

XY-Stage에 의해 정적인 변위를 갖는 미세 프레넬 렌즈(Micro-Fresnel Lens)의 설계 및 제작

김재흥, 안시홍, 임형택, 김용권
서울대학교 전기공학부

Design and Fabrication of Movable Micro-Fresnel Lens on XY-stage

Che-Heung Kim, Si-Hong Ahn, Hyung-Taek Lim, and Yong-Kweon Kim
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - The micro fresnel lens(MFL) was modeled and fabricated on a XY-stage electrostatically driven by comb actuator. The modeled MFL was approximated as a step shape with 4-phase and 4-zone plate. The focal length and diameter of the MFL is 20mm and 912μm, respectively. The XY-stage suspending the MFL is designed to generate a large static displacement up to about 20μm. On SOI substrates, we first fabricated MFL using the RIE(reactive ion etching) technology and then patterned and etched bulk silicon to make XY-stage. After the fabrication of all structures on top side of the SOI substrates, Si₃N₄ was deposited for passivation of all structures using PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition). All the MFL systems with comb drive actuator were released by KOH etching from the bottom side of the SOI wafer using double-sided alignment technique. In fabrication of MFL, a dry etching conditions is established in order to improve surface roughness and to control the etched depth.

Keyword : fresnel lens, comb actuator, RIE(reactive ion etching)

1. 서 론

광섬유 커플링(Optical Fiber Coupling), 광 스위칭(Optical Switching), Optical Pickup 장치 등에서 광효율은 센서의 감도나 신뢰도를 보장하여 전체 시스템의 품질에 기여하므로, 그 효율을 향상시키기 위한 많은 방법들이 제시되어 왔다[1]. 광학계에 의한 집광을 통하여 광학시스템의 효율을 향상시키는 방법도 이들 중 한 가지이다. 이러한 집광장치는 광학시스템의 미세한 신호를 집중하여 센서의 감도를 높일 뿐만 아니라 정밀한 위치제어를 통하여 신뢰도를 향상시킬 수 있어야 하며, 비교적 크기가 작은 시스템으로 구현 가능하여야 한다.

본 논문에서는 마이크로머시닝(Micromachining) 기술로 실리콘을 식각하여 정적으로 미세하게 제어할 수 있는 XY-stage를 형성하고 그 중앙부(Mass)에 미세 프레넬 렌즈(Micro Fresnel Lens)를 제작함으로써 광학시스템이 요구하는 작고 정밀한 집광장치를 구현하였다.

2. 이론 및 설계

2.1 미세 프레넬 렌즈(Micro Fresnel Lens)

광선(Optical beam)의 수렴(Converging)과 발산

(Diverging)은 광선의 파면의 곡률(Curvature)에 의하여 결정된다. 부피 렌즈(Bulk lens)와 마찬가지로 프레넬 렌즈(Fresnel Lens)도 광선의 파면의 곡률을 변화시켜 원하는 형태를 얻는다. 그림 1에서는 광선의 파면을 평면에서 구면으로 변화시켜 광선을 한점에 집중시키는 경우이다. 프레넬 렌즈는 부피 렌즈와는 달리 매우 얇은 막을 통하여 부피 렌즈가 얻는 동일한 효과를 획득할 수 있다.

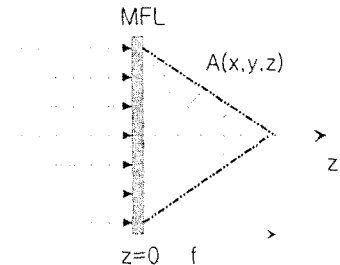


그림 1 MFL에 의한 파면의 곡률 변화

프레넬 렌즈는 그림 2와 같은 입체적으로 부드러운 곡면을 갖는 프레넬 존 플레이트(Fresnel Zone Plate)로 구성되어 있다. 이 곡면은 광선이 렌즈의 가장 두꺼운 부분을 기준으로 2π만큼의 위상차(Phase Shift)를 갖도록 한다. 중앙부의 구획은 일반적인 부피 굴절 렌즈(Bulk Refractive Lens)와 거의 같고, 외각으로 갈수록 구획의 간격이 광선의 파장과 같아지게 된다. 이와 같은 성질은 프레넬 렌즈가 회절(Diffraction) 특성을 갖게 한다.



