

표면 미세 가공 기술을 이용한 상하운동 및 회전운동을 하는 광 변조기에 관한 연구

論 文
49C - 2 - 14

A STUDY ON THE SPATIAL LIGHT MODULATOR WITH PISTON PLUS TILT MODE OPERATION USING SURFACE MICROMACHINING TECHNOLOGY

鄭錫煥* · 金容權**
(Seok-Whan Chung · Yong-Kweon Kim)

Abstract - In this paper, using surface micromachining technology with thick photoresist and aluminum, an SLM(Spatial Light Modulator), which is applied to the fields of adaptive optics and pattern recognition system, was fabricated and the electromechanical properties of the fabricated micro SLM are measured. In order to maximize fill-factor and remove mechanical coupling between micro SLM actuators, the micro SLM is composed of three aluminum layers so that spring structure and upper electrode are placed beneath the mirror plate, and 10×10 each mirror plate is individually actuated. Also, the micro SLM was designed to be able to modulate phase and amplitude of incoming light in order to have a continuity of phase modulation of incoming light. In the case of amplitude and phase modulation, maximum vertical displacement is 4μm, and maximum angular displacement is ±4.6° respectively. The height difference of the fabricated mirror plate was able to be reduced to 1100Å with mirror plate planarization method using negative photoresist(AZ5214). The electromechanical properties of the fabricated micro SLM were measured with the optical measurement system using He-Ne laser and PSD(position sensitive device).

Key Words : Adaptive optics, SLM(spatial light modulator), mechanical coupling, planarization, PSD(position sensitive device)

1. 개 요

최근 Micro-Opto-Electro-Mechanical-System(MOEMS) 기술의 발달과 더불어 적응 광학(adaptive optics) 분야나 패턴 인식 분야에 적용 가능한 광 변조기의 개발이 이루어지고 있다. 이러한 광 변조기는 입사된 빛의 위상을 파면 센서(wavefront sensor)와 실시간 제어를 통해 대기의 요동(turbulence)에 의하여 왜곡된 빛의 위상을 바로잡아 주는 역할을 한다[1]. 적응 광학 분야에서 상업적으로 사용되던 기존의 광 변조기는 전왜 소자 배열에 의하여 지지되는 평면 거울을 사용하여 크기가 크고 전력 소비가 크며 무엇보다도 가격이 비싸다는 단점이 있었다[2,3]. 그러나 MOEMS 기술의 적용으로 인해 광 변조기의 크기가 작아졌으며 반도체 공정을 통한 대량 생산으로 가격이 싸고 소비 전력도 작아졌다. MOEMS 기술로 제작되어 적응 광학에 응용되는 광 변조기는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 막 형태의 연속 변형 거울(continuous membrane deformable mirror)[4]이고 다른 하나는 조각 변형 거울(segmented deformable mirror)이다[5]. 연속 변형 거울은 몸체 미세 가공 기술[4]과 표면 미세 가공 기술[5]로 제작이 된 바 있다. 연속 변형 거울은 회절

현상이 없고 연속적인 위상 변화가 가능하다는 장점을 가지고 있지만 구동기 간의 기계적인 커플링으로 인해 원치 않는 부분의 위상도 변화시키는 단점을 가지고 있다. 또한 조각 변형 거울은 상하 운동만을 하는 거울[5]과 상하 운동과 회전 운동을 병행하는 거울로 나뉠 수 있다[5,6]. 상하 운동만을 하는 조각 변형 거울은 기계적인 커플링이 일어나진 않지만 조각 거울 사이의 틈에 의해 회절 현상이 발생하고 위상의 변화가 불연속적인 단점이 있다. 따라서 위상 변화의 연속성을 개선하고 기계적인 커플링을 줄이기 위하여 최근 많은 연구자들에 의하여 상하 운동과 회전 운동을 병행하는 조각 거울의 개발이 이루어지고 있지만 여전히 구동기 간의 기계적인 커플링 문제를 해결하지 못했다.

본 논문에서는 위상 변화의 연속성을 가지고 조각 거울 간의 기계적인 커플링이 없도록 설계하였으며 각각의 조각 거울들은 거울 아래의 분리된 전극에 의하여 개별적으로 움직일 수 있도록 하였다. 또한 스프링과 지지 기둥에서의 회절 현상을 최소화하고 광 효율을 최대화하기 위하여 스프링 구조를 거울판 아래에 숨기는 구조를 택했다. 또한 광 변조기에서 요구되는 평평한 거울을 얻기 위하여 음성 감광제(AZ5214)를 사용한 추가적인 사진 공정을 통하여 거울판을 평탄화시키는 공정을 제안하였으며 후막 감광제(AZ4620)와 알루미늄을 이용한 표면 미세 가공 기술을 적용하여 입사된 빛의 위상과 방향을 거울의 상하 운동과 회전 운동을 통해 변조할 수 있는 10×10 이차원 광 변조기 배열을 제안하고 설계, 제작 및 측정하였다.

* 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學部 博士課程
 ** 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學部 副教授 · 工博
 接受日字 : 1999年 10月 1日
 最終完了 : 2000年 1月 13日

2. 초소형 광 변조기의 설계

본 논문에서 제안된 광 변조기는 상하 운동 및 회전 운동을 하여 입사된 빛의 위상 및 방향을 바꾸어 주도록 설계되었다. 또한 기계적인 커플링을 없애고 회절 현상을 최소화하도록 스프링 구조물과 전극 구조물을 거울판 아래에 위치시켰다. 그림 1은 설계된 광 변조기의 개략도이다. 설계된 광 변조기는 거울판, 스프링, 위면 전극, 바닥 전극, 그리고 거울판과 위면 전극을 연결하는 하나의 지지 기둥 및 스프링과 실리콘 기판을 연결하는 네 개의 지지 기둥으로 이루어져 있다. 또한 스프링은 상하 운동 및 회전 운동이 가능하고 저전압으로 구동이 가능하도록 설계하였는데 상하 운동을 위해 네 개의 쌍 게다리 스프링(double crab leg spring)을 사용하였고 회전 운동을 위해 두 개의 비틀림 스프링(torsional spring)을 사용하였다. 표 1은 설계된 광 변조기의 각 부분의 치수이다. 거울판과 위면 전극과의 간격을 $4\mu\text{m}$ 로 위면 전극과 바닥 전극과의 간격을 $6\mu\text{m}$ 로 두었으므로 거울판의 구동시 거울판이 위면 전극 지지 기둥에 먼저 닿도록 설계되어 위면 전극과 바닥 전극과의 전기적인 단락을 방지하였다.

