

서브 마이크론의 패턴으로 구성된 고효율 회절 렌즈 몰드 제작[§]

우도균* · 하네 카즈히로** · 이선규*[†]

*광주과학기술원 기전공학과, **토호쿠대학 나노메카닉스 전공

Fabrication of High-Quality Diffractive-Lens Mold having Submicron Patterns

Do-Kyun Woo*, Kazuhiro Hane** and Sun-Kyu Lee*[†]

* Dept. of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST),

** Nanomechanics, Tohoku Univ.

(Received May 13, 2010 ; Revised September 6, 2010 ; Accepted September 13, 2010)

Key Words : Electron-Beam Lithography(전자빔 노광), FAB(Fast Atom Beam) Plasma Etching(고속 원자 빔 플라즈마 에칭), Diffractive Lens(회절 렌즈), Multi-Alignment Method(다중 정렬 방식)

초록: 본 연구는 초슬림의 광학 시스템에 적용 가능한 서브 마이크론의 패턴으로 구성된 고효율 회절 렌즈의 금형을 가공하는 방법에 관한 것이다. 서브마이크론의 패턴으로 구성된 고효율 회절 렌즈를 가공하기 위해 분해능이 뛰어난 전자빔 노광장치와 고속 원자 빔 플라즈마 에칭 공정을 바탕으로 다중 정렬 방식을 이용하였다. 다중 정렬 방식을 이용하여 고효율 회절 렌즈를 가공 하기 위해서는 정렬 오차, 노광 오차 그리고 에칭 오차를 최소화 해야만 한다. 본 연구에서는 이 주요한 세 가지 가공 오차를 최소화 하였으며, 이를 바탕으로 지름 267 μm (NA=0.25), 최소 선 폭 226 nm, 렌즈 두께 819 nm 를 가지는 고효율 회절 렌즈 가공을 실현 하였다.

Abstract: In this paper, we present the fabrication of a high-quality diffractive-lens mold having submicron patterns, which is suitable for an ultra-slim optical system. In order to fabricate high-quality diffractive lens with a variety of submicron patterns, the multi-alignment method was used; high-resolution electron-beam lithography and FAB plasma etching were carried out to obtain the patterns. The most important key technology in the multi-alignment method is to reduce alignment error, lithography error, and etching error. In this paper, these major fabrication errors were minimized, and a high-quality diffractive lens with a diameter of 267 μm (NA = 0.25), minimum pattern width of 226 nm, and thickness of 819 nm was successfully fabricated.

1. 서 론

회절렌즈는 구조적인 특징으로 인해 기존의 구면 비구면 렌즈에 비하여 특수한 광학 시스템에서 성능 향상은 물론 크기, 두께 그리고 무게를 크게 줄일 수 있는 뛰어난 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 회절렌즈는 다양한 광학 시스템에서 반사·굴절 렌즈를 대체하거나 복합되어 광학 시스템의 성능을 높이기 위해 사용되어 왔다.

이러한 회절렌즈 설계의 이론은 Fresnel zone plate

로 1871년 Lord Rayleigh⁽¹⁾에 의해 입증되었다. 이후 많은 연구자들을 통해 다양한 회절렌즈가 개발되었지만, 특히 단일 파장의 광원을 사용했을 경우 구면 수차를 보정해주는 고효율 회절 렌즈와, 광대역 광원을 사용했을 경우 색 수차를 보정해주는 고효율 회절 렌즈도 개발되어 왔다.⁽²⁾

이러한 고효율 회절렌즈에 대한 가공 기술은 1980년대 이후부터 다이아몬드 터닝을 이용한 초정밀 기계 가공 기술,⁽³⁾ 레이저 빔을 이용한 레이저 가공 기술⁽⁴⁾ 그리고 리소그래피와 에칭기술을 이용한 MEMS 가공 기술⁽⁵⁾으로 나누어 발전되어 왔다. 하지만 기계가공은 다이아몬드 공구의 형상 및 크기의 제약을 받아 서브 마이크론 단위의 패턴으로 구성된 고효율 회절 소자 가공에 아직 한계를 보이고 있으며, 레이저 가공 역시 서브 마이크론

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2010. 4. 22-23., 제주 라마다프라자) 발표논문임.