그림 2 프레넬 렌즈의 구획(zone plate)

2.1.1 프레넬 렌즈의 이론

프레넬 렌즈의 형태를 정량적으로 설명하기 위하여 그림 1의 경우를 상정한다. 수렴하는 구면파는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A(r, z) = \frac{A_0}{\rho} \exp[-i(k\rho + \omega t)] = \frac{A_0}{\rho} \exp[i\psi(r, z)] \quad \dots(1)$$

여기서 A₀는 파의 진폭, ρ² = (z - f)² + r², f는 초

점거리, $k=2\pi/\lambda$, $r=\sqrt{x^2+y^2}$

A(x,y,z) 파면의 $t=0$ 에서의 위상과 프레넬 렌즈를 통과하기 직전의 위상은

$$\psi(x, y, 0^+) = -k\sqrt{f^2 + r^2} \quad \dots(2)$$

이고, 여기에 식의 유도를 위하여 위상의 DC 천이(DC Shift) 외에는 광학적 특성을 변화시키지 않는 상수항을 첨가하면,

$$\varphi^+(r) = \psi(x, y, 0^+) + kf + 2\pi = 2\pi + k(f - \sqrt{f^2 + r^2}) \quad \dots(3)$$

이 때 각 구획의 반지름은 다음과 같이 주어진다.

$$k(f - \sqrt{f^2 + r_m^2}) = -2\pi m \quad \dots(4)$$

$m=1, 2, 3, \dots$ (zone number)

이 결과를 r_m 에 대하여 정리하면,

$$r_m = \sqrt{2\lambda fm + (\lambda m)^2} \approx \sqrt{2\lambda fm} \quad \dots(5)$$

이고 식 (3)은 다음과 같이 변형된다.

$$\varphi_m^+(r) = 2\pi(m+1) + k(f - \sqrt{f^2 + r^2}) \quad \dots(6)$$

또한 파가 프레넬 렌즈를 통과하면서 겪는 위상의 변화는

$$\varphi_{FLm}(r) = \varphi_m^+(r) - \varphi_m^-(r) \quad \dots(7)$$

여기서 $\varphi_m^-(r)$ 과 $\varphi_m^+(r)$ 은 각각 프레넬 렌즈의 m 번째 구획을 통과하기 전과 후의 파의 위상

이제 식(7)을 이용하여 $\varphi_m^+(r)$ 을 정리하면

$$\begin{aligned} \varphi_m^+(r) &= \varphi_m^-(r) + kn_{FL}d_m(r) + kn_i[\Delta - d_m(r)] \\ &= \varphi_m^-(r) + k(n_{FL} - n_i)d_m(r) + kn_i\Delta \quad \dots(8) \end{aligned}$$

여기서 $d_m(r)$ 은 m 번째 구획의 두께의 형태. n_{FL} 과 n_i 는 각각 프레넬 렌즈와 주위매질의 굴절율, Δ 는 프레넬 렌즈의 최대 두께.

이 때 식 전개 편의를 위하여 프레넬 렌즈를 통과하기 전의 위상을 0으로 놓으면 $\varphi_m^-(r)=0$, 이것과 식 (6)을 식(8)에 대입하고, Δ 는 상수로서 DC 천이에만 관계하므로 생략하여 $d_m(r)$ 에 관해 정리하면,

$$d_m(r) = \frac{\lambda(m+1) - \sqrt{f^2 + r^2}}{n_{FL} - n_i} \quad \dots(9)$$

이다.

이 때 렌즈의 최소 구획의 간격은 렌즈의 최외각 구획, $r_M = \sqrt{2\lambda fM}$ 과 그 전 구획, $r_{M-1} = \sqrt{2\lambda f(M-1)}$ 의 차인

$$r_M - r_{M-1} = \sqrt{2\lambda fM} - \sqrt{2\lambda f(M-1)} \quad \dots(10)$$

이다[2-4].

