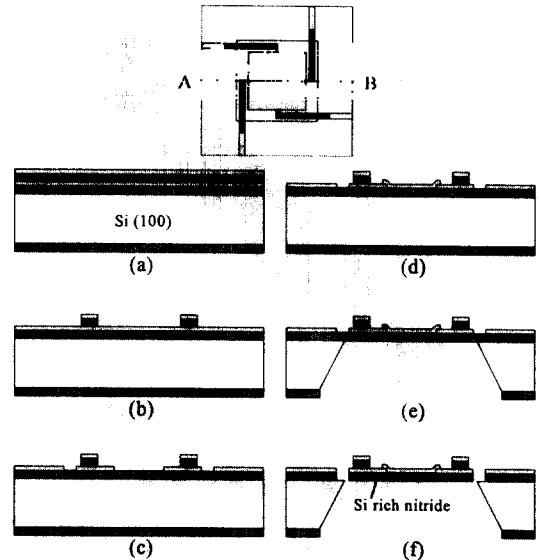


Fig. 9. Fabrication process of the PZT actuated micromirror. Schematic cross-section is depicted at each step of the fabrication along the A-B line marked in the topmost figure.

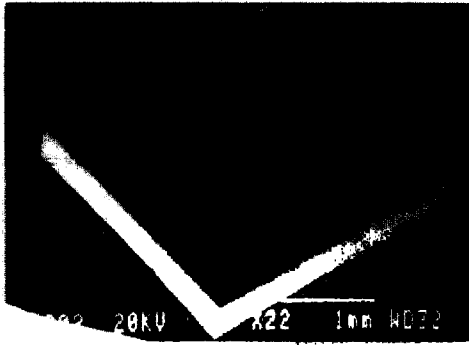


Fig. 10. SEM image of the fabricated PAM with $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ micromirror plate.

이터는 PZT 박막 및 백금 박막의 과도한 인장성 (tensile) 잔류 응력 때문에 위쪽으로 초기 굽힘 변형이 나타난다. $250 \mu\text{m}$ 크기의 마이크로미러의 경우 외팔보 PZT 박막 액튜에이터의 경우 릴리즈 된 후의 초기 변형에 의하여 기판 표면으로부터 $5 \mu\text{m}$ 가량이 돌출된다. $1000 \mu\text{m}$ 크기의 마이크로미러를 갖는 PAM 소자는 대부분이 제작 공정의 마지막 단계인 릴리즈 건식 식각 과정에서 미러와 회전 힌지의 연결 부위에서 파손이 일어났다. 이는 외팔보 PZT 액튜에이터의 초기 변형에 의한 과도한 응력이 연결 부위에 집중되어 힌지의 항복 강도를

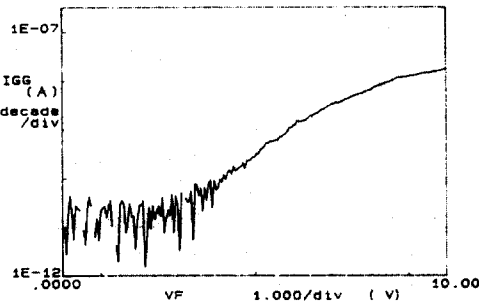


Fig. 11. Leakage current in the $\text{RuO}_2/\text{PZT}/\text{Pt}$ capacitor. Total area of the measured capacitor is about $1.5 \times 10^6 \mu\text{m}^2$.

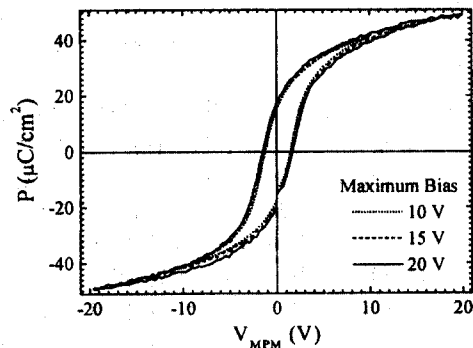


Fig. 12. Polarization curves of the 360 nm-thick PZT capacitor.

초과하기 때문에 판단되며, 파손 부위는 수치 해석에서 예상된 응력 집중 부위와 일치한다는 것을 알 수 있었다. 그러나, $250 \mu\text{m}$ 및 $500 \mu\text{m}$ 크기의 마이크로미러를 갖는 PAM 소자의 대부분은 제작 공정을 완료한 후에도 파손이 발생하지 않았다. 제작이 완료된 각 PAM 소자는 패키징을 거쳐 전기적 특성 측정을 수행하였다. 그림 11 및 그림 12는 제작된 PAM 소자의 $\text{RuO}_2/\text{PZT}/\text{Pt}$ 적층 캐패시터 구조의 액튜에이터에 대한 누설 전류 특성 및 PZT 박막의 이력 현상(hysteresis)을 측정한 결과이다. 측정 결과로부터 제작된 적층 캐패시터의 누설 전류 밀도는 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이하로 매우 낮고, 20 V 이상의 절연 파괴(dielectric breakdown) 특성을 보였으며, 잔류 분극(remnant polarization)은 $18 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이었다.

