

엑사이머 레이저를 이용한 마이크로렌즈 제작

김철세*, 김재도**, 윤경구***

Microlens Fabrication by Using Excimer Laser

Cheoul-Sae Kim*, Jae-Do Kim** and Kyung-Ku Yoon***

ABSTRACT

A new microlens fabrication technique, the excimer laser lithography is developed. This bases on the pulsed laser irradiation and the transfer of a chromium-on-quartz reticle on to the polymer surface with a proper projection optics system. An excimer laser lithography system with 1/4 and 1/20 demagnification ratios was constructed first, and the photoablation characteristics of the PMMA and Polyimide were experimentally examined using this system. For two different shapes of microlenses, a spherical lens and a cylindrical lens, fabrication techniques were investigated. One for the spherical lens is a combination of the mask pattern projection and fraction effect. The other for the cylindrical lens is a combination of the mask pattern projection and the relative movement of a specimen. The result shows that various shapes of micro optical components can be easily fabricated by the excimer laser lithography.

Key Words : Microlens(마이크로렌즈), Chromium-on-quartz(크롬박막유리), Polymer(폴리머), Excimer laser(엑사이머 레이저)

기호설명

w = radial width
m = demagnification
di = chromium-covered reflective ring of radial width
ti = ratio of transparent area to total area
 Φ_i = laser fluence in the sample at radius ri
 Φ_0 = laser fluence in the plane of the reticle

1. 서론

미세 가공기술은 크게 화학적, 선택적 식각기술을 이용한 부피 미세가공법과 표면미세가공법, 3차원적 구조의 실현하기 위해 개발된 실리콘 용융결합법과 리소그래피(lithography) 등으로 나눌 수 있으며, 이미 이와 같은 기술들을 이용하여 초소형 압력센서, 유량센서, 가속도계 등의 센서와 미소 기계요소들이 제작되어 사용되고 있다.

미세 가공기술을 이용하여 광학요소를 제작할 경우 레이저 다이오드와 같은 광전자(optoelectronics) 요소들과 일체형으로 제작할 수 있으므로 전체 제품의 크기를 작게 할 수 있음은 물론 공정의 단축에 따라 생산비용도 줄일 수 있는 장점을 갖게 된다.

2002년 4월 23일 접수

* (주)신도리코
** 인하대학교 기계공학과
*** 한국기계연구원

최근에는 VLSI 집적도의 증가, 광학 소자 집적화의 발전과 더불어 마이크로렌즈 제작에 대한 관심이 높아지고 있다. 마이크로렌즈는 Lippmann⁽¹⁾에 의해 제안된 integral photography에서 중요한 역할을 할뿐만 아니라 detector array⁽²⁾의 효율을 높이는 데 사용된다. 그리고 digital optical processing이나 광학 컴퓨터의 분야⁽³⁾에서는 array illuminator나 내부 연결 소자로 쓰이고 있다. 마이크로렌즈의 제작 방법은 불순물 확산과 다양한 재료의 첨가에 의한 액상격자의 성장과정의 불포화정도를 변화시켜 제작하는 액상식각 방법⁽⁴⁾, proton을 사용하여 적정한 온도와 압력에서 에칭하는 광이온빔 리소그라피⁽⁵⁾, X선을 광원으로 하여 원기둥 모양의 photoresist를 형성하고 표면장력에 의해 제작하는 X-ray 리소그라피 방법⁽⁶⁻⁷⁾과 레이저 펄스를 조사하여 기체와 재료의 반응을 활성화시켜 제작하는 레이저 건식 유도 에칭법⁽⁸⁾이 있다.

본 연구에서는 마이크로렌즈의 제작을 위한 엑사이머 레이저 리소그라피 방법에 있어서 펄스 및 에너지 밀도의 영향과 다중원형 마스크의 설계에 대한 실험을 진행하였다. UV 파장에 대한 가공성이 우수한 폴리머를 대상으로 파장이 248nm인 KrF 엑사이머 레이저를 사용하여 마스크상의 패턴을 이미징렌즈를 이용하여 시편의 표면에 축소 투영하는 방법, 즉 엑사이머 레이저 리소그라피 공정을 이용하여 마이크로렌즈의 제작을 시도하였다. 축소 투영 방법은 마스크를 가공패턴보다 크게 제작하므로 손쉽게 가공이 가능하고, 축소율의 제곱에 비례하는 에너지밀도로 가공을 하므로 레이저빔을 효율적으로 사용할 수 있다는 장점이 있다.