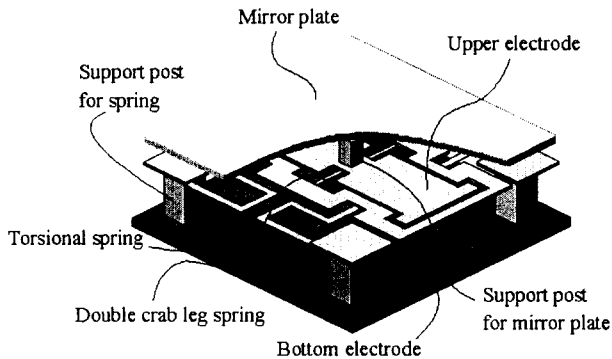


그림 1 설계된 광 변조기의 개략도
Fig. 1 Schematic view of the designed micro SLM

표 1 설계된 광 변조기의 치수
Table 1 Dimensions of the designed micro SLM

거울판	$100 \times 100 \times 1 \mu\text{m}^3$
스프링	폭- $3\mu\text{m}$, 두께- $0.4\mu\text{m}$
거울판과 위면 전극과의 간격	$4\mu\text{m}$
위면 전극과 바닥 전극과의 간격	$6\mu\text{m}$

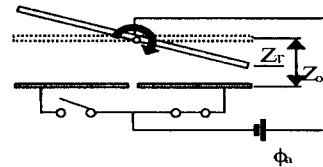
설계된 광 변조기는 적용 광학에 응용하기 위한 것이므로 적용 광학에서 요구하는 사양을 고려해야 한다. 요구 사양에는 가동 거울의 개수, 가동 거울의 최대 변위, 개방 루프 대역폭(open loop bandwidth) 등이 있다. 표 2는 적용 광학에서 요구하는 사양을 고려하여 설계된 광 변조기의 사양이다[1, 7].

설계된 광 변조기는 상하 운동 및 회전 운동을 하는데 그림 2는 광 변조기의 운동 모드를 보여준다. 방향 변조시에는 그림 2(a)와 같이 위면 전극과 두 개의 바닥 전극 중 한쪽

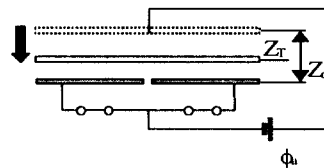
전극에만 전위차 ϕ_a 를 인가함으로써 회전 운동을 구현할 수 있고, 위상 변조시에는, 그림 2(b)와 같이 위면 전극과 두 개의 바닥 전극 사이에 동일한 전위차 ϕ_a 를 인가함으로써 상하 운동을 구현할 수 있다. 또한 두 가지 모드를 혼용하여 위상 및 방향을 동시에 변조할 수 있는데 위면 전극과 양쪽 바닥 전극에 서로 다른 전위차 ϕ_a 와 ϕ_b ($\phi_a > \phi_b$)를 인가함으로써 상하 및 회전 구동이 가능하다.

표 2 설계된 광 변조기의 사양
Table 2 Specifications of the designed micro SLM

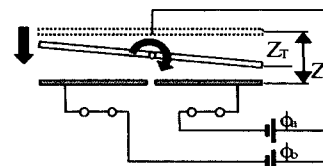
가동 거울의 개수	100개 (10x10 이차원 배열)
가동 거울의 최대 수직 변위	$4\mu\text{m}$ (제어가능 최대 수직 변위: $2\mu\text{m}$)
가동 거울의 최대 각 변위	$\pm 4.6^\circ$ (제어가능 최대 각 변위: $\pm 2^\circ$)
개방 루프 대역폭	$>10\text{kHz}$
전체 유효 거울 면적	1mm^2
광학적 유효 면적 비	93.7%



(a) 회전 운동 모드
(a) Tilt operation mode



(b) 상하 운동 모드
(b) Piston operation mode



(c) 회전 및 상하 운동 모드
(c) Tilt and piston operation modes

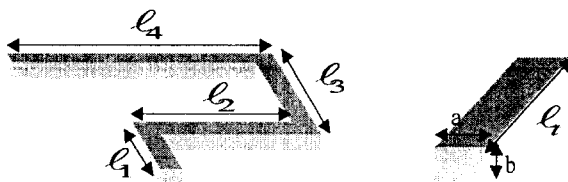
그림 2 광 변조기의 운동 모드
Fig. 2 Operation mode of the micro SLM

3. 광 변조기의 전기 기계적 특성 해석

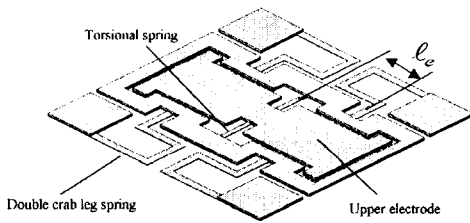
설계된 광 변조기의 전기 기계적 특성을 예측하기 위하여 상하 운동을 위한 쌍 계다리 스프링과 회전 운동을 위한 비틀림 스프링의 탄성 계수를 계산하고 인가 전압 대 변위 및 공진 모드를 해석하였다.

3.1. 스프링 상수 계산

광 변조기의 전기 기계적 특성을 예측하기 위해서 우선 광 변조기에서 사용하는 스프링 구조물의 탄성 계수를 계산하였다. 위상 변조시 사용되는 쌍 계다리 스프링과 방향 변조시 사용되는 비틀림 스프링은 그림 3과 같은 구조를 하고 있고 각 부분의 치수는 표 3과 같다. 쌍 계다리 스프링의 탄성 계수 k_p 는 식 (1)과 같이 정의되며, 비틀림 스프링의 탄성 계수 k 는 식 (2)와 같이 정의된다.