† Corresponding Author, skyee@gist.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

단위의 패턴보다 상대적으로 큰 레이저 초점의 크기로 인해 고효율 회절 렌즈 가공에 많은 제약이 따른다. 현재 이러한 단점을 극복하기 위해 다양한 방법을 적용하여 고효율 회절 렌즈의 가공을 시도하고 있음에도 불구하고 큰 형상오차로 인해 고효율을 가지는 회절렌즈의 가공 기술은 지금도 개발 중에 있다.⁽⁶⁻⁸⁾

이에 비해 수 나노의 분해능을 가지는 전자빔 리소그래피와 수 나노의 컨드롤이 가능한 에칭 기술을 이용하는 MEMS 가공 기술은 서브 마이크론의 패턴으로 구성된 고효율 회절 렌즈 가공에 유리한 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 전자빔 노광과 고속 원자빔 플라즈마 에칭을 이용하여 서브 마이크론 단위의 패턴으로 구성된 고효율 회절 렌즈를 가공하는데 그 목적을 두고 있다.

2. 고효율 회절 렌즈

2.1 Fresnel zone 구조

Fig. 1은 Fresnel zone 구조를 바탕으로 회절 렌즈의 기본적인 원리를 설명 해주고 있다. Fig. 1과 같이 Fresnel zone은 주기가 다른 패턴들로 구성이 되어 있으며, 이 패턴들을 통과하여 초점에 맺히는 빛의 광학 거리는 파장에 비례하여 증가되는 것을 볼 수 있다. 이 원리는 회절 렌즈를 통과하는 빛이 패턴을 통과하여 보강간섭을 통해 초점에 맺혀지는 것으로 설명 될 수 있다. 따라서 Fresnel zone의 반경과 두께는 피타고라스 정리와 파장의 위상을 고려하여 계산될 수 있다.⁽⁹⁾ 이 때, 이러한 매끈한 면을 가지고 있는 Fresnel zone은 패턴의 크기가 서브 마이크론 단위일 때 가공에 많은 제약이 따른다.

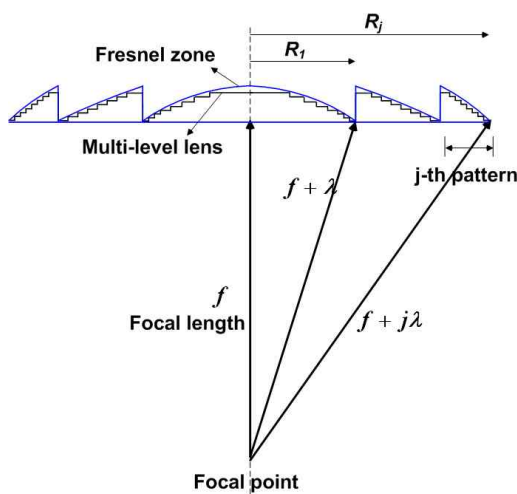


Fig. 1 Relation between Fresnel zone and focal point

이를 대체하기 위해 회절 렌즈의 성능은 유지시키며 가공이 보다 용이한 회절 렌즈가 개발되었다. 그 형태는 Fig. 1과 같이 Fresnel zone을 계단 모양으로 변형 한 것이며 이를 멀티레벨 렌즈라 정의 한다. 멀티레벨 렌즈의 회절 효율은 식 (1)과 같이 계산될 수 있으며 레벨에 따라 증가한다. 여기서 N은 레벨을 의미한다.⁽¹⁰⁾

$$\eta = \sin^2(1/N) = \left[\frac{\sin(\pi/N)}{\pi/N} \right]^2 \quad (1)$$

2.2 고효율 회절렌즈 설계

Fig. 2는 초슬림 광학계에 적합하며 서브 마이크론의 패턴으로 구성된 고효율 회절 렌즈로써 8 레벨 렌즈를 보여주고 있다. 이러한 8 레벨 렌즈의 회절 효율은 식 (1)을 이용하여 계산한 결과 95%의 회절 효율을 갖는다. 이 고효율 회절 렌즈의 주기 및 두께는 식 (2)과 같이 광원의 파장과 초점 거리 그리고 위상을 고려하여 계산될 수 있다.⁽⁷⁾ 이때 i, j 는 정수를, λ 는 광원의 파장을, f 는 렌즈의 초점을, d 는 렌즈의 두께를, n_{PMMA} 는 굴절률을, $R_{j,i}$ 는 j 번째의 i 레벨에 대한 반지름 값을 나타낸다.