실험에 사용된 마스크는 가공목적에 따라 원형 다중 슬릿과 반구형의 패턴을 가지며, 쿼츠 위에 100nm의 두께로 증착된 크롬층을 전자빔 묘화장치를 제거시켜 패턴을 가공하였다. 원형 다중 슬릿 형태의 마스크는 프라운 호퍼의 회절에 의한 에너지 밀도 분포의 계산을 통해 슬릿 간격을 설정하였고, 반원형은 가공하고자 하는 원통형 렌즈의 단면 형상과 동일한 패턴으로 제작하였다. 이들 마스크를 이용하여 1/4 및 1/20으로 축소 투영하여 마이크로렌즈를 제작하였다.

2. 이론

2.1 다중원형 마스크의 설계

레이저 에너지 분포를 변화시키기 위해 마스크

모양을 일련의 원형모양으로 제작하는데 각 원의 나열을 $i = 1, 2, \dots, n-1, n$ 까지라고 정의하면 각각의 원은 레이저 빛이 통과하는 석영유리부분(d_i)과 크롬으로 덮여진 반사되는 부분으로 되어 있다. 이들의 각 폭은 d_i 와 $w-d_i$ 의 거리로 폭을 유지하고 있다. 이때 크롬으로 이루어진 부분과 빛이 통과하는 부분을 합한 폭은 항상 w 로 일정하다. 레이저 식각 공정에 의한 재료가공 과정 중에 열적 특성과 광학적 분해능에 의해 이론상의 가공범위와 실제 가공범위가 달라지게 된다. 3차원 복합곡면으로 이루어져 있는 반구형 마이크로렌즈의 경우 예비 실험을 통해서 열확산 거리와 사용되는 광학계의 이미지의 결상한계를 벗어나면 가공이 되지 않는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 실험은 광학계의 공간분해능과 PMMA의 열확산거리를 고려하여 R_{etch} 를 정확히 결정할 수는 없지만 한계영역을 알 수 있었다. R_{etch} 는 범위는 $1.5\mu m$ 에서 $2.5\mu m$ 사이에 존재한다. 따라서 식 (1)을 통해 w 가 $30\mu m$ 에서 $50\mu m$ 사이에 존재한다는 것을 알 수 있다.

$$w = R_{etch}/m \quad (1)$$

m 은 축소율로 본 실험에서는 1/20으로 하였다. 가공 후 렌즈의 형상이 오목(convex)한 모양으로 이루어지게 하기 위해 레이저 에너지는 외곽부분으로 갈수록 증가하고 내부로 갈수록 감소한다. 레이저 빛이 통과하는 양을 알아보면 식 (2)와 같다.⁽¹⁰⁾

$$t_i(r_i) = \frac{(r_i + w/2)^2 - (r_i + w/2 - d_i)^2}{(r_i + w/2)^2 - (r_i - w/2)^2} \quad (2)$$

r_i 는 중심에서 w 중심까지의 거리를 나타내고 w 의 간격 중에 빛이 통과하는 부분의 거리를 d_i 라 표시하였으며, $t_i(r_i)$ 는 빛이 마스크를 통과하는 비율이다. 레이저 에너지 밀도를 반경에 대한 축소율에 대한 에너지 밀도 Φ_i' 는 식 (3)과 같고 Φ_0 는 마스크에 도달하는 광 에너지 밀도이다.

$$\Phi_i'(r_i = r_i m) = \Phi_0 t_i(r_i) / m^2 \quad (3)$$

다중슬릿에 의한 회절과 간섭에 따라 에너지 밀도 분포를 프라운 호퍼의 다중 슬릿 공식⁽⁷⁾을 변형 적용하여 반복적인 수치해석법으로 마스크의 폭과

간격을 결정하였다.

2.2 반원형 마스크 설계

시편을 일정속도로 이송하면서 기하학적인 마스크 형상에 레이저빔을 조사하면 폴리머의 표면에 마스크의 패턴에 연속적으로 전사 되는 원리를 이용하여 원통형 렌즈 또는 프리즘과 같은 2차원 형상의 마이크로 렌즈의 가공이 가능하다.

