

위상 및 방향 변조를 위한 초소형 광 변조기의 설계와 제작

정석환, 김용권
서울대 전기공학부

Design and Fabrication of Micro SLM for Phase and Amplitude Modulation

Seok-Whan Chung, Yong-Kweon Kim
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - In this paper, a 10×10 micro SLM array for phase and amplitude modulation of incident light is designed and fabricated using surface micromachining technology. Hidden spring structure is used in order to maximize the fill-factor and minimize diffraction effect at the support posts. Static and dynamic characteristics of designed micro SLM are simulated with ABAQUS and measured with optical measurement system using He-Ne laser and PSD(position sensitive devise).

향하여 상하운동을 하게된다. 따라서 설계된 치수에 의하여 상하 운동시 최대 변위는 4 μ m이고 회전 운동시 최대 변위는 $\pm 5.4^\circ$ 이다. 또한 상하 운동이나 회전 운동시 미러면이 위면 전극 지지 기둥에 먼저 닿도록 설계되어 위면 전극이 바닥 전극에 닿아 단락이 되는 것을 방지하였다.

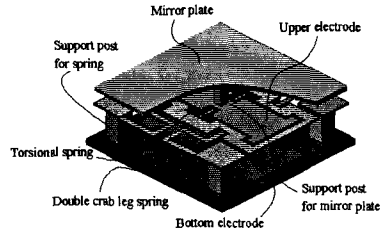


그림 1 설계된 초소형 광 변조기의 개략도

표 1 설계된 초소형 광 변조기의 각 부분 치수

각 부분 명칭	설계된 크기
미러면	100×100×1 μ m ³
미러 지지 기둥	8×8×4 μ m ³
스프링	3 μ m 폭, 0.5 μ m 두께
위면 전극	1.5 μ m 두께
미러면과 위면 전극간 간격	4 μ m
위면 전극과 바닥 전극간 간격	6 μ m

1. 서 론

최근 적응광학 및 패턴인식 분야에서 광 변조기는 초소형 거울의 능동제어를 통해 입사된 빛의 위상 및 방향을 변조하는 데 이용되고 있다. 광 변조기란 입사된 빛의 위상 및 방향을 변조하는 소자이다. 광 변조기 중 deformable mirror는 optical wavefront의 위상을 변조하는 광 변조기이다[1]. 또한 물체 미세가공기술을 이용하여 continuous surface deformable mirror가 광 변조기의 일종으로써 Delft 대학과 DIMES에서 제작되었다[2]. 보스톤 대학에서는 MUMPS를 이용하여 미러 멤브레인 아래에 위치한 개별 전극에 의하여 구동되는 continuous membrane mirror를 제작하였다[3]. 그러나 위에서 제시된 광 변조기들은 개별적인 미러를 사용하지 않아 비록 개별 전극을 두어 구동한다 하더라도 inter-actuator coupling이 발생하게 된다.

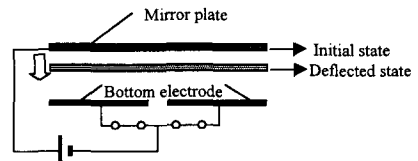
따라서 본 논문에서는 상하왕복 및 회전 모드 구동을 통하여 빛의 위상 및 방향을 변조할 수 있는 광 변조기를 제안하였다. 각각의 초소형 광 변조기는 미러면 아래의 개별 전극을 통하여 개별적으로 구동될 수 있다. 표면 미세 가공 기술을 이용하여 10×10 이차원 초소형 광 변조기 배열을 설계하고 제작하였다. 또한 hidden spring structure를 사용하여 광효율(Fill-Factor)를 최대화 하였으며 지지 기둥에서의 회절과 산란을 최소화 시켰다.

2. 본 론

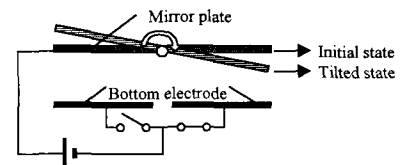
2.1 구조 설계

설계된 광 변조기는 연속적인 미러면을 사용하는 것이 아니라 독립적으로 구동가능한 조각 거울을 사용하는 것이다. 설계된 초소형 광 변조기는 그림 1 처럼 미러판, 위면 전극, 한 개의 지지 기둥, 네 개의 위면 전극 지지 기둥 및 바닥 전극으로 구성되어 있다. 표 1은 설계된 초소형 광 변조기의 치수를 나타낸다.