5. 특성 측정 및 토의

기판 표면에 수직인 방향의 PAM 구동 변위를 광학적인 방법으로 측정하였다. 마이크로미러의 변위를 측정하기 위해 이용한 광학계를 그림 13에 도시하였다. 각각의 광학계는 서로 다른 원리에 의해 마이크로미러의 구동 변위를 측정하게 된다. 즉, 이 그림의 (a)와 같은 측정 장치로는 구동 되고 있는 미러로부터 반사되는 레이저 빔의 변위를 대물 렌즈를 통해 확대하여 측정하게 되며, (b)의 광학계는 백색광 간섭 현상을 이용하여 마이크로미러가 구동 되어 변위가 발생할 경우 변화하는 간섭 형태를 계산하여 구동 변위를 측정한다. 그림 14는 백색광 간섭계로 측정된 $250 \mu\text{m}$ 크기의 마이크로

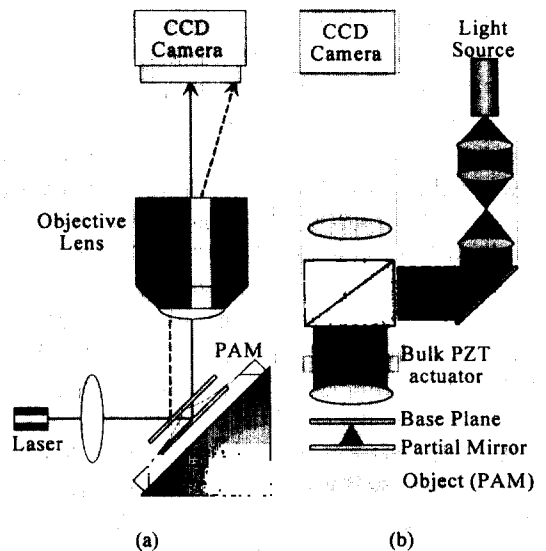


Fig. 13. Two different optical setups to measure the actuation characteristics of the PAM.



Fig. 14. Fringe patterns observed at the $250 \times 250 \mu\text{m}^2$ micromirror under no bias (a) and 5 V DC bias applied at the PZT cantilever unimorphs (b).

미러의 구동 중의 간섭 무늬를 보여 준다. 이 그림의 (a)는 전압이 인가되지 않은 경우의 초기 상태에서의 간섭 패턴이며, (b)는 5 V의 전압이 인가되어 마이크로미러가 $4 \mu\text{m}$ 정도의 수직 방향 변위가 발생된 상태에서의 간섭 패턴이다. 이 측정 결과에서 PAM에 구동 전압이 인가되지 않은 경우의 초기 조건에서도 마이크로미러가 오목하게 변형되어 있으며, 이는 반사 막으로 증착된 금 박막의 잔류 응력 때문이라고 생각된다. 간섭 패턴의 프린지 (fringe) 사이의 높이차는 $0.5 \mu\text{m}$ 이며, 따라서 마이크로미러 자체의 초기 변형에 의한 중심부와 모서리 부분의 높이차는 $2.1 \mu\text{m}$ 이다. 이 경우, 마이크로미러의 곡률 반경은 7.42 mm 이다. 그러나, 구동 전압이 인가되어 마이크로미러가 수직 방향으로 평행 변위를 겪게 되어도 마이크로미러의 모양은 변화가 없음을 확인할 수 있으며, 이는 PAM의 평행 구동 특성을 보여 준다. 그러나, PAM이 고밀도 광 정보 저장 장치의 광학 소자로 응용되기 위해서는 마이크로미러의 평활도 (flatness)가 보다 개선되어야 하며, 반사 막인 금속 박막의 잔류 응력을 최소화 하는 연구가 필요하다.

그림 15는 구동 전압에 따른 마이크로미러의 변위를 측정된 결과이다. 측정 결과로부터 PAM은 10 V 이하의 저전압에서도 $5 \mu\text{m}$ 이상의 변위를 얻을 수 있으며, 구동 효율은 선형 영역에서 약 $0.9 \mu\text{m}/\text{V}$ 를 갖는다. 압전 박막의 특성상 구동 전압이 증가할수록 구동 변위는 포화되는 경향을 보이며, 2 V 이하의 구동 전압 영역에서는 구동 변위가 4% 정도의 비선형성을 보인다. 특히, PAM 소자를 제작한 후 최초로 전압을 인가하게 되면, 2 V 정도의 임계 전압 (coercive field) 이상에서 변위가 발생하게 되며, 이러한 양상은 그림 15의 그래프에 삽입되어 있는 작은 그래프와 같은 거동을 보인다. 그러나, 이후의 구동 변위는 이 그림의 큰 그래프가 보여주는 양상을 따른다.

