

# Sawtooth 회절 격자 가공을 위한 FAB 에칭과 다이아몬드 Scribing 방법 FAB Etching Method And Diamond Scribing For Sawtooth Gratings

\*이차범<sup>1</sup>, 주재영<sup>1</sup>, 강진호<sup>1</sup>, #이선규<sup>1</sup>

\*ChaBum Lee<sup>1</sup>, JaeYoung Joo<sup>1</sup>, JinHo Kang<sup>1</sup>, #Sun-Kyu Lee(skyee@gist.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>광주과학기술원 정보기전공학부

Key words : Sawtooth grating, diffraction, RCWA, Fast atom beam, diamond scribing, toolpath

## 1. 초록

본 논문에서는 Fast atom beam (FAB) 에칭 방법을 이용하여 실리콘 기판위에 주기 0.6 ~ 1.5  $\mu\text{m}$  를 갖는 반사형 회절 광학 소자를 고전적인 스칼라 방식의 해석 방법과 벡터 방식의 해석 방법 (RCWA, Rigorous Coupled Wave Analysis)으로 높은 회절 효율을 얻기 위해 회절 격자 구조 해석을 통해서 해석된 결과와 동일하게 미세 영역에서의 가공 방법에 대한 연구를 수행하였다. 비대칭형 Sawtooth 회절 격자에 대한 광학적 특성과 구조적 특성을 미세 구조에서 TE (Transverse to Electric)와 TM(Transverse to Magnetic) 편광의 입사광이 반사되었을 때 1 차 회절 효율이 최대가 되도록 위상 매칭을 통해서 구해냈고, 그 해석 결과를 바탕으로 실리콘 기판을 일정 각도에 기울여 FAB 에칭함으로써 정밀하고, 신속하게 가공이 가능함을 보였다. 입사 파장에 비해 짧은 주기를 갖는 회절 소자는 해석 결과와 동일하게 0%의 회절 특성을 보였고, 입사 파장보다 큰 주기를 갖는 회절 소자 또한 해석 결과와 동일한 결과를 나타냈다. 코팅 기술과 함께 고효율의 회절 소자를 정확하고, 쉽게 얻어 낼 수 있음이 확인되었다. 또한 다이아몬드 공구를 이용하여 초정밀 가공으로 서브마이크로 영역의 Sawtooth 회절 격자의 가공이 가능함을 확인하였다.

## 2. 서론

회절 격자에 대한 연구는 오래전부터 많은 연구가 진행되고 있다. 회절 격자는 크기의 소규모화, 경량화, 다기능화로 인해 분광기, 모노크로메이터, 다중 이미징 시스템 등의 측정, 분석 분야에서 두루 쓰이고 있다. 제조 기술의 발전과 더불어 사용 파장 근처의 주기를 갖는 회절 격자에 대한 해석 방법이 요구되면서 RCWA(Rigorous Coupled Wave Analysis), FDTD(Finite Difference Time Domain)과 FEM(Finite Element Method) 등의 해석적 접근 방법이 주로 사용되고 있다. 회절 격자의 주기가 입사 파장 크기에 가까워 지면서 고전적인 방식인 FT(Fourier Transformation) 방식의 해석이 적합하지 않게 되어 벡터 방식의 해석이 미세 영역의 회절 소자를 이해하는데 더 적합함을 알게 되었다. 본 논문에서는 0.6 ~ 1.5  $\mu\text{m}$  주기를 갖는 회절 격자 소자의 위상 매칭을 통해 RCWA 해석을 1 차 효율이 가장 높은 수치를 갖도록 수행하였다.