그림 2는 광 변조기의 동작모드를 보여주고 있다. 만일 전압이 위면 전극과 바닥 전극 중 한 곳에 인가되면 미러면은 바닥 전극쪽으로 회전운동을 하고 전압이 위면 전극과 두 개의 바닥 전극에 인가되면 미러면은 바닥



(a) 위상 변조시 상하 운동 모드



(b) 방향 변조시 회전 운동 모드
그림 2 초소형 광 변조기의 구동 모드

위상 변조와 방향 변조를 위해서 두 가지 형태의 스프링

을 사용하였다. 위상 변조를 위하여 네 개의 double crab leg spring을 사용하였고 방향 변조를 위하여 두 개의 비틀림 스프링을 사용하였다.

2.2 전기 기계적 특성 해석

설계된 초소형 광 변조기의 정특성 및 동특성을 해석하고 시뮬레이션 하였다. 해석을 위하여 위상 변조시 사용하는 double crab leg spring의 스프링 상수를 계산하고 ABAQUS를 사용한 FEM 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 계산된 스프링 상수는 0.289N/m이고 FEM 시뮬레이션 결과는 0.298N/m로 둘 사이의 차이는 무시할 정도이다. 또한 방향 변조시는 비틀림 스프링과 double crab leg spring의 스프링이 직렬로 연결되어 있는 효과를 보여주므로 이에 따른 스프링 상수를 계산하였다. 계산된 스프링 상수로 위상 변조시와 방향 변조시의 인가 전압대 변형량과 공진 주파수를 각각 계산하였고 FEM 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 그림 3은 설계된 초소형 광 변조기의 인가 전압대 변형량을 보여주는 FEM 시뮬레이션으로 얻은 공진 모드를 보여주고 있다.

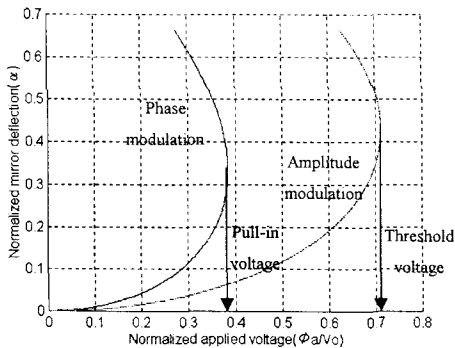
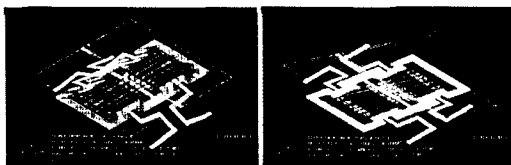


그림 3 광 변조기의 정규화된 인가 전압대 변형량

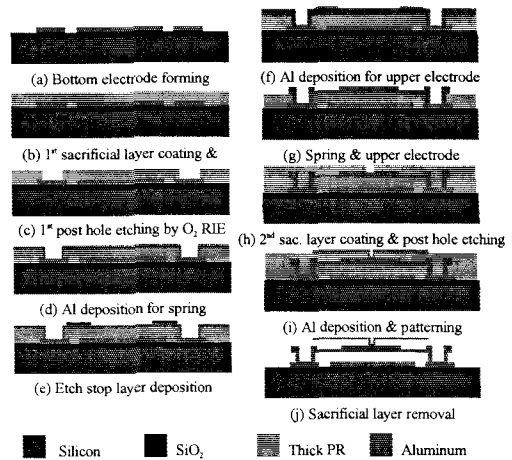


(a) 위상 변조시 (b) 방향 변조시
그림 4 ABAQUS로 시뮬레이션한 공진 모드

2.3 초소형 광 변조기의 제작 공정

초소형 광 변조기는 모두 6장의 마스크를 사용하여 표면 미세가공기술을 이용하여 제작하였다[4]. 따라서 움직이는 구조재로는 알루미늄을 사용하였고 희생층으로는 후막 감광제를 사용하였다. 후막 감광제로는 AZ4562를 사용하여 위면 전극과 바닥 전극과의 간격인 6 μ m와 미러면과 위면 전극과의 간격인 4 μ m의 희생층을 형성하였다. 또한 위면 전극과 스프링의 두께를 달리하기 위하여 PECVD SiO₂를 식각 정지 마스크로 사용하였다. 위와 같이 후막 감광제 위에 PECVD SiO₂ 식각 정지 마스크를 증착시키기 위하여 후막 희생층을 210 $^{\circ}$ C까지 열처리하여 SiO₂ 증착 중 열에 의해 발생하는 PR burning을 방지하였다. 그림 5는 초소형 광 변조기의 제작 공정도이다. 공정 중 모든 알루미늄 막은 STS ICP Etcher를 이용하여 건식 식각하였으며 희생층으로