(a) 쌍 계다리 스프링 (a) Double crab leg spring (b) 비틀림 스프링 (b) Torsion spring



(b) 위면 전극과 스프링 (b) Upper electrode and spring

그림 3 스프링 및 위면 전극의 형상 Fig. 3 Shape of spring and upper electrode

표 3 스프링 각 부분의 치수 Table 3 Dimensions of each part of the spring

스프링의 종류	길이(μm)	폭a(μm)	두께b(μm)	
쌍 계다리 스프링	l_1	10	3	0.4
	l_2	21.5		
	l_3	15		
	l_4	25.5		
비틀림 스프링	l_1	12		

$$\frac{1}{k_p} = \frac{1}{Eab^3} (\ell_1^3 + \ell_2^3 + \ell_3^3 + \ell_4^3) + \frac{1}{2xGab^3} (\ell_1^2 \ell_2 + \ell_2^2 \ell_3 + \ell_3^2 \ell_4) \quad (1)$$

$$k = \frac{xGab^3}{\ell_i} \quad (2)$$

여기서 E 는 영률, G 는 전단 탄성 계수, a 는 스프링 폭, b 는 스프링 두께, $\ell_i(i=1,2,3,4)$ 는 쌍 계다리 스프링의 각 부분의 길이, ℓ_i 는 비틀림 스프링의 길이, x 는 스프링의 폭과 두께 비에 따른 상수이다.

그러나 방향 변조시 비틀림 스프링만 변형되는 것이 아니라 쌍 계다리 스프링도 함께 변형되기 때문에 이 두 스프링이 직렬로 연결되어 변형된다. 따라서 방향 변조시의 스프링의 탄성 계수 k_t 를 구하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{1}{k_t} = \frac{1}{4k_e} + \frac{1}{2k}, \quad k_e = k_p \ell_e^2 \quad (3)$$

여기서 k_e 는 방향 변조시 쌍 계다리 스프링의 유효 비틀림 스프링 탄성 계수, ℓ_e 는 비틀림 스프링과 쌍 계다리 스프링 간의 간격이다. 식 (1)에 구조물의 재료로 사용되는 알루미늄의 영률 E , 전단 탄성 계수 G 와 스프링의 치수를 대입하면 쌍 계다리 스프링 하나의 탄성 계수는 0.289N/m로 산출된다. 또한 ABAQUS를 이용한 FEM 시뮬레이션으로 계산된 탄성 계수는 0.298N/m로 공진 주파수 식으로 계산한 탄성 계수의 오차는 약 3% 정도이다.

3.2. 인가 전압 대 변위 해석

계산된 스프링의 탄성 계수를 이용하여 광 변조기의 정특성인 인가 전압 대 변위 관계를 해석하였다. 그림 4는 광 변조기의 위상 및 방향 변조시의 정규화된 인가 전압 대 변위와의 관계를 나타내는 그래프이다. 변위량을 정규화 하기 위하여 α 란 변수를 사용하는데 α 란 변위를 최대 가능 변위로 나누는 값으로 $\alpha = Z_T/Z_0$ 와 같이 표현되며 인가 전압을 정규화 하기 위해서는 인가 전압 ϕ_a 를 민감도 파라메타 V_0 로 나누는 값이다.

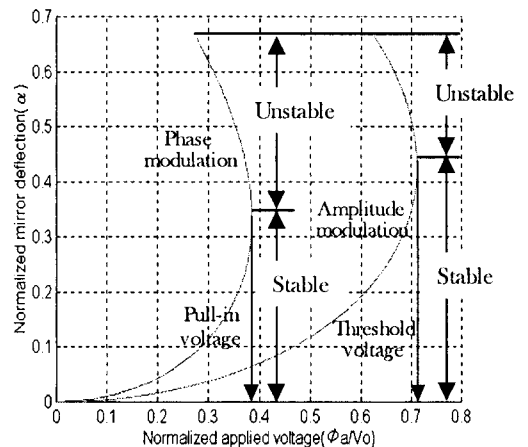


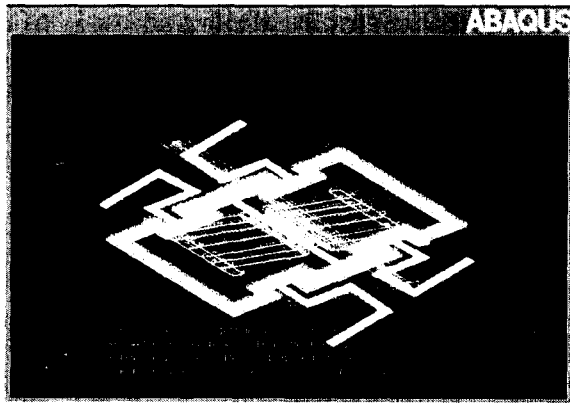
그림 4 정규화된 인가 전압 대 변위 Fig. 4 Normilized applied voltage vs. deflection