예를 들어 반구형의 단면을 갖는 그루브를 가공하는 경우 최대 그루브 깊이(h)는 이송방향으로의 레이저빔의 폭(w), 즉 원통형 렌즈의 경우 반경, 레이저 펄스 반복율(f), 펄스당 제거깊이(d), 이송속도(v)에 의해서 식 (4)에 의하여 결정된다. 여기서 펄스당 제거깊이는 재료의 특성과 레이저 빔의 에너지밀도에 의해서 결정되므로 실험을 통해 데이터를 확보하여야 한다.

$$h = \frac{w \cdot f \cdot d}{v} \quad (4)$$

2.3 마스크 제작

회절을 이용한 구면 렌즈 가공을 위해 직경을 50 μ m, 100 μ m, 200 μ m을 대상으로 하여 w가 각각 30 μ m, 40 μ m, 50 μ m, 60 μ m인 마스크를 설계·제작하였고, Fig. 1과 같이 마스크의 이송을 통한 원통형 렌즈 가공을 위해 반지름이 1mm인 반원형 마스크를 제작하였다.

마스크는 엑사이머 레이저가 잘 투과되는 석영(quartz)유리 위에 크롬박막을 증착시킨 후 전자빔 직접묘화에 의해 제작하였다. Fig. 1은 원통형 렌즈의 제작을 위한 마스크의 패턴을 보여준다.

Fig. 2는 w=30 μ m인 경우에 대해서 설계된 마스크 패턴이다. 마스크 상에서의 최소 크롬층간의 간격은 광학계의 분해능 한계와 실험적 오차를 고려하여 5 μ m에서 20 μ m까지의 값을 사용하였다.

3. 실험방법 및 실험장치

엑사이머 레이저를 이용한 마이크로렌즈 제작을 위한 시스템은 Fig. 3과 같이 KrF 엑사이머 발진기, 축소투영 광학계 및 시편제어 기구부로 이루어져 있으며, 최대 25배까지 축소 투영이 가능하다. 모든 실험 장치는 무진동 광학 테이블 위에 설치하였으며, 마스크의 중심과 시편에 형성되는 이미지

의 영상 정보를 얻기 위해 CCD카메라를 설치하였다.

UV레이저에 의해 가공성이 좋은 PMMA와 Polyimide를 레이저 펄스당 에너지, 레이저 펄스 수 등의 가공변수를 설정하여 PMMA와 Polyimide에 레이저빔을 조사하여 형상을 가공한 후, 이 실험 결과를 이론상의 렌즈 형상과 비교하여 그 결과를 분석하고 가공 조건을 도출한다.

실험은 1/4과 1/20로 축소 투영하여 진행하였다. 반구형 마이크로렌즈 제작 실험은 레이저에서 나오는 빔의 크기가 마스크와는 차이가 있으므로 마스크를 선택적으로 가공하기 위해 3mm의 직사각형 마스크를 중간에 두어 레이저빔의 크기를 제한하였다. 실험을 통해 가공된 형상은 광학 현미경을 통해 대략적인 모양을 파악할 수 있었으나 보다 정확한 광학부품의 형상을 파악하기 위해 주사전자현미경을 통하여 관찰을 행하였으며, laser profilometer로 형상을 측정하였다.