2.1.2 모델링 (4-phase 계단 모양 근사)

식(9)는 매끄러운 곡면이므로 일반적인 몸체 실리콘(Bulk Silicon) 가공기술로는 구현하기 힘들다. 그러므로 몸체 실리콘의 건식 식각 기술의 사용을 전제하고 4단의 단차(4-Phase)를 갖는 계단 모양으로 근사하였다. 그림 3은 4단의 단차로 근사된 렌즈의 단면을 보여 준다. 렌즈의 가장 두꺼운 부분의 두께는 5200Å이고, 각 단의 단차는 1730Å이며, 각각의 구획 반경은 그림 3과 같다.

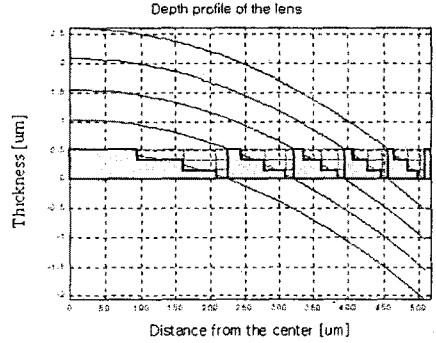


그림 3 설계된 마이크로 프레넬 렌즈의 단면도

2.2 XY-stage

XY-stage는 X, Y의 두 축 방향으로 최대 20 μ m의 정적인 변위를 가질 수 있도록 설계되었다. 빗모양 액츄에이터(comb actuator)는 빗살간의 간극이 2 μ m이며 높이는 15 μ m이다.

빗모양 액츄에이터는 빗모양 부분의 용량에 의한 정전력과 빔스프링(Beam Spring)의 복원력이 평형을 이루어 원하는 정적인 변위를 갖도록 한다. 빗모양 액츄에이터를 구동하기 위한 구동 전압은 다음과 같다.

$$V = \left(\frac{2gbxE}{\epsilon_0 N h} \right) \left(\sqrt{\frac{h}{L}} \right)^3 \quad \dots(11)$$

여기서 g 는 빗살간의 간극, b 는 빔스프링(Beam Spring)의 폭, x 는 구동 변위, E 는 영률(Young's Modulus), N 은 빗살의 개수, h 는 빗살의 깊이, L 은 빔스프링의 반축 길이.

제안된 XY-stage는 최대 변위 구동전압이 50V 내의가 되도록 설계하였다. 제작에 사용된 SOI 기판의 상층 실리콘의 두께가 15 μ m이므로 식(11)에서 h 값은 15 μ m이다. 또한 빗살의 폭과 간극이 건식 식각 시에 각각 감소하고 증가할 것을 감안하여 설계하였다.

3. 제 작

3.1 마이크로 프레넬 렌즈의 제작

마이크로 프레넬 렌즈가 4개의 단차(4-Phase)를 갖도록 2장의 마스크가 사용되었다. 단차의 수와 필요한 마스크의 개수의 관계는 식(12)와 같다[5].

$$N_m = \log_2 N_p \quad \dots(12)$$

여기서 N_m 과 N_p 는 각각 마스크의 개수와 단차의 수

렌즈의 식각 공정 조건은 표 1과 같다. 표 1의 방법 1은 SF_6 에 대한 O_2 의 비율을 조정하여 대략 580Å/min, 방법 2는 CCl_4 와 O_2 의 혼합가스로 4720Å/min의 식각율을 얻었다[6].

표 1. RIE 건식 식각 공정 조건 (식각 깊이 1730Å)

	SF_6 (sccm)	O_2 (sccm)	CCl_4 (sccm)	Power (W)	Time (sec)
방법 1	20	20	-	30	180
방법 2	-	5	70	200	22

처음 식각 공정에서 총 깊이의 2/3인 3460Å를, 다음 공정에서 나머지 1/3인 1730Å를 식각하여 4단을 형성하였다. AZ1512 양성 감광재(Positive Photoresist)를 하드마스크(Hard Mask)로 사용하였다. 제작된 마이크로 프레넬 렌즈와 렌즈의 두께 형상 (Depth Profile)은 각각 그림 4, 5와 같다.