$$R_{j,i} = \sqrt{2 \left(j - \frac{N-i}{N} \right) \lambda f + \left(\left(j - \frac{N-i}{N} \right) \lambda \right)^2} \quad (2)$$

$$d = \frac{(N-1)\lambda}{N(n_{PMMA} - 1)}$$

본 연구에서 가공하고자 하는 고효율 회절 렌즈는 267 μm의 초점거리, 143 μm의 지름(NA=0.25)을 가지며, 렌즈의 형상은 819 nm의 렌즈 두께, 20개의 패턴, 11.178 μm의 최대 선 폭, 226 nm의 최소 선 폭을 갖는다.

3. 고효율 회절 렌즈 가공

3.1 다중 정렬 방식

전자빔 노광 장치를 이용하여 위에서 설계된 고효율 회절 렌즈 가공 방식은 크게 독립 노광 방식⁽¹¹⁾과 다중 정렬 방식⁽⁶⁾이 있다. 본 연구에서 선택한 다중 정렬 방식을 이용하면 3회의 노광, 에칭의 반복으로 8 레벨의 고효율 회절 렌즈 가공이 가능하다.

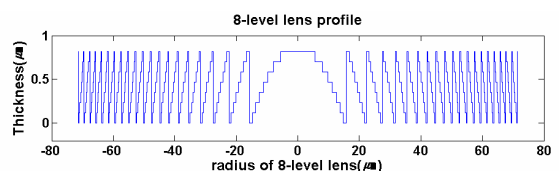


Fig. 2 Schematic of high-quality diffractive lens

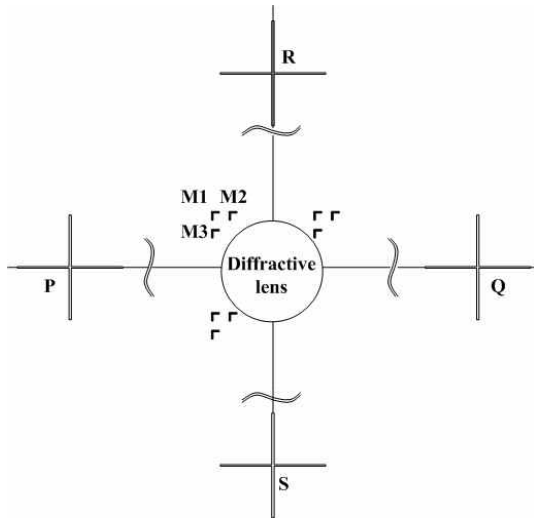


Fig. 3 Alignment marks (P, Q, R and S are global marks and M1, M2 and M3 are chip marks)

위 방법을 이용하여 고효율 회절 렌즈를 가공 시 광학 성능에 크게 영향을 미치는 가공 오차는 정렬 오차, 노광 오차 그리고 에칭 오차 이 세가지로 구분 할 수 있다. 정렬 오차와 노광 오차는 고효율 회절 렌즈의 패턴 주기 오차를 발생하여 구면 수차를 유발하며, 에칭 오차는 두께의 오차를 발생하여 회절 효율을 저하 시키게 된다. 즉 위 세가지 오차를 최소화한 정밀한 가공 기술로 고효율 회절 렌즈를 가공 해야 그 성능이 확보 될 수 있다.⁽¹²⁾

본 연구에서는 이러한 주요한 가공 오차를 최소화 하여 고효율 회절 렌즈 금형을 가공 하기 위해 전자빔 노광 장비(JBX-5000LS, JEOL 社)와 고속 원자 빔 플라즈마 에칭 장비(FAB60ML, EBARA 社)를 이용하였다.

본 연구에서 사용되는 전자빔 노광 장치는 정렬을 위해 Fig. 3 과 같이 global 마크와 chip 마크를 이용 한다. 정렬방식의 원리는 global 마크 (P,Q,R,S)의 위치를 이용하여 실리콘인 workpiece의 확대, 축소, 회전 오차를 계산하여 위치 오차를 보정하며, chip 마크 (M1, M2, M3)의 위치를 이용하여 workpiece 내에 노광 해야 할 패턴의 확대/축소, 회전, 위치 오차를 보정하여 왜곡 및 위치 오차를 보정하게 된다. 따라서, 성공적인 다중 정렬 방식을 실현하기 위해서는 이러한 정렬 마크들을 정밀하게 제작해야 한다.