그림 4에서 위상 변조시 약 0.38 $V_{0_pha}(=$

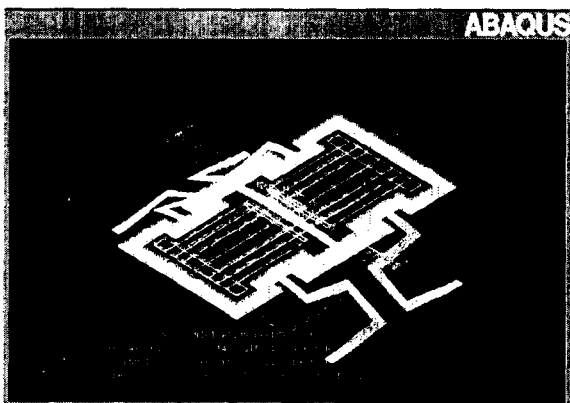
$\sqrt{2k_p Z_o^3 / \epsilon_o A}$) 의 pull-in voltage에서 최대 변위 $0.33Z_o$ 를 얻을 수 있고 방향 변조시 약 $0.71 V_{o_amp}(= \sqrt{8k_p Z_o^3 / \epsilon_o W_2 L_{1/2}^3})$) 의 하강 문턱 전압에서 $0.44 \tan^{-1}(2Z_o/L_m)$ 를 얻을 수 있다. 여기서 Z_o 는 위면 전극과 바다 전극과의 간격, W_2 는 위면 전극의 폭, $L_{1/2}$ 는 위면 전극의 길이의 반이고 L_m 은 거울의 길이이다. 따라서 제작된 광 변조기의 스프링 치수 및 위면 전극과 바다 전극과의 간격 Z_o 를 측정하면 위상 변조시의 pull-in voltage 및 방향 변조시의 이론적인 하강 문턱 전압을 예측할 수 있다.

3.3. 공진 모드 해석

광 변조기의 동특성으로서 공진 주파수를 두 가지 방법으로 계산하였다. 첫째는 계산된 스프링 탄성 계수를 가지고 방향 변조 및 위상 변조시의 공진 주파수를 계산하였으며 둘째는 ABAQUS를 이용한 FEM 시뮬레이션으로 계산하였다. 그림 5는 ABAQUS로 해석된 공진 모드를 나타낸다.



(a) 방향 변조시
(a) In the case of amplitude modulation



(b) 위상 변조시
(b) In the case of phase modulation

그림 5 광 변조기의 공진 모드
Fig. 5 Resonance mode of the micro SLM

두께가 $0.4\mu m$ 인 스프링의 탄성 계수로 계산된 공진 주파수

와 ABAQUS로 시뮬레이션된 공진 주파수를 비교해 볼 때 위상 변조시는 각각 18.5kHz와 21.3kHz로 약 13.1%의 오차가 있었지만 방향 변조시는 각각 11.7kHz와 10.1kHz로 약 15.8%의 오차를 보였다. 방향 변조시의 오차가 위상 변조시의 오차보다 큰 이유는 방향 변조시 비틀림 스프링과 쌍 게 다리 스프링이 단순히 직렬로 연결되어 변형되는 것이 아니라 두 스프링간의 기계적인 커플링도 함께 작용함으로써 발생하는데 스프링의 탄성 계수로 계산된 공진 주파수에는 이러한 점이 반영되지 않았기 때문이다.

4. 광 변조기의 제작 공정

4.1. 제작 공정

설계된 광 변조기는 후막 감광제를 회생층으로 사용하고 알루미늄을 구조재로 사용하는 표면 미세 가공 기술을 이용하여 제작된다[8]. 광 변조기의 제작에는 총 여섯 장의 마스크를 사용하였다. 회생층으로 AZ4620을 사용하였으며 스프링, 전극 및 거울판이 될 알루미늄은 진공 열 증착 방법으로 증착하였다. 그림 6은 광 변조기의 제작 공정도이다.

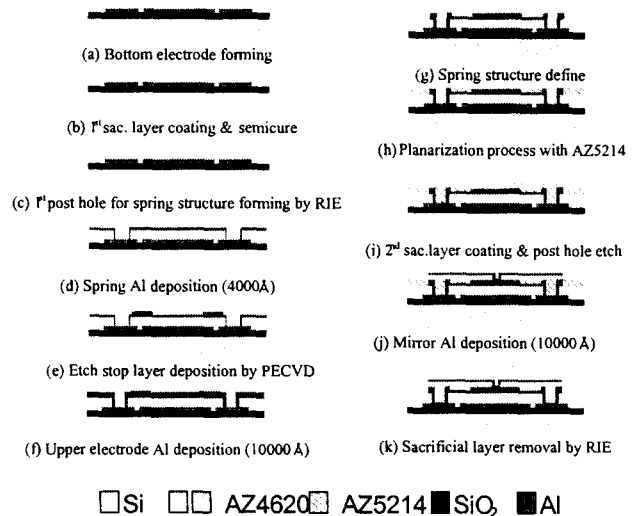


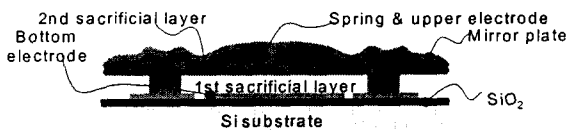
그림 6 광 변조기의 제작 공정도
Fig. 6 Fabrication process of the micro SLM

우선 전극간의 절연을 위하여 두께 $0.3\mu m$ 의 열 산화막이 증착된 <100>웨이퍼를 사용하여 공정을 시작한다. 그림 6(a)와 같이 열 산화막 위에 바다 전극으로 사용될 알루미늄을 열 증착한 후 바다 전극을 정의하고 첫 번째 회생층을 도포한다. 도포된 회생층은 내화확성을 지니고 반응성 이온 식각 마스크로 쓰일 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 산화막의 증착시 $200^\circ C$ 의 고온에서 견디도록 그림 6(b)와 같이 미리 $210^\circ C$ 까지 열처리를 해준다. 지지 기둥 형성을 위한 구멍을 형성하기 위해 열처리된 회생층을 PECVD 산화막 마스크를 이용하여 그림 6(c)와 같이 산소 반응성 이온 식각으로 이방성 식각을 하였다. 식각 가스로 사용된 산소는 50sccm을 흘려주며 chamber 압력은 50mTorr