마이크로미터 레벨에서 서브 마이크로미터 영역의 회절 광학 소자이면서, 또 회절 소자가 비대칭의 Sawtooth 형태를 가지고 있을 경우 그 제조 방법에 대한 연구는 다양한 방법으로 접근하고 있다. 예를 들면, E-Beam 나 레이저 도즈량의 변조나 습식에칭 또는 광반응 물질의 현상 속도나 경향을 통해서 얻는 방법이 대부분이라고 할 수 있다. 그러나 도즈량 변조를 통해서 얻어내는 방법은 실험적으로 공정 조건을 찾는 데 시간이 많이 소요되고, 도즈량 변조를 줄 수 있는 장치가 필요하기에 고가의 장비가 요구되는 단점이 있다. 다른 방법 또한 공정 조건에 대한 반복 실험이 요구되기에 미세 영역의 가공을 쉽게 이루어내기는 어렵다. 심지어 마이크로미터 레벨의 미세 영역을 가공하는 경우에도, 비대칭 Sawtooth 회절 소자라기보다는 싸인곡선과 유사한 형태를 갖는 경우가 대부분이다. 이러한 싸인 곡선을

갖는 Sawtooth 회절 소자는 직선으로 이루어진 Sawtooth 회절 소자의 효율에 비해 매우 낮기 때문에 회절 소자의 경계면을 최대한 직선으로 할 필요가 있다. 본 연구에서는 최대 회절 효율을 얻어내기 위해 실리콘 기판을 일정 각도만큼 경사를 주고, 그 다음 FAB 에칭을 통해서 직선의 형태를 갖는 이상적인 Sawtooth 회절 격자를 마이크로미터 레벨에서 서브마이크로미터까지의 주기로 제작하여 회절 효율을 측정하였고, 측정 결과와 해석결과를 비교하였다.

## 3. 본론

RCWA 해석이 실리콘 기반의 0.6 ~ 1.5  $\mu\text{m}$  주기를 갖는 Sawtooth 회절 격자에 대해서 이루어졌다. RCWA 는 어느 가정없이 상태 방정식 기반으로 편미분 방정식을 직접 풀어내는 방식으로 회절 소자의 굴절률과 피매질의 굴절률을 Fourier 시리즈로 나타내어 각 오더의 크기를 계산하여 회절 격자와 피매질의 회절 반사와 회절 투과 특성을 계산할 수 있다. 본 논문에서 다룬 회절 소자는 Fig. 1 에 나타나 있다.

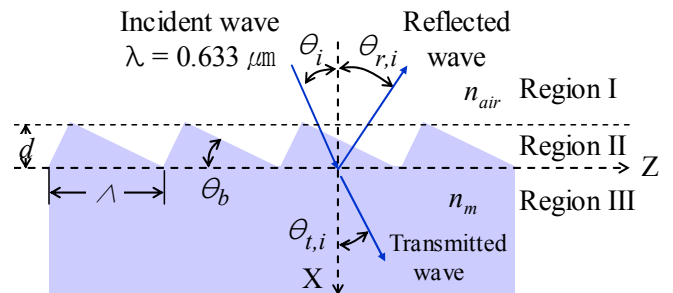


Fig. 1 Schematic diagram of the general infinite blazed gratings.

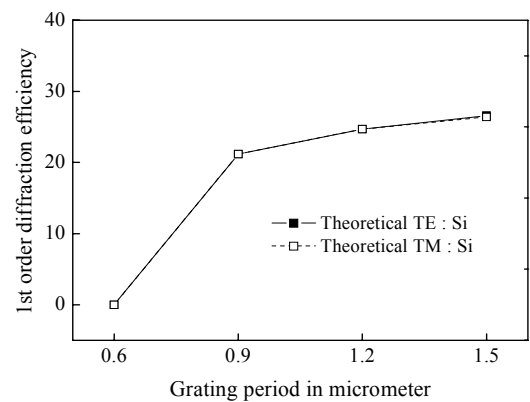


Fig. 2 Diffraction efficiencies for Sawtooth gratings by RCWA.