Fig. 4 는 정렬 마크의 제작 순서를 보여주고 있다. 우선 전자빔 노광 장치를 이용하여 정렬 마크의 패턴을 얻었다. 이 때, 사용된 감광제는 ZEP-

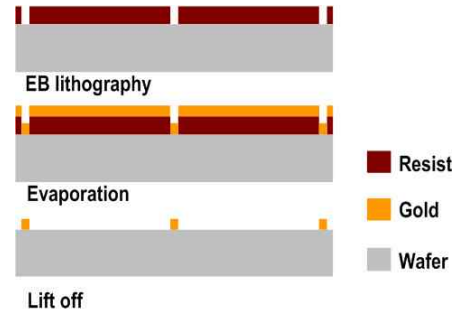


Fig. 4 Fabrication procedure of alignment marks

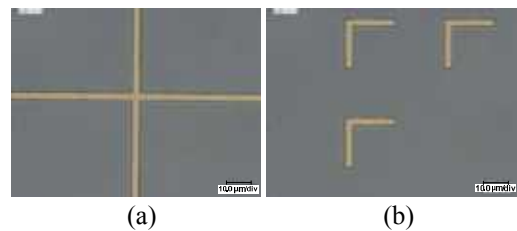


Fig. 5 Alignment marks (a) global mark, (b) chip marks

520A(ZEON CHEMICALS 社)이다. 감광제의 두께는 lift-off 공정을 용이하게 하기 위해 증착 할 Cr 과 Au 의 두께 160 nm 를 충분히 고려하여 500 nm 로 하였다. 감광제는 $88 \mu C/cm^2$ 으로 노광 되었으며 ZED-N50 으로 현상되었다. 이후 증착을 이용하여 60 nm 의 Cr 을 실리콘 위에 증착 한 후 그 위에 100 nm 의 Au 를 증착 하였다. 마지막으로, MS2001 용액으로 lift-off 공정을 실시하여 Au 으로 구성된 정렬 마크를 얻을 수 있었다.

Fig. 5 는 제작된 global 마크와 chip 마크를 보여주고 있다. 설계 시 모든 정렬 마크의 폭은 $3 \mu m$ 으로 설계 되었으며 제작한 결과 가로, 세로 폭 모두 정확하게 $3 \mu m$ 으로 제작된 것을 확인 할 수 있었다.

3.2 전자빔의 노광량 (exposure dose) 최적화

정렬 오차를 최소화 하기 위해 정밀 정렬 마크를 제작하였다. 이후 고효율 회절렌즈의 패턴 주기 오차를 정밀하게 제작하기 위해서는 추가적으로 노광 오차를 줄여야만 한다.

전자빔 노광 장치에서는 동일한 패턴 폭임에도 불구하고 전사되는 전자빔의 노광량에 따라 감광제는 비례하여 현상되게 된다. 이때 전자빔 노광량의 최적 조건을 찾기 위해서는 감광제 두께, 웨이퍼의 종류, 노광하고자 하는 패턴의 크기를 동시에 고려해야 한다. 위 고려사항에 따라 전자빔 노광 중 발생하는 scattering 이 변화 하여 현상되는 패턴 폭의 크기가 바뀌게 되기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 따라서, 다양한 주기의 패턴들을 포함하고 있는 고

효율 회절 렌즈를 가공 시 적절한 전자빔의 노광량을 선정해야만 성공적으로 정밀한 고효율 회절 렌즈의 금형을 가공 할 수 있다.

전자빔의 노광량 최적화 실험을 위해 8 레벨의 고효율 회절렌즈의 패턴을 사용하였다. 이때, 이 중 가장 초소형의 패턴으로 구성되어 있는 고효율 회절렌즈의 1 차 패턴과 동일한 형상을 가지고 실험을 하였다. 고효율 회절렌즈의 1 차 패턴은 최소 주기 453 nm, 최소 선 폭 226 nm 로 구성되어 있으며, 본 실험에서 사용될 감광제의 두께는 350 nm 로 설정하였다. 전자빔의 조건은 $68 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 에서 $88 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 까지 $4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 의 간격으로 실험을 하였다.