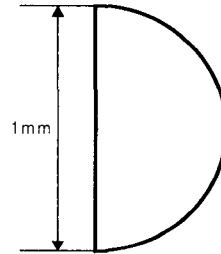


Fig. 1 Geometric pattern of mask for a cylindrical lens

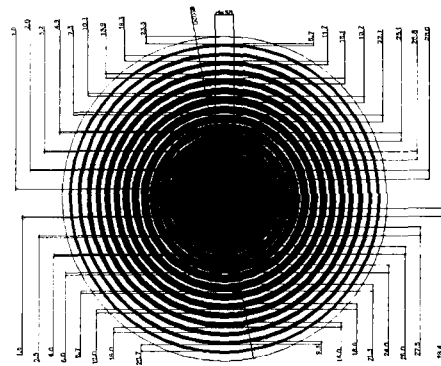


Fig. 2 Mask pattern with multiple slits (w=30 μ m) for a spherical lens

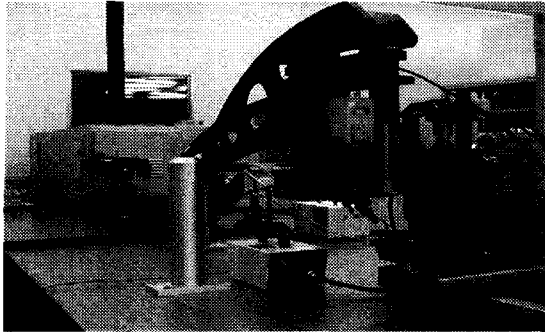


Fig. 3 Photograph of excimer laser system

4. 실험결과 및 고찰

4.1 Polymer 및 Polyimide 가공특성

Fig. 4와 Fig. 5는 일정한 에너지밀도의 조건에서 펄스수를 증가시켰을 때 PMMA와 Polyimide의 가공깊이의 변화를 측정한 결과로서 가공깊이는 펄스수에 비례하여 거의 선형적으로 증가함을 보이고 있기 때문에 가공깊이는 에너지밀도를 고정하고 펄스수의 제어에 의해서 충분히 조절됨을 보이고 있다. 또한 에너지 밀도변화에 따른 펄스수의 증감과 가공깊이와의 관계를 비교하였을 때 에너지밀도가 높고 펄스수가 증가할수록 가공정도가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 PMMA에 조사되는 펄스의 에너지밀도를 $70\text{mJ}/\text{cm}^2$ 에서 $980\text{mJ}/\text{cm}^2$ 까지 증가시키면서 제거율을 측정한 결과로 임계에너지밀도($250\text{mJ}/\text{cm}^2$) 이상의 에너지 밀도에서는 거의 선형적인 증가를 보여주고 있다. Fig. 7은 Polyimide를 $50\text{mJ}/\text{cm}^2$ 에서 $850\text{mJ}/\text{cm}^2$ 까지 증가시키면 제거율을 측정한 결과로서 PMMA와는 달리 낮은 에너지 밀도에서는 선형적인 증가를 보이나 에너지 밀도가 증가할수록 증가율이 감소하는 경향을 보여준다. 이와 같은 결과는 엑사이머 레이저에 의한 폴리머의 ablation에서 공통적으로 나타나는 현상으로서 레이저 광자의 침투깊이가 재료에 따라서 차이는 있지만 재료내부의 일정깊이로 한정되기 때문일 것으로 분석된다. 가공 깊이 방향의 표면조도는 에너지 밀도에 따라 형성되는 단위 펄스당 가공깊이에 의해 결정되므로 에너지 밀도를 낮추면 표면조도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

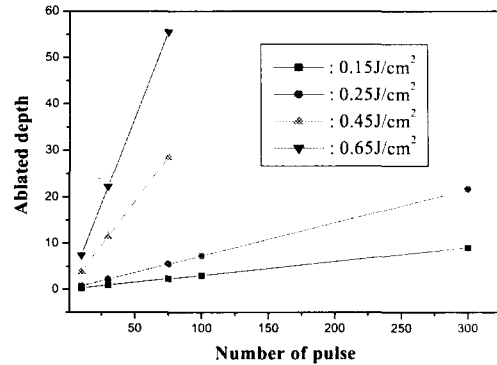


Fig. 4 Plots of etch depth versus numbers of pulses (PMMA)

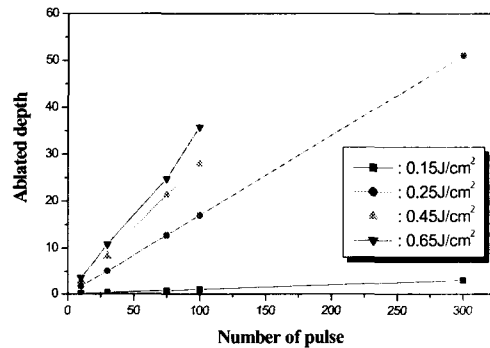


Fig. 5 Plots of etch depth versus numbers of pulses (Polyimide)