사용된 후막 감광제에 패터닝할 때는 PECVD SiO₂를 식각 마스크로 사용하여 반응성 이온 식각으로 건식 식각하였다. 또한 최종적으로 구조물을 띄우기 위하여 산



소 플라즈마 식각을 이용하여 희생층을 제거하였다. 그림 5 초소형 광 변조기의 제작 공정도

2.4 초소형 광 변조기의 제작 결과

10 \times 10 이차원 초소형 광 변조기 배열을 표면 미세가공기술을 이용하여 제작하였다. 초소형 광 변조기 배열은 전 면적으로 균일하게 제작되었으며 최종적인 희생층 제거 후 알루미늄 구조물의 초기 변형 없이 제작되었다. 희생층의 총 식각 시간은 표 2와 같은 식각 조건으로 약 45분 정도였다.

표 2 산소 플라즈마를 이용한 희생층 식각 조건

식각 변수	식각 조건
Chamber Pressure	1.2 Torr
MW Power	300W
Used Gas	O ₂ 200sccm

또한 알루미늄의 건식 식각으로 어느 정도 수직하게 식각 되었지만 사진 식각 공정시의 치수 감소로 인하여 미러면의 크기가 약간 감소하였다. 따라서 제작된 초소형 광 변조기의 광효율은 약 91.7%로 계산되었다. 스프링과 위면 전극을 초기 변형 없이 제작하기 위하여 스프링과 위면 전극 알루미늄의 열 진공 증착시 150 $^{\circ}$ C로 가열하면서 증착하였다. 따라서 그림 6에서 보는바와 같이 스프링의 초기 변형 없이 제작되었다. 그림 6은 제작된 초소형 광 변조기 배열을 보여주고 있다. 또한 그림 7은 제작된 광 변조기의 위면 전극과 스프링 형상을 보여주고 있다.

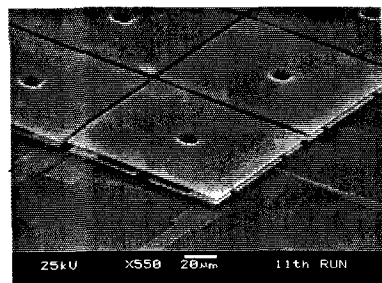


그림 6 제작된 광 변조기 배열의 전자현미경 사진

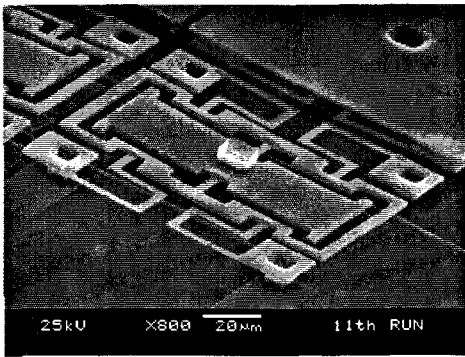


그림 7 제작된 위면 전극과 스프링의 전자 현미경 사진

2.5 초소형 광 변조기의 성능 측정

제작된 초소형 광 변조기의 전기 기계적 특성을 측정하기 위하여 광학 측정 장치를 이용하였다[5]. 광학 측정 장치는 헬륨 네온 레이저와 위치 검출 소자 및 기타 렌즈등의 광학 부품으로 이루어져 있다. 성능 측정에 사용된 광 변조기는 스프링의 두께가 4000Å이다. 그림 8은 광학 측정 장치의 개략도이다. 방향 변조시 인가 전압대 변위각 측정 결과 하강 문턱 전압은 약 44V이고 상승 문턱 전압은 약 34V로 측정되었다. 또한 방향 변조시의 공진 주파수는 약 11.8kHz 였다. 그림 9는 초소형 광 변조기의 전기 기계적 특성 측정 결과이다.