Fig. 6(a)~(c)는 고효율 회절렌즈 1 차 패턴의 최 외각에 있는 패턴을 전자빔의 크기에 따라 현상된 것을 전자현미경을 이용하여 관찰한 결과이다. Fig. 6(d)는 226 nm 의 선폭을 가지는 패턴에 대해 전자빔의 노광량에 따라 발생하는 노광 오차를 측정 한 그래프이다. 이와 같이 전자빔의 노광량이 증가할 수록 현상되는 감광제는 비례 증가하여 더 많이 현상되는 것을 볼 수 있다. 즉, 노광 오차를 발생 시키는 것을 확인할 수 있었다. 전자빔의 노광량이 $68 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 일 경우에는 노광 오차가 0 에 가까웠지만 $88 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 의 경우에는 40 nm 의 노광 오차를 발생시키는 것을 확인할 수 있었다.

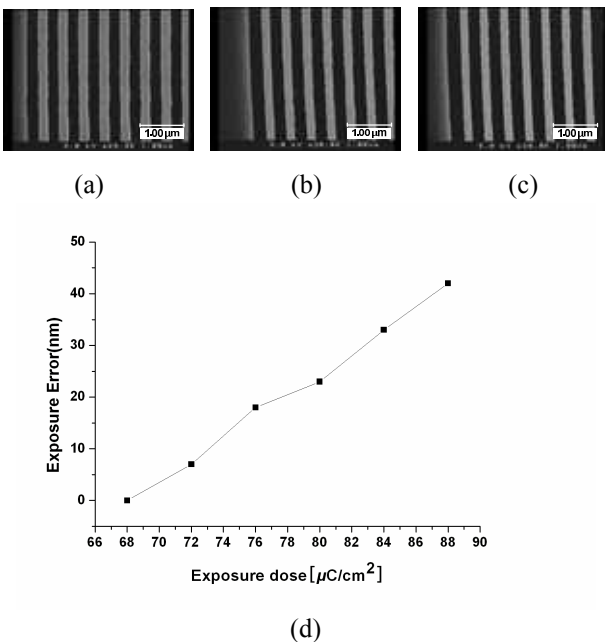


Fig. 6 Pre-experiment about lithography error. (a) SEM image of $68 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, (b) SEM image of $80 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, (c) SEM image of $88 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ and (d) Exposure error

3.3 고효율 회절 렌즈 가공

본 연구에서는 전자빔의 정렬 방식 기술과 노광 기술을 바탕으로 서브 마이크론 패턴으로 구성된 8 레벨의 고효율 회절렌즈를 가공하였다.

Fig. 7 은 전자빔 노광장치와 고속 원자 빔 플라즈마 에칭을 통해 다중 정렬 방식을 이용한 고효율 회절렌즈의 가공 순서를 보여 주고 있다. 1 차 패턴을 이용하여 렌즈의 2 레벨 형상을 구현하며, 이후 2 차 패턴에서는 가공된 2 레벨을 4 레벨 형상으로 구현하게 된다. 마지막으로 3 차 패턴에서는 4 레벨로 구현된 형상을 이용하여 최종 8 레벨의 형상을 가지는 고효율 회절 렌즈를 얻게 된다. 이때, 가공해야 할 패턴의 폭과 에칭 깊이는 연속적으로 두 배씩 증가하는 것을 알 수 있다. Table 1 에서 보는 바와 같이 1 차 패턴과 2 차 패턴에 사용된 감광제의 두께는 3 차 패턴의 감광제 보다 얇은 350 nm 로 실험을 하였다. 1 차 패턴과 2 차 패턴은 3 차 패턴보다 1/4, 1/2 배 작은 패턴으로 구성되어 있으므로, 이러한 정밀한 패턴을 얻기 위해서는 얇은 감광제가 두꺼운 감광제 보다 유리하기 때문이다. Fig. 7 에서 보는 바와 같이 3 차 패턴 가공 시 에칭 해야 할 두께는 468 nm 이다. 고속 원자 빔 플라즈마 에칭 시 사용되는 감광제(ZEP-520A)와 실리콘의 에칭비가 1:1 임을 고려하여 3 차 패턴 시 감광제의 두께는 468 nm 보다 두꺼운 500 nm 로 코팅하였다. 또한 전자빔의 노광량은 최대 선폭 11.178 μm 로부터 점차적으로 작아져 최소 선폭 226 nm 로 구성되어 있는 고효율 회절 렌즈의 특징으로 고려하여 한 패턴 폭에 국한 되지 않고 전체 패턴에 걸쳐 노광 오차를 최소화 할 수 있는 최적화된 전자빔의 노광량을 사용해야 한다.