위의 Fig. 1 에서  $d$  는 회절 격자의 깊이,  $\Lambda$  는 주기,  $\theta$  는 각각의 각을 의미하고,  $n$  은 매질 각각의 굴절률을 나타낸다. 본 실험에서는 주기를 0.6 ~ 1.5  $\mu\text{m}$  까지 4 가지의 주기를 갖는 회절 격자를 해석하였다. 해석 결과는 Fig. 2 에 제시되어 있다. 회절 격자의 주기가 증가하면서 회절 효율도

높아지고, 주어진 파장보다 작은 주기의 회절 격자의 회절 효율은 0%임을 알 수 있다.

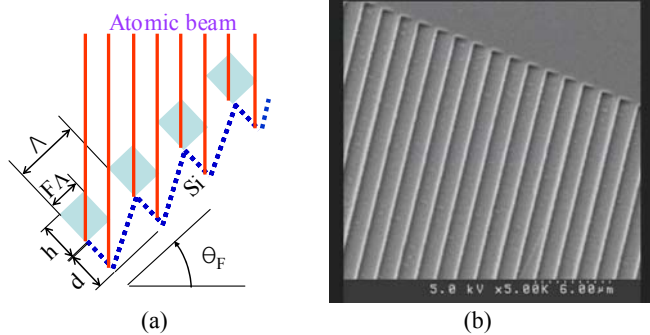


Fig. 3 Apparatus of the fabrication process of Sawtooth gratings (a) and SEM picture of the fabricated gratings (b)

비대칭 Sawtooth 회절 소자를 쉽고, 빠르게 가공하기 위해 Fig. 3 과 같이 새로운 에칭 공정이 제안되었다. E-Beam 을 이용해서 설정된 주기만큼의 바이너리 회절 소자를 가공하고 적정 각도로 경사를 주고 직접 FAB 빔을 이용하여 에칭하였다. 이런 결과 원하는 주기를 갖고, 직선의 경사를 갖는 회절 소자를 얻을 수 있었다. 가공된 회절 소자는 Fig. 4 에 나와 있다. FAB 에칭 시간을 조절함으로써 비대칭 사다리꼴의 회절 소자 또한 얻을 수 있는 장점이 있다.

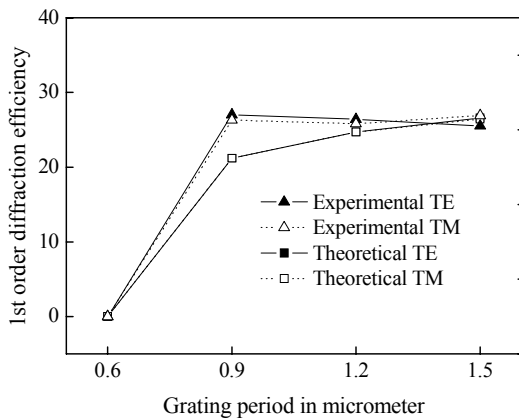


Fig. 4 Experimental results of 1<sup>st</sup> order diffraction efficiencies.

FAB 에칭에 의해서 제작된 시편에 LD 광원을 입사시켜 1 차 회절 효율을 측정하였다. 그 결과는 Fig. 4 는 해석 결과와 측정 결과가 TE 와 TM 입사광에 의한 효율 변화를 보여준다. 해석 결과와 측정 결과가 매우 일치함을 알 수 있었다.

FAB 에칭을 이용한 비대칭 Sawtooth 회절 격자 가공과 함께 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 기계 가공으로 통하여 미세 영역의 비대칭 회절 격자 가공에 대한 연구도 수행하였다. Fig. 5 에 나타난 바와 같이 다음과 같이 Scribing 이 가능하도록 설계된 다이아몬드 공구를 가지고, 절삭재 무전해 Ni 이 코팅된 시편 위에 다이아몬드 공구의 Thrust 방향과 Feed 방향으로의 간섭을 고의적으로 발생시켜 공구 선단의 응력집중을 해소시키고, 즉 공구의 손상과 마모 발생을 저하시키는 Offset 을 둔 절삭 방법으로 마이크로미터 영역과 서브 마이크로미터 영역의 가공이 실현되었다. 그 결과, 그림 6 에서와 같이 서브마이크로미터의 깊이와 마이크로미터의 주기를 갖는 회절 격자가 이상적으로 제작되었고, 공구 선단의 마모는 발생하지 않음이 확인되었다.