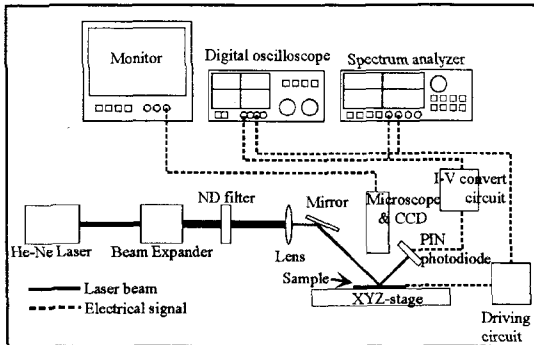
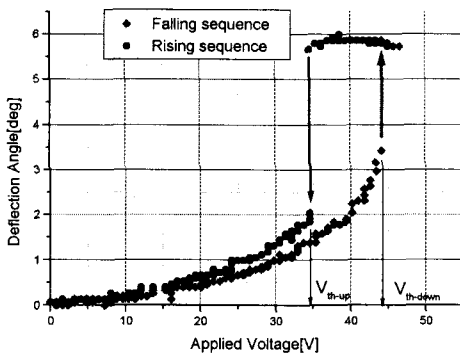
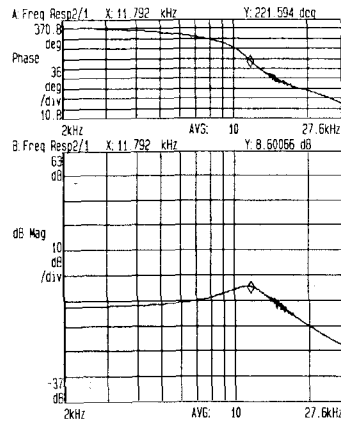


그림 8 초소형 광 변조기의 성능측정을 위한 광학 측정 장치의 개략도



(a) 인가전압대 각변위



(b) 주파수 특성

그림 9 방향 변조시 측정된 초소형 광 변조기의 전기 기계적 특성

위의 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 비교해 볼 때 인가 전압대 변위각에서 시뮬레이션 결과는 하강 문턱 전압이 42.1V 였고 상승 문턱 전압은 37V로 약간의 차이를 보이고 있다. 또한 공진 주파수의 시뮬레이션 결과는 10.4kHz 였다. 따라서 어느 정도 시뮬레이션의 타당성을 입증하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 표면 미세 가공 기술을 이용하여 입사된 빛의 방향 및 위상을 바로잡아주는 10×10 이차원 초소형 거울 배열을 이용한 광 변조기를 설계하고 제작하였다. 광 변조기에서 제일 중요한 fill-factor를 최소화하고 초소형 거울을 지지하고 있는 기둥에서의 빛의 회절과 산란을 막기 위하여 hidden spring structure를 채택하였다. Matlab과 ABAQUS를 이용하여 설계된 초소형 광 변조기의 전기 기계적 특성을 시뮬레이션 하였으며 또한 레이저와 위치 검출 소자를 이용하여 제작된 광 변조기의 전기 기계적 성능을 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교 평가하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Raj B. Apte, Francisco S. A. Sandejas, William C. Banyai, and David M. Bloom, Deformable Grating Light Valves for High Resolution Displays, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton-Head, South Carolina, June 13-16 1994, pp. 1-6.
- [2] G. Vdovin, and S. Middelhoek, "Deformable mirror display with continuous reflecting surface micromachined in silicon," *Proc. IEEE MEMS* 95, Amsterdam, the Netherlands, Jan. 1995, pp.61-65.
- [3] Thomas G. Bifano, Raji Krishnamoorthy Mali, John K. Dorton, Julie Perreault, Nelsimar Vandelli, Mark N. Horenstein, and David A. Castanon, "Continuous-membrane surface-micromachined silicon mirror," *Opt. Eng.* Vol. 36(5), pp. 1354-1360, 1997.
- [4] S.-W. Chung, J.-W. Shin, Y.-K. Kim and B.-S. Han, "Design and fabrication of micro mirror supported by electroplated nickel posts", *Sensors and Actuators*, Vol.54, No.1-3, pp. 464-467, 1996.
- [5] S.-W. Chung and Y.-K. Kim, "Measurement of a fabricated micro mirror using a lateral-effect position sensitive photodiode", *IEEE TRANSACTION ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Vol. 45, No.6, Dec. 1998.