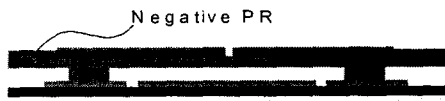
이고 RF power는 200W이다. 스프링과 위면 전극은 두께가 서로 다른 알루미늄이므로 식각 정지막을 사용하여 두께를 달리 하였다. 그림 6(d)와 같이 스프링이 될 알루미늄을 먼저 증착한 뒤 그림 6(e)와 같이 식각 정지막이 될 PECVD 산화막을 증착한 후 스프링 형상을 정의하고 그 위에 그림 6(f)와 같이 위면 전극이 될 알루미늄을 증착하고 그림 6(g)와 STS ICP(Inductive Coupled Plasma) 식각 장치를 이용한 알루미늄 이방성 건식 식각을 통해 두께 0.4 μ m의 스프링과 두께 1.4 μ m의 위면 전극을 동시에 형성한다. 알루미늄의 식각은 Cl₂ 가스를 20sccm 사용한다. 스프링과 위면 전극을 제작한 후 음성 감광제(AZ5214)를 사용한 추가적인 사진 공정을 통하여 그림 6(h)와 같이 거울판을 평탄화시킨 후 그림 6(i)와 같이 두 번째 회생층을 도포하고 210 $^{\circ}$ C까지 열처리 한 후 거울판 지지 기둥을 형성하기 위한 구멍을 산소 반응성 이온 식각을 통한 이방성 식각으로 형성한다. 그림 6(j)와 같이 거울판이 될 알루미늄을 증착하고 형상을 정의한 후 최종적으로 그림 6(k)와 같이 모든 회생층을 산소 플라즈마 식각을 통해 식각하여 광 변조기를 완성한다.

4.2. 거울판 평탄화 공정

표면 미세 가공 기술을 이용하여 마이크로 구조물을 제작하는 데 있어서의 가장 큰 단점은 연속되는 막의 증착과 식각 과정에서 발생하는 단차의 반영이다. 광 변조기를 제작하는 데 있어서도 비록 후막 감광제가 단차를 완화시켜주는 역할을 하지만 후막 감광제의 두께가 그다지 두껍지 못하기 때문에 이러한 단차가 최종적으로 거울판에 반영되어 광 변조기로서의 역할을 하는 데 큰 장애가 된다. 따라서 이러한 단차 문제를 해결하기 위하여 CMP (Chemical Mechanical Polishing)와 같은 기술이 이용되기도 하지만 본 공정에서는 위면 전극을 형성할 때 사용한 같은 마스크를 이용하여 음성 감광제(AZ5214)를 사용한 한 번의 추가적인 사진 공정을 통해 그림 7과 같이 거울판을 평탄화 시켰다.



(a) 평탄화 전
(a) Before planarization



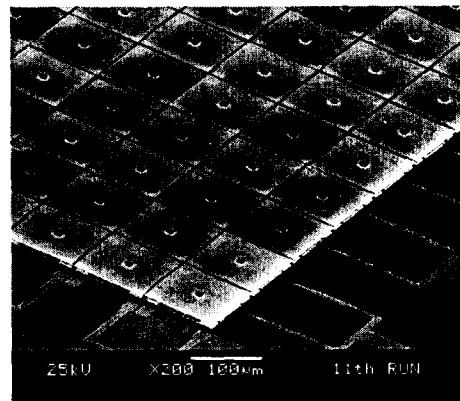
(b) 평탄화 후
(b) After planarization

그림 7 광 변조기의 평탄화 공정 개략도
Fig. 7 Fabrication process of planarization of the micro SLM

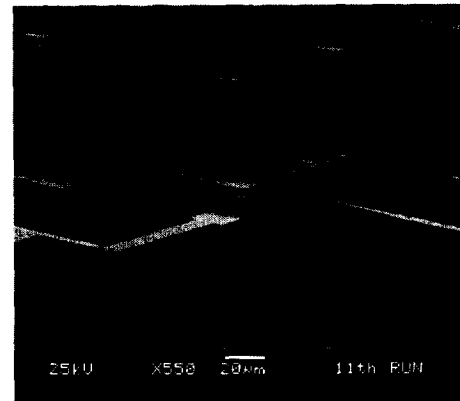
5. 제작 결과

표면 미세 가공 기술을 이용하여 성공적으로 광 변조기를 제작하였다. 그림 8의 전자현미경 사진에서 볼 수 있듯이 10 \times 10 배열은 모두 균일하게 제작되었으며 측정된 광학적 유효 면적비(optical fill-factor)는 설계된 값 93.7%보다 약간 작은 91.7%이었다. 이러한 결과는 거울판으로 쓰인 알루미늄의 사진 식각 공정시 측면 방향으로의 식각으로 인해 거울판의 면적이 줄어들어 발생하였다. 또한 회생층으로 사용된 두층의 후막 감광제와 음성 감광제는 산소 플라즈마에 의하여 잔류물 없이 깨끗이 제거되었다.

그림 9는 광 변조기의 각 부분과 지지 기둥을 보여주는데 구조재로 쓰인 알루미늄은 증착시 170 $^{\circ}$ C의 열처리를 통해 회생층의 제거 후 잔류 용력에 의한 초기 변형 없이 평탄하게 제작되었고 위면 전극 지지 기둥 및 거울판 지지 기둥은 매우 견고하게 제작됨을 알 수 있다.