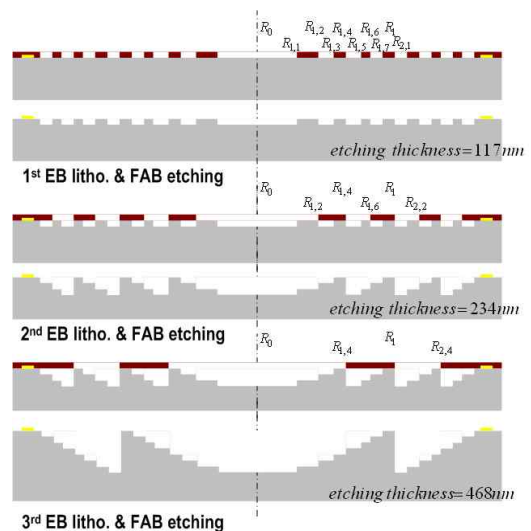


Fig. 7 Fabrication procedure of a high-quality diffractive lens of an 8-level lens

Table 1 Fabrication conditions

Conditions	1 st Patterns	2 nd Patterns	3 rd Patterns
EB resist thickness(nm)	350	350	500
EB exposure dose($\mu C/cm^2$)	80	80	88
Etching time	5min30sec	10min30sec	20min10sec

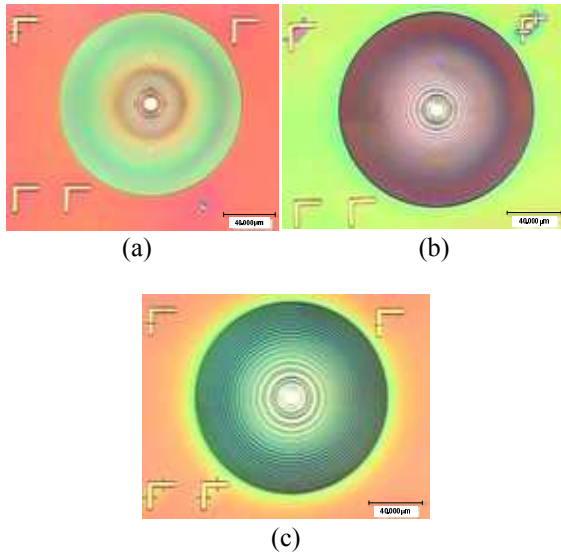


Fig. 8 Microscope image: (a) after 1st patterns, (b) after 2nd patterns and (c) after 3rd patterns

전자빔 노광 이 후 고속 원자 빔 플라즈마 에칭을 통해 고효율 회절 렌즈 가공을 실시하였다. 이 때 정밀한 가공을 위해서는 고속 원자 빔 플라즈마 에칭에 사용된 가스(SF₆)의 유량과 에칭 챔버 내의 진공 상태, 그리고 전압과 전류를 일정하게 하여 안정된 조건에서 일정한 에칭률을 찾는 것이 중요한 가공 요소이다.

본 연구에서는 2.5 kV 의 전압, 20 mA 의 전류, 15×0.28 sccm(Standard Cubic Centimeter per Minute)의 SF₆ 유량을 일정하게 하여 얻어진 21~23 nm/min 의 에칭률을 바탕으로 1 차 노광 후 117 nm 의 에칭을, 2 차 노광 후 234 nm 의 에칭을 그리고 3 차 노광 후 468 nm 의 에칭을 Table 1 과 같이 에칭 시간을 조절하여 가공을 실시하였다.

Table 1 은 다중 정렬 방식을 이용하여 8 레벨의 고효율 회절렌즈에 대한 가공 조건을 보여 주고 있다.

Fig. 8 은 다중 정렬 방법을 이용하여 8 레벨의 고효율 회절 렌즈를 가공할 때 각각의 단계에서 측정된 결과를 보여주고 있다.

4. 결과 및 토의

Fig. 9 는 가공된 8 레벨의 고효율 회절 렌즈를 전자 현미경으로 관찰한 결과를 보여주고 있다.