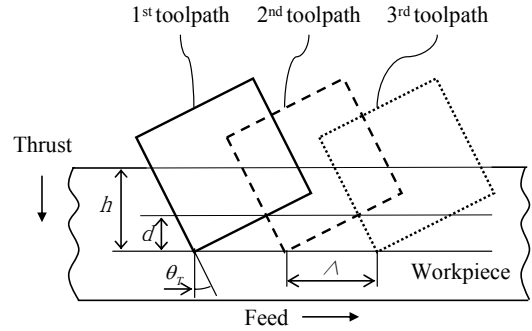


Fig. 5 Details of tool path interfered cutting operation;  $h$  depth of cut,  $d$  depth of gratings,  $\theta_T$  blazed angle and  $\Lambda$  period of gratings.

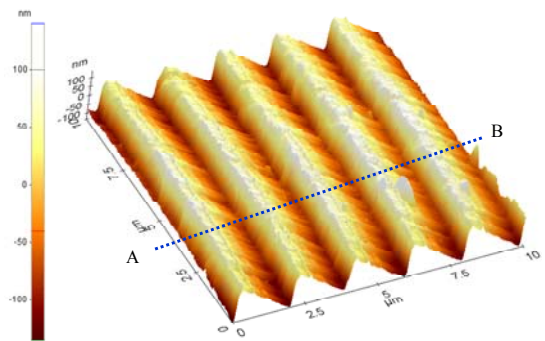


Fig. 6 Atomic force microscope picture of the fabricated gratings.

#### 4. 결론

비대칭 Sawtooth 회절 소자의 최대 1 차 회절 효율을 갖기 위한 소자의 구조를 설계하고, 설계된 회절 격자를 새롭게 제시한 FAB 에칭 방법과 초정밀 기계가공으로 소자를 제작하고, 그 소자의 회절 특성을 측정하였다. 이론적 수치와 실험적 수치가 매우 일치함을 확인할 수 있었다. 다소 낮은 효율을 보이는 실리콘 기판 위에 금속 코팅을 통해서 회절 효율이 향상될 것으로 예상된다. 이러한 에칭 방법은 고가의 장비에 대한 의존성을 낮추고, 서브마이크로미터 레벨의 비대칭 회절 소자를 쉽고, 빠르게 가공할 수 있어서 그 응용 범위가 넓다고 여겨진다.

#### 후기

This work was supported by the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) NRL Program grant funded by the Korea government (MEST) (No.R0A-2008-000-10065-0)

#### 참고문헌

1. M. G. Moharam, T. K. Gaylord, J. Opt. Soc. Am. A, 3, 1780-1796, 1986.
2. ChaBum Lee, Kazuhiro Hane, Sun-Kyu Lee, J. Micromech. Microeng, 18, 045014, 2008.
3. ChaBum Lee, Kazuhiro Hane, WanSoo Kim, Sun-Kyu Lee, Appl. Opt. 47, No. 18, 3236-3253.
4. Do-Kyun Woo, Kazuhiro Hane, Sun-Kyu Lee, J. Opt. A: Pure Appl. 10, 044001, 2008.
5. ChaBum Lee, T. Kuriyagawa, TaeJun Kim, Sun-Kyu Lee, Proc. ASME 2008, Kowloon, HongKong.
6. N. F. Borrelli, "Microoptics Technology" 2<sup>nd</sup> Ed. Marcel Dekker, 2004.
7. J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics" McGraw-Hill Book Co., SanFrancisco, 1968.