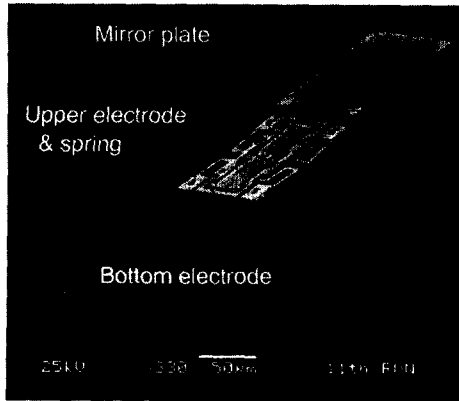


(a) 10 \times 10 배열의 전자 현미경 사진
(a) SEM photograph of 10 \times 10 array

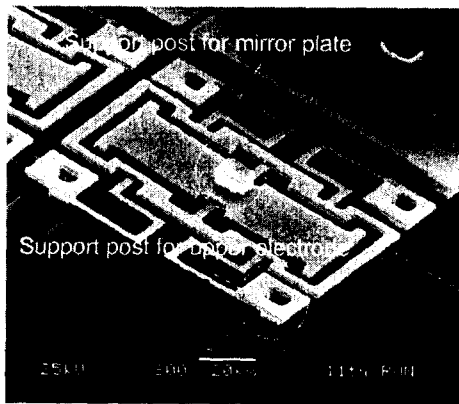


(b) 배열의 측면을 확대한 전자 현미경 사진
(b) Magnified view of the side of array

그림 8 제작된 광 변조기 배열의 전자 현미경 사진
Fig. 8 SEM view of the fabricated micro SLM array



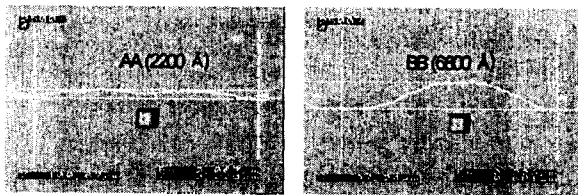
(a) 각 층별 구조를 보여주는 전자 현미경 사진
(a) SEM view of the each layer structure



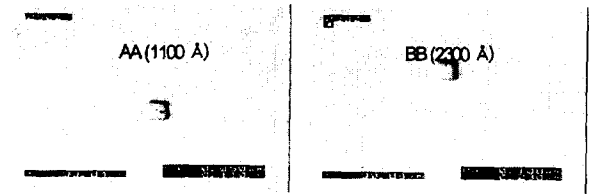
(b) 지지 기둥을 보여주는 전자 현미경 사진
(b) SEM view of the support posts

그림 9 제작된 광 변조기의 각 부분의 전자 현미경 사진
Fig. 9 SEM view of the each part of the micro SLM

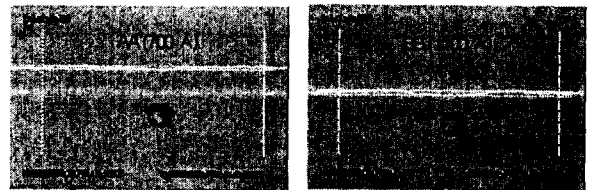
또한 거울판 평탄화 공정을 통해 그림 10과 같이 평탄화 전 거울판 최대 단차가 6800Å이었으나 평탄화 후 최대 단차는 1100Å로 줄일 수 있었다. 평탄화 공정시 AZ5214의 두께를 조절하여 위면 전극의 두께와 일치시킨다면 단차를 최대한 줄일 수 있을 것으로 예상된다.



(a) 평탄화 전
(a) Before planarization



(b) 평탄화 후, AZ5214 4000rpm 회전 도포
(b) After planarization, AZ5214 4000rpm spin coating



(c) 평탄화 후, AZ5214 3000rpm 회전 도포
(c) After planarization, AZ5214 3000rpm spin coating



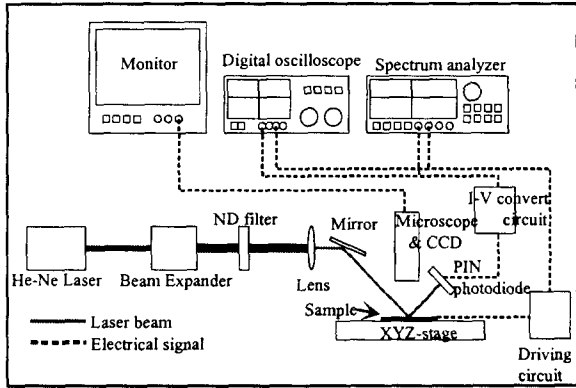
(d) 위면 전극과 스프링의 평면도
(d) Top view of the upper electrode and spring

그림 10 거울판의 평탄화 공정 결과
Fig. 10 Results of the planarization of the mirror plate

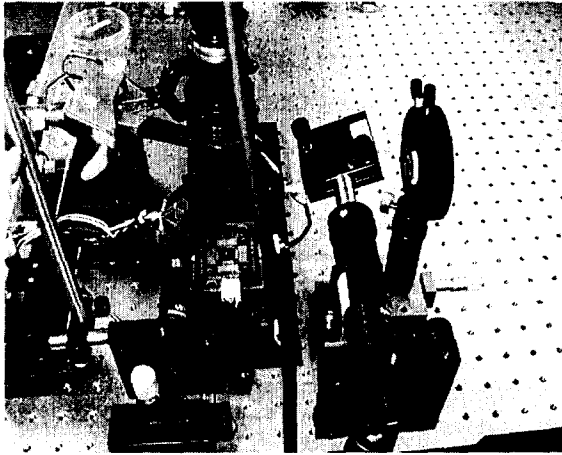
6. 광 변조기의 전기 기계적 특성 실험

6.1. 측정 장치의 구성

제작된 광 변조기의 전기 기계적 특성을 측정하기 위해서는 거울판의 수직 변위 및 각 변위를 측정하여야한다. 본 논문에서는 그림 11과 같이 헬륨-네온 레이저와 위치 검출 소자 및 각종 광학 장치들을 이용하여 광학적으로 광 변조기의 전기 기계적 특성을 측정하였다[9]. 측정 장치의 원리는 레이저 광원에서 나온 레이저가 beam expander와 ND(Neutral Density) filter를 거친 뒤 초점거리 20cm인 대물렌즈에 의해 직경 30µm로 거울판 위에 입사되고 거울판의 움직임에 따라 반사된 레이저의 위치를 위치 검출 소자가 검출하여 전압 신호로 바꾸어 주는 것이다.