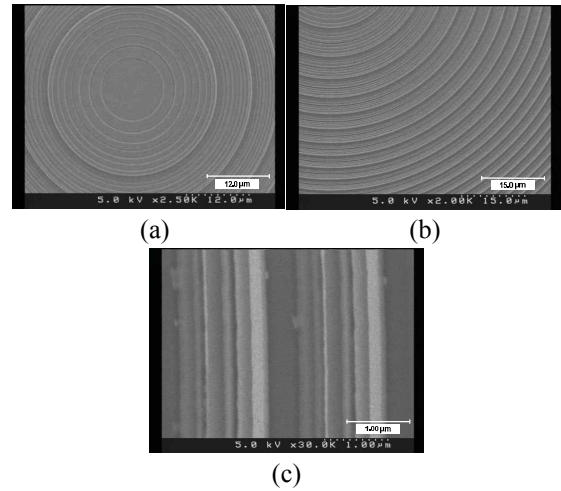


Fig. 9 Fabrication results of a high-quality diffractive lens mold composed of the 8-level lens: (a) center, (b) middle and (c) edge

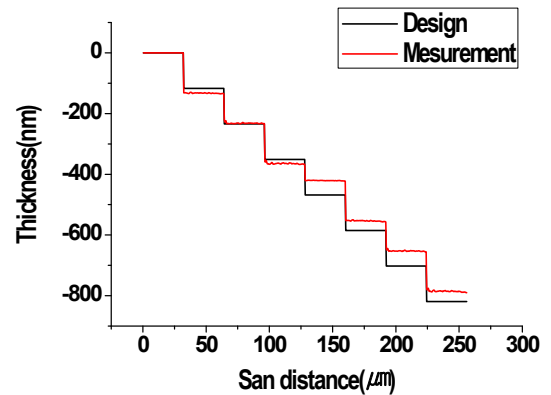


Fig. 10 Thickness of high-quality diffractive lens composed by an 8-level lens

가공 후 제작된 고효율 회절렌즈의 형상을 측정된 결과 약 50 nm 정도의 정렬 오차가 발생하였으며, 최소 선 폭을 측정된 결과 ±15 nm 정도의 노광 오차가 발생하였다. 이 때, 회절 렌즈의 패턴 주기에 대한 가공 오차는 패턴의 선 폭 오차보다 더 작게 측정 되었다.

Fig. 10 은 가공된 8 레벨의 고효율 회절 렌즈의 두께를 보여주고 있다. 가공 결과 1 차 패턴 에칭의 가공 오차는 15 nm, 2 차 패턴 에칭의 가공 오차는 -3 nm 그리고 3 차 패턴의 에칭 가공 오차는 -48 nm 로 측정 되었다. 그 결과 Fig. 10 에서 보는 바와 같이 1 레벨에서 4 레벨까지 10 nm 정도의 형상 오차로 매우 정밀하게 에칭이 되었지만 5 레벨부터 8 레벨 까지는 3 차 에칭 가공 오차에 영향을 받아 상대적으로 큰 형상 오차를 가지게 되는 것을 볼 수 있다. 즉, 다중 정렬 방식을 이용하여 고

효율 회절 렌즈를 가공 할 경우 각 단계의 에칭 오차가 모든 레벨의 형상에 영향을 주게 된다.

동일한 가공 조건임에도 불구하고 이러한 에칭 오차가 발생한 원인은 각각의 에칭 시 시간에 따라 에칭률이 변하기 때문이다. 에칭률을 측정 한 결과 1 차 패턴 에칭 시에는 24 nm/min, 2 차 패턴 에칭 시에는 21.7 nm/min 그리고 3 차 패턴 에칭 시에는 19.8 nm/min 로 측정 되었다. 이러한 원인은 고속 원자 빔 플라즈마 에칭시 챔버 내의 온도가 점차 상승하여 에칭비를 감소 시키기 때문이다.