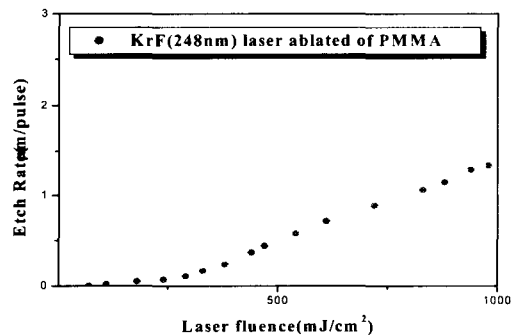


Fig. 6 Plot of etch depth versus fluence (PMMA)

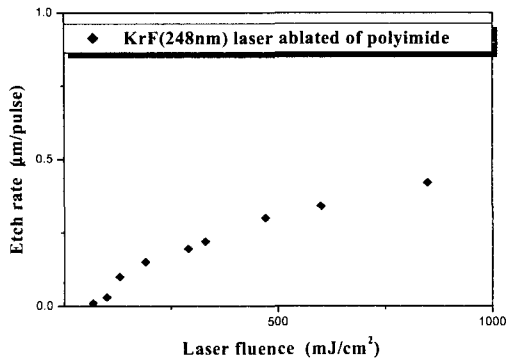


Fig. 7 Plot of etch depth versus fluence (polyimide)

4.2 구면 마이크로렌즈 제작

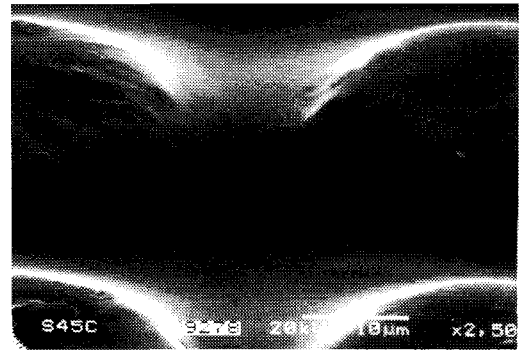
다중 원형 마스크를 사용한 구면 마이크로렌즈 가공실험에서 에너지 밀도가 100mJ/cm²이하의 조건에서는 펄스당 제거깊이가 매우 작고 또한 가공 상태가 좋지 않게 나타났으며 이는 광학현미경으로 관찰할 수 있었다. 이것은 회절에 의한 에너지의 상쇄와 정확한 이미지 결상이 이루어지지 않은 것에 기인한다고 생각된다. 일반적으로 높은 에너지 밀도 영역에서는 펄스 당 제거 깊이가 증가하고 PMMA의 가공이 깨끗하게 됨을 광학현미경으로 관찰할 수 있었다. 단펄스에서는 마스크를 통한 회절 변화가 보이지 않고 가공성이 좋지 않기 때문에 펄스 수를 200pulse, 50Hz 이상으로 하여 가공하였다. 따라서 실험은 100mJ/cm²를 최저 에너지로 설정하고 펄스 수와 에너지를 조절하여 최적의 가공범위를 설정하였다.

다중 원형 마스크의 폭과 간격에 따라 에너지 분포가 달라지게 되므로 렌즈의 형상이 변화하고 또한 노출시간에 따라서도 렌즈의 형상이 바뀌게 됨을 알 수 있었다.

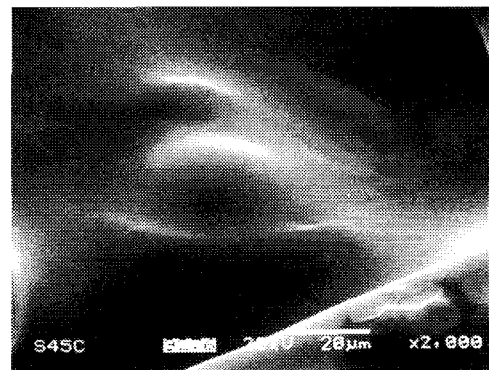
광학적 성능 평가 이전에 렌즈의 외형을 파악하는 것이 가공변수를 결정하는 데 절대적으로 필요하다. 가장 간단한 방법은 반사형 광학현미경을 이용하여 관찰하면서 고배율로 높여 가며 대략적인 외형을 파악하는 것이다. 세밀한 외형을 관찰하기 위해서 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 사진을 촬영하였다.