(a) 광학 측정 장치의 조감도
(a) Schematic view of the optical measurement system



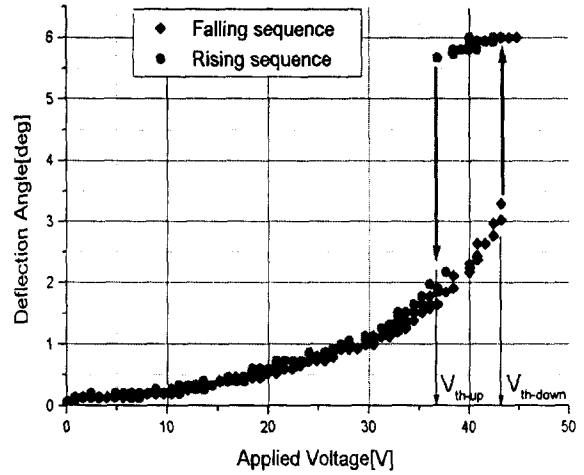
(b) 광학 측정 장치의 사진
(b) Photograph of the optical measurement system
그림 11 광학 측정 장치의 조감도 및 사진
Fig. 11 Schematic view and photograph of the optical measurement system

6.2. 방향 변조시 특성 실험

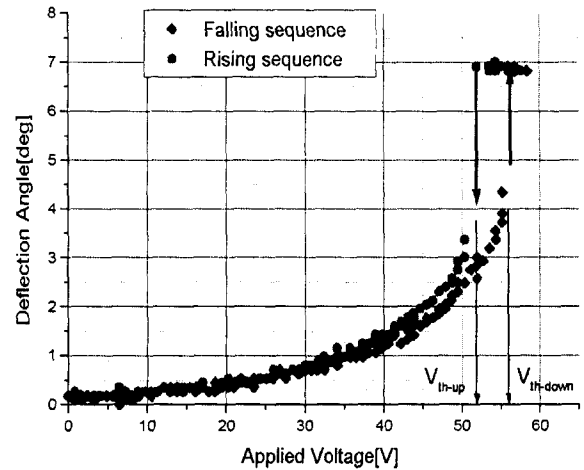
구성된 광학 측정 장치를 이용하여 광 변조기의 방향 변조 시 인가 전압 대 각 변위 및 주파수 응답을 관찰하였다. 스프링 두께가 3900Å와 4300Å인 광 변조기를 시료로 하여 실험하였다. 각각의 두께에 대하여 예측된 이론적인 하강 문턱 전압은 45V, 52V이며 상승 문턱 전압은 38V, 44V 이다. 이론값과 실험값 사이에는 약간의 오차가 존재하며 이는 광 변조기의 제작 후 거울판이 한쪽으로 약간 기울어져 있거나 위면 전극과 바닥 전극이 정렬상에 오차가 있을 때 발생한다. 또한 거울판이 바닥에 닿을 때와 바닥에서 떨어져서 평형 상태로 돌아올 때 그래프 상에서 약간의 히스테리시스를 보이고 있는데 이는 광 변조기로 사용된 재료인 알루미늄이 연성 금속이기 때문으로 해석된다.

또한 각각의 시료에 대해 광학 측정 장치로 주파수 응답을 측정 한 결과 그림 13과 같이 스프링 두께 3900Å와 4300Å인

경우 각각 11.8kHz와 14kHz로 측정되었다. MATLAB으로 계산된 이론적인 공진 주파수는 각각 11.2kHz와 12.9kHz로 각각 5%와 7.8%의 오차를 나타냈다. 따라서 전기 기계적 특성 계산식의 신뢰도를 확인할 수 있었으며 제작된 광 변조기가 설계 사양인 10kHz이상의 개방 루프 대역폭을 가짐을 확인하였다.

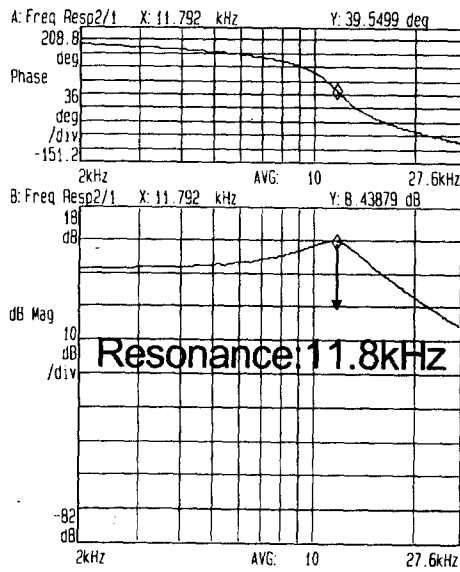


(a) 스프링 두께가 3900Å인 시료
(a) Sample of 3900 Å thick spring

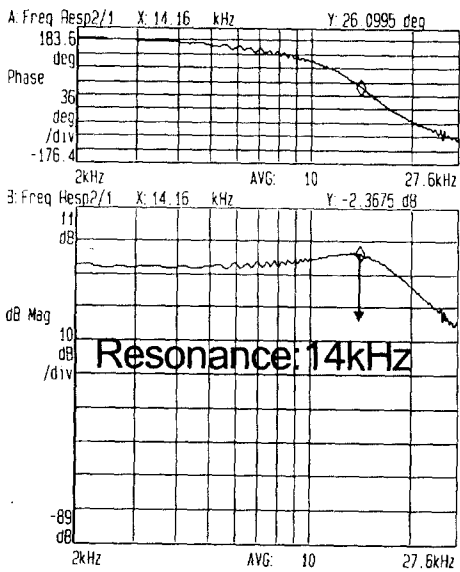


(b) 스프링 두께가 4300Å인 시료
(b) Sample of 4300 Å thick spring

그림 12 광 변조기의 방향 변조시 인가 전압 대 변위
Fig. 12 Applied voltage vs. deflection of the case of amplitude modulation,



(a) 스프링 두께가 390nm인 시료
(a) Sample of 390nm thick spring



(b) 스프링 두께가 430nm인 시료
(a) Sample of 430nm thick spring

그림 13 광 변조기의 방향 변조시 주파수 응답 특성
Fig. 13 Frequency response of the case of amplitude modulation

6.3. 위상 변조시 특성 실험

광 변조기의 위상 변조시의 인가 전압 대 수직 변위도 측정하였다. 다만 구성된 광학 장치로는 검출 해상도가 나오지 않아 레이저 변위계(KEYENCE, LC-2400A)와 비접촉 광학식 레이저 프로파일러(KEYENCE, VF-7500G)로 측정하였다.