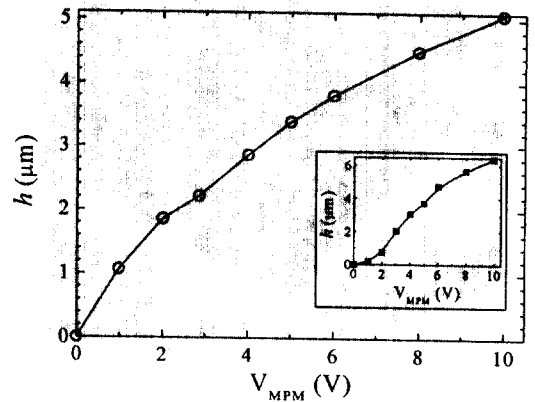


Fig. 15. Actuation characteristics of the PAM having $250 \times 250 \mu\text{m}^2$ micromirror.

6. 결론

본 논문에서는 외팔보 형태의 PZT 박막으로 구동되는 마이크로미러인 PAM 소자를 고밀도 광 정보 저장 장치의 미세 트래킹 기구로 제안하고, 이를 설계 및 제작하여 측정된 구동 특성을 보고하였다. 정사각형 모양의 마이크로미러와 이를 구동하기 위한 PZT 박막 구동기는 마이크로머시닝 기술 및 반도체 소자 일관 제조 공정 기술을 이용하여 집적화 되도록 제작하였으며, 특히 PZT 박막은 솔-겔 방법을 이용하여 형성하였다.

제조 공정이 완료된 후의 적층 PZT 캐패시터는 낮은 누설 전류, 높은 절연 파괴 전압, 우수한 분극 특성 등의 전기적 특성을 보였으며, 저용량 실리콘 질화막의 외팔보 상에 형성된 $\text{RuO}_2/\text{PZT}/\text{Pt}$ 구조의 적층 캐패시터는 10 V 이하의 낮은 전압에서도 $5 \mu\text{m}$ 이상의 비교적 큰 변위를 갖는 구동 특성을 보여 주었다. 특히 PAM의 구동은 기판 평면에 수직인 방향으로 평행을 유지하는 상하 운동 특성을 확인할 수 있었다. $250 \mu\text{m}$ 크기의 마이크로미러를 갖는 PAM 소자의 공진 주파수는 33 kHz로서 고밀도 광 정보 저장 장치의 데이터 탐색 속도를 만족할 수 있으며, 고속 탐색에 적합함을 확인할 수 있었다.

마이크로미러의 반사 막인 금 박막의 잔류 응력으로 인해 릴리즈 된 마이크로미러의 초기 변형이 크게 관찰되었으나, 구동 중에 미러 형상은 변형이 없었다. 그러나, 고밀도 광 정보 저장 장치의 광학 소자로 이용되기 위해서는 마이크로미러의 초기 변형은 최소화 되어야 하며, 이는 반사 막의 잔류 응력을 최소화 함으로써 가능하리라 예상된다. 또한, $\text{RuO}_2/\text{PZT}/\text{Pt}$ 구조의 잔류 응력을 최소화 하는

것 역시 PAM의 신뢰성 및 수율(yield)을 향상시키기 위한 해결 과제이다.

참고 문헌

- [1] T. Hirano, L.-S. Fan, T. Semba, W. Y. Lee, and J. Hong, "Micro-actuator for tera-storage," in *Proc. MEMS '99*, Orlando, FL, Jan. 1999, pp. 441-446.
- [2] P. N. Minh, T. Ono, and M. Esashi, "A novel fabrication method of the tiny aperture tip on silicon cantilever for near field scanning optical microscopy," in *Proc. MEMS '99*, Orlando, FL, Jan. 1999, pp. 360-365.
- [3] L. P. Ghislain, V. B. Elings, K. B. Crozier, S. R. Manalis, S. C. Minne, K. Wilder, G. S. Kino, and C. F. Quate, "Near-field photolithography with a solid immersion lens," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, no. 4, Jan. pp. 501-503, 1999.
- [4] G. S. Kino, "Optical background for near-field recording," in *Proc. Magneto Optical Recording Int'l Sympo.*, Monterey, CA, Jan. 1999, pp. 1-6.
- [5] S. Sumi, A. Takahashi, and T. Watanabe, "Advanced storage magneto-optical disk (AS-MO) system," in *Proc. Magneto Optical Recording Int'l Sympo. '99*, Monterey, CA, Jan. 1999, pp. 173-176.
- [6] D. A. Horsley, A. Singh, A. P. Pisano, and R. Horowitz, "Angular micropositioner for disk drives," in *Proc. MEMS '97*, Nagoya, Japan, Jan. 1997, pp. 454-459.
- [7] M. -H. Kiang, O. Solgaard, K. Y. Lau, and R. S. Muller, "Electrostatic combdrive-actuated micromirrors for laser-beam scanning and positioning," *IEEE J. Microelectromech. Syst.*, vol. 7, pp. 27-37, 1998.
- [8] Y. Yee, M. Park, and K. Chun, "A sticking model of suspended polysilicon microstructure including residual stress gradient and postrelease temperature," *IEEE J. Microelectromech. Syst.* vol. 7, no. 3, pp. 339-344, 1998.