Fig. 8(a)는 레이저 식각공정에 의한 구면 마이크로렌즈의 외형을 주사전자현미경으로 촬영한 것이다. 반경 25µm 외부는 부드러운 곡률이 형성되고

있으나 반경 25µm 내부에서는 가공이 이루어지지 않고 평평한 모양을 유지하고 있는데 이것은 광학계의 결상한계 또는 제거에 필요한 임계에너지밀도보다 낮은 에너지밀도에 기인하는 것으로 분석된다. 즉 최소 폭이 1µm인 마스크 패턴이 축소 투영되면 0.05µm가 되지만 본 실험에서 사용한 축소 투영 광학계의 경우 결상한계가 2µm 정도이므로 결상이 생기지 않았다. 따라서 마스크를 재설계하여 축소 투영 시 결상 선폭이 2µm가 될 수 있게 다시 제작하였다.



(a)



(b)

Fig. 8 Scanning electron micrograph of the micro spherical lens fabricated by the excimer laser lithography

Fig. 8(b)는 280mJ/cm², 150pulse의 조건으로 가공한 것으로서 일부분 구면 렌즈 형태를 확인할 수 있었지만 완전한 구면 렌즈의 형태를 갖지 못하는 것으로 측정되었다. 이와 같이 높은 에너지밀도의

조건에서는 중앙부에도 곡률이 형성되는 것은 정확한 결상이 이루어지지 않는 않지만 부분적으로 폴리머의 일부가 연화되면서 표면장력에 의해서 곡률이 형성된 것으로 보인다.

Fig. 9는 Fig. 8(b)를 laser profilometer로 측정된 결과로서 렌즈의 높이 4.5 μm 이다.

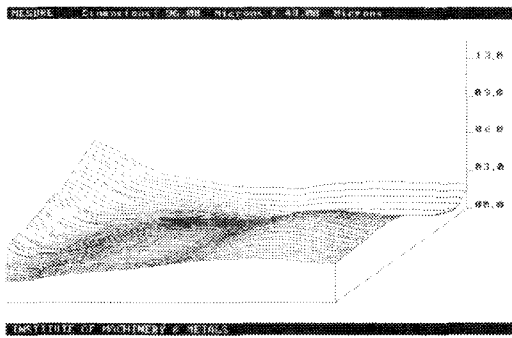


Fig. 9 Surface profile of the micro spherical lens measured by a laser profilometer

4.3 원통형 마이크로렌즈 제작

원통형 렌즈의 가공에 있어서 중요한 변수는 가공 시간, 이송속도, 에너지밀도를 들 수 있다. 시편의 이송속도를 10 $\mu\text{m}/\text{s}$ 로 고정하고 레이저 에너지를 450 mJ/cm^2 이상으로 가공하면 빔의 지나친 노출로 인하여 가공 형상이 제대로 나타나지 않았다. 200 mJ/cm^2 이하의 에너지로 가공하면 펄스당 제거율이 너무 낮기 때문에 가공시간이 증가하는 것을 실험을 통하여 알 수 있었다. 따라서 본 실험은 에너지 밀도 400 mJ/cm^2 , 반복율 50Hz의 조건으로 원통형 마이크로렌즈를 가공하였다.

Fig. 10의 원통형 마이크로렌즈의 가공표면을 보면 규칙적인 줄무늬가 있음을 관찰할 수 있는데 이것은 펄스와 펄스 사이 에너지밀도의 변화에 기인하는 것으로 판단되므로 광학요소의 제작을 위해서는 레이저빔의 균일화 및 균질화가 중요한 조건임을 알 수 있다.

Fig. 11에는 원통형 렌즈의 이론적 설계 형상과 실험에 의해 얻어진 실제 가공 렌즈의 형상을 비교하였다. 렌즈 중심부에서는 실제 가공 높이가 설계치보다 많이 가공되었으며 중심부에서 멀어질수록 적게 가공되어지고 있음을 볼 수 있다.