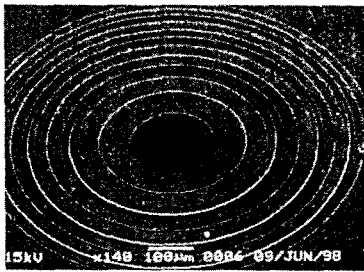


그림 4. 제작된 마이크로 프레넬 렌즈의 SEM사진

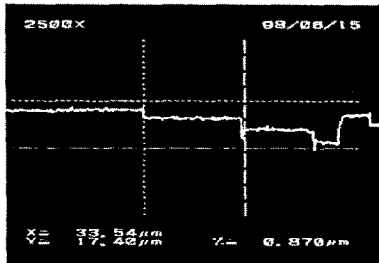


그림 5 제작된 MFL의 두께 형상

3.2 XY-stage의 제작

이미 제작된 렌즈를 보호하며, XY-stage의 구조물을 식각하기 위한 하드마스크로는 실리콘 산화막을 사용하였다. 구조물은 총 식각 깊이가 15 μ m이며, 역시 RIE로 건식 식각하였다. 실리콘 산화막은 PECVD로 증착하였으며, 그 두께는 3 μ m이다. 건식 식각이 끝난 후에 실리콘 산화막은 약 1 μ m 정도가 남도록 하였다. RIE에서의 실리콘과 실리콘 산화막의 식각 선택비는 대략 7:1 정도로 알려져 있다. XY-stage 구조물의 식각은 표 1의 방법 2의 조건으로 실시하였다. 그림 6(a)는 제작된 XY-stage의 빗모양 액츄에이터를, (b)는 XYstage 중앙부에 제작된 미세 프레넬 렌즈(MFL)를 각각 보여준다. 그림 7은 회생층이 제거되기 직전의 전체 구조물의 상태를 보여준다.



(a) (b)

그림 6 (a) 빗모양 전극구조물
(b) XY-stage 위에 제작된 MFL

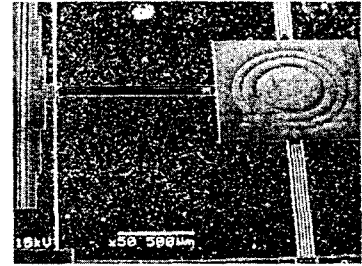


그림 7 회생층을 제거하기 직전의 MFL과 XY-stage

4. 결 론

SOI 기판에 몸체 실리콘의 건식식각 가공기술을 이용하여 XY-stage 와 그 중앙부에 마이크로 프레넬 렌즈를 제작함으로써 정밀한 변위 제어가 가능한 집광장치를 구현하였다. 마이크로 프레넬 렌즈는 4단의 단차를 가지는 계단 모양으로 근사하여 제작되었으며, 초점거리는 20mm이고, XY-stage의 최대 구동 변위는 X, Y 각 방향으로 20 μ m이다. 또한 마이크로 프레넬 렌즈의 정밀 가공을 위하여 실리콘의 건식 식각 조건을 확립하였다. 광섬유 커플링, 광 스위칭, Optical Pickup장치 등의 정밀 변위 제어가 필요한 광학장치에의 응용이 전망된다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [1] Teruhiro Shiono and Hisahito Ogawa, "Planar-optic-disk pickup with diffractive micro-optics", Applied Optics, Vol. 33, No. 31, pp.7350-7355, 1994
- [2] Teruhiro Shiono, Masatoshi Kitagawa, Kentaro Setsune, and Tsuneo Mitsuyu, "Reflection micro-Fresnel lenses and their use in an integrated focus sensor", Applied Optics, Vol. 28, No. 15, pp.3434-3442, 1989
- [3] S.valette, P. Mottier, "Intergrated lenses on silicon nitride waveguides", Optical engineering, Vol. 24, No. 2, pp.235-240, 1985
- [4] Micheal Bass (editor in chief) "Handbook of optics, 2nd edition Mc graw Hill", Vol. II, 1995
- [5] B. Goebel, L. L.Wang, and T. Tschudi, "Multilayer technology for diffractive optical elements", Vol. 35, No. 22, pp.4490-4493, 1996
- [6] Tsengyou Syau, B. Jayant Baliga, and Raymond W. Hamaker, "Reactive Ion Etching of Silicon Trenches Using SF_6/O_2 Gas Mixtures", J.Electrochem. Soc., Vol. 138, No. 10, pp.3076-3081, 1991