따라서 보다 정밀하게 에칭 오차를 줄이기 위해서는 고속 원자 빔 플라즈마 에칭 내의 정밀한 온도 조절이 요구 된다. 이를 위해 에칭 시간을 증가 시킴에 따라 에칭 챔버 내에 발생하는 온도를 측정하고 이때 에칭률을 계산하면 일정한 에칭률을 얻을 수 있는 허용 온도 범위를 발견 할 수 있을 것이다. 이를 바탕으로 챔버 내의 온도가 허용 온도 범위에 유지될 수 있도록 냉각 시스템을 적용한다면 에칭 오차를 크게 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구는 서브 마이크론 패턴으로 구성된 고효율 회절 렌즈 몰드를 전자빔 노광 장치와 고속 원자 빔 플라즈마 에칭을 통해 다중 정렬 방식으로 가공 하는데 성공하였다. 본 연구에서 가공 대상은 267 μm 의 초점거리, 143 μm 의 지름 (NA=0.25), 819 nm 의 두께, 226 nm 의 최소 선 폭을 가지는 8 레벨 고효율 회절 렌즈이다. 다중 정렬 방식을 이용하여 8 레벨의 고효율 회절 렌즈 금형을 가공 시 렌즈의 성능을 확보하기 위해서는 패턴 주기의 오차를 유발하는 정렬 오차와 노광 오차를 최소화 해야 하며, 렌즈의 두께 오차를 유발하는 에칭 오차를 최소화 해야만 한다. 이러한 정렬 오차와 노광 오차는 회절 렌즈의 구면 수차를 유발하며 에칭 오차는 회절 효율을 떨어트리기 때문이다. 정렬 오차를 최소화 하기 위해서는 정렬 방법과 정밀한 정렬 마크의 제작 기술이 선행되어야 하며, 노광 오차는 감광제와 전자빔의 관계를 명확하게 규명해야 한다. 마지막으로 에칭 오차를 최소화 하기 위해서는 안정된 조건하에 일정한 에칭률을 발견하여 시간에 따라 변하지 않는 에칭률을 이용할 때 정밀한 고효율 회절 렌즈 가공이 가능할 수 있다.

후 기

본 연구는 Tohoku 대학과 공동연구로 진행 되었으며, 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 과학재단 국가지정연구실 사업의 지원을 수행된 연구임(No. R0A-2008-000-20098-0)

참고문헌

- (1) Rayleigh, L., 1888, "Wave Theory of Light," Vol. XXIV, *Encyclopedia Britannica*, Charles Scribner's Sons, New Work, p.437.
- (2) Falkis, D. and Morris, G.M., 1995, "Spectral Properties of Multiorder Diffractive lens," *Appl. Opt.* Vol. 34, pp. 2462~2468
- (3) McClure, E. C., 1991, "Manufacturers Turn Precision Optics with Diamond," *Laser Focus World*, pp. 95~105
- (4) Gale, M.T., Rossi, M., Pedersen, J. and Schutz, H., 1994, "Fabrication of Continuous-Relief Micro-Optical Elements by Direct Laser Writing in Photoresist," *Opt. Eng.*, Vol. 33, pp. 3556~3566.
- (5) Turunen, J. and Wyrowski, F., 1997, "Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications," *Akademie Verlag*, Berlin, pp.41.
- (6) Yamada, K., Watanabe, W., Li, Y. and Itoh, K., 2004, "Multilevel Phase-Type Diffractive Lenses in Silica Glass Induced by Filamentation of Femtosecond Laser Pulses," *Opt. Lett.*, Vol. 29, pp.1846~1848.
- (7) Wu, D., Niu, L. G., Chen, Q. D., Wang, R and Sun, H. B., 2008, "High Efficiency Multi-Level Phase-Type Fractal Zone Plates," *Opt. Lett.*, Vol.33, pp.2913~2915.
- (8) Tamura, S., Yasumoto, M., Kamijo, N., Takeuchi, A., Uesugi, K. and Suzuki, Y., 2009, "Multilevel-Type Multilayer X-ray Lens (Fresnel zone plate) by Sputter deposition," *Vacuum*, Vol. 83, pp.691~694.
- (9) Turunen, J. and Wyrowski, F., 1997, "Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications," *Akademie Verlag*, Berlin, pp.82~83.
- (10) Herzig, H. P., 1997, "Micro-Optics Elements, System and Application," *Taylor and Francis*, London, p. 58.
- (11) Woo, D. K., Hane, K. and Lee, S. K., 2008, "Fabrication of a Multi-Level Lens Using Independent-Exposure Lithography and FAB Plasma Etching," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, Vol. 10, pp. 044001.
- (12) Sinzinger, S. and Jahns, J., 2003, "Microoptics," *WILEY-VCH*, Weinheim, pp.139~141.