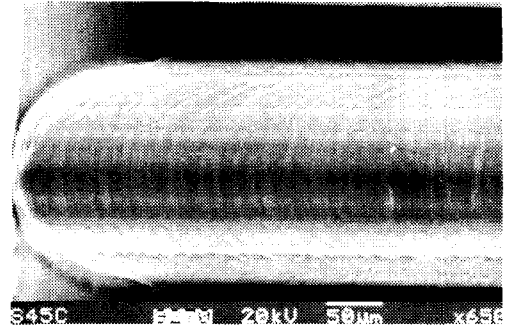


Fig. 10 Scanning electron micrograph of a micro cylindrical lens fabricated by the excimer laser lithography

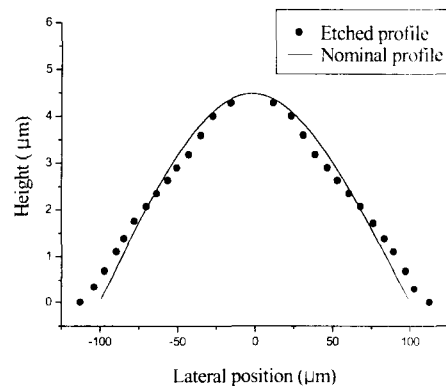


Fig. 11 Comparison of nominal and fabricated cross-sectional cylindrical lens profile

5. 결론

1. PMMA를 이용한 구면 마이크로 렌즈를 가공하는 실험에서 280 mJ/cm^2 , 150pulse, 50Hz일 때 어블레이션이 깨끗하게 일어나고 형상이 좀더 정확히 나타났다.

2. 레이저 에너지 밀도와 펄스수를 제어하여 가공 정밀도를 0.1~0.8 $\mu\text{m}/\text{Pulse}$ 의 범위에서 조절할 수 있었고, Polyimide를 펄스제어와 이송속도(10 $\mu\text{m}/\text{sec}$)에 의한 마이크로 실린더리컬 렌즈를 400 mJ/cm^2 , 400펄스, 반복율을 50Hz의 조건에서 제조할 수 있었다.

3. 다중원형 마스크의 회절과 간섭에 의한 방법

과 기하학적인 형상의 마스크 이송으로 이미지 축소투영 방식을 적용하여 반구형의 마이크로렌즈를 제조할 수 있었다.

4. 마스크의 형상과 펄스당 제거깊이, 슬릿폭을 변화시켜 다양한 크기와 모양의 미소광학부품을 제작할 수 있는 가능성을 확인하였다.

"Laser-assisted deposition for electronic packaging applications," Applied Surface Science, Vol. 46, pp. 113-120, 1990.

참고문헌

1. G. Lippman, "Epreuves Reversibles Donnant la Sensation du Relief," C R Acad Sci, Paris, pp. 446-451, 1908.
2. E. J. Gratrix, "Excimer Lasers and Applications," SPIE 1992, pp. 266, 1993.
3. P. Savander, "Optics and Lasers in Engineering 20," pp. 97, 1994.
4. Maria Kufner, Stefan Kufner, Michael Frank, Jorg Moisel and Markus Testorf, "Pure Appl.," Opt, 9-19, 2, 1993.
5. 함성호, 권영세, "광소자용 미소렌즈 제작을 위한 GaAs/AlGaAs계 액상식각 및 에피택시," 대한전자공학회, Vol. 34, No. 9, pp. 64-71, 1997.
6. J. O. Choi, J. A. Moore, J. C. Corelli, J. P. Silverman, and Hbakhru, "Degradation of PMMA by deep ultraviolet, x-ray, electron beam and proton beam irradiation," J. Vac. Sci. Technol., B6(6), pp. 2286-2289, 1988.
7. 주영구, "Photoresist 용융법을 이용한 미세 렌즈 제작과 phase-shifting interferometry를 이용한 미세 렌즈의 특성 측정," pp. 1-4, 한국과학기술원, 1994.
8. R. Matz, H. Weber, G. Weimann, "Laser-induced dry etching of integrated InP microlenses," Appl. Phys., A65, pp. 349-353, 1997.
9. J. Jahns and S. J. Walker, "Two-dimensional array of diffractive microlenses fabricated by thin film deposition," Appl. Opt., 29, 931-936, 1988.
10. R. Matz, H. Weber, G. Weimann, "Laser-induced dry etching of integrated InP microlenses," Appl. Phys. A65, 349-353, 1997.
11. Richard M Osgood, "Laser-fabrication for solid-state electronics," IEEE circuits devices MAG, Vol. 6, No. 5, pp. 25-31, 1990.
12. A. Bauer, J. Ganz, K. Hesse and E. Kohler,