측정 결과 그림 14와 같이 약 40V 정도에서 약 1 μ m 정도의 수직 변위를 얻을 수 있었으며 이론적인 해석값과도 어느 정도 일치함을 알 수 있다. 그러나 40V 이상의 전압에서는 위상 변조 모드로 작동되던 광 변조기가 갑작스럽게 방향 변조 모드로 바뀌는데 이 또한 광 변조기의 제작 후 거울판이 한 쪽 방향으로 약간 기울어져 있거나 위면 전극과 바닥 전극의 정렬에 오차가 있기 때문이다.

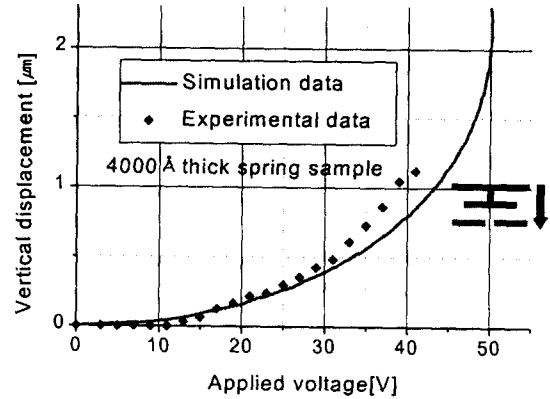


그림 14 광 변조기의 위상 변조시 인가 전압 대 변위
Fig. 14 Applied voltage vs. deflection of the case of phase modulation

7. 결론

본 논문에서는 후막 감광제(AZ4620)와 알루미늄을 이용한 표면 미세 가공 기술을 이용하여 적용 광학 분야 및 패턴 인식 분야에서 활용되는 광 변조기 배열을 제작하고 전기 기계적인 특성을 측정하였다. 광 변조기는 광 효율을 최대화하고 단위 광 변조기간의 기계적인 간섭을 없애기 위하여 스프링 및 위면 전극이 거울판의 아래에 위치하도록 세 개의 알루미늄 층으로 제작되었으며 개별적으로 구동되도록 하였다. 또한 입사된 빛을 위상 변조함에 있어서 연속성을 가지도록 입사된 빛의 위상뿐만 아니라 방향도 변조할 수 있게 설계되었다. 표면 미세 가공 기술을 이용하여 제작된 광 변조기 배열에서 각각의 단위 광 변조기는 매우 균일하게 제작되었으며 알루미늄의 증착시 열처리를 통하여 구조재로 쓰인 알루미늄의 초기 변형 없이 제작되었고 제작된 광 변조기는 음성 감광제(AZ5214)를 사용한 평탄화 공정을 통하여 거울판의 단차를 1100Å 이하로 줄일 수 있었다.

제작된 광 변조기의 전기 기계적 특성을 평가하기 위하여 헬륨-네온 레이저와 위치 검출 소자를 이용한 광학 측정 장치를 고안하였으며 이를 이용하여 위상 변조 및 방향 변조시의 정특성 및 동특성을 측정하였다. 약 0.4 μ m 두께의 스프링을 가진 광 변조기의 경우 방향 변조시 인가 전압 대 각 변위 측정 결과 하강 문턱 전압 약 45V이고 상승 문턱 전압은 약 38V로 측정되었으며 방향 변조시의 공진 주파수는 약 11.8kHz 였다. 또한 위상 변조시 약 40V에서 1 μ m의 수직 변위를 가졌다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부의 연구비 지원(과제번호 97-NF-02-10-A-01)에 의하여 이루어졌습니다.

저 자 소 개

참 고 문 헌

[1] Robert K. Tyson, Principles of Adaptive Optics, Academic Press, San Diego, CA 1990.

[2] Martin Yellin, "USING MEMBRANE MIRRORS IN ADAPTIVE OPTICS," Proc. SPIE vol. 75, pp. 97~102, 1976.

[3] Mark A. Ealey and John F. Washeba, "Continuous facesheet low voltage deformable mirrors," Opt. Eng., vol. 29, no. 10, pp. 1191~1198, Oct 1990.

[4] G. Vdovin, P. M. Sarro, and S. Middelhoek, "Technology and application of micromachined adaptive optics," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 9, no. 2, R8~R20, June, 1999.

[5] Thomas. G. Bifano, Julie Perreault, Raji Krishnamoorthy Mali, and Mark N. Horenstein, "Microelectromechanical Deformable Mirrors," IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, vol. 5, no. 1, pp. 83~89, Jan/Feb, 1999.

[6] Guo-Dung J. SU, Li FAN, and Ming C. WU, "SURFACE-MICROMACHINED ADAPTIVE MICROMIRROR ARRAYS WITH LARGE STROKES", Transducers'99, pp. 578~581, June 7-10, Sendai, Japan, 1999.

[7] J. E. Pearson and S. Hansen, "Experiment studies of a deformable-mirror adaptive optical system," Journal of the Optical Society of America, vol. 67, no. 3, pp. 325~333, March, 1977.

[8] Seok-Whan Chung and Yong-Kweon Kim, "Fabrication and Measurement of 10x10 micro SLM array for phase and amplitude modulation", MOEMS'99, Mainz, Germany, pp. 49-53, 1999.

[9] S. W. Chung and Y. K. Kim, "Measurements of a Fabricated Micro Mirror Using a Lateral-Effect Position-Sensitive Photodiode", Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, no. 6, pp. 861-865, Dec., 1998.



정석환 (鄭錫煥)

1994년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(석사). 1996-현재 동 대학원 전기공학부 박사과정
전화 : 02-888-5017, 팩스 : 02-873-9953
E-mail: swchung@snu.ac.kr



김용권 (金容權)

1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 졸업(석사). 1990년 동경대 대학원 졸업(공학박). 1990년 히다찌 중앙연구소 연구원. 1992년-현재 서울대 전기공학부 부교수

전화: 02-880-7440, 팩스: 02-873-9953
E-mail: yongkim@plaza.snu.ac.kr