

논문 16-8-13

## 초고속 광변조기 제작을 위한 LiNbO<sub>3</sub> 도파로의 건식식각

### Dry Etching of patterned LiNbO<sub>3</sub> Waveguides for the High-speed Optical Modulator Fabrication

양우석<sup>\*</sup>, 김우경<sup>\*</sup>, 이승태<sup>\*\*</sup>, 박우정<sup>\*\*\*</sup>, 장현수<sup>\*\*\*\*</sup>, 윤대호<sup>\*\*\*</sup>, 이한영<sup>\*</sup>  
(Woo-Seok Yang<sup>\*</sup>, Woo-Kyung Kim<sup>\*</sup>, Seung-Tae Lee<sup>\*\*</sup>, Woo-Jung Park<sup>\*\*\*</sup>, Hyun-Su Jang<sup>\*\*\*\*</sup>,  
Dae-Ho Yoon<sup>\*\*\*</sup>, and Han-Young Lee<sup>\*</sup>)

#### Abstract

Ti-indiffused LiNbO<sub>3</sub> waveguide have been used to various high speed optical device based on electro-optic effect such as modulators, switches, and sensor, etc. In order to high speed modulation of optical modulator have, one of the further devices, needed to increasing of electrode surrounding air by LiNbO<sub>3</sub> dry etching because of impedance matching for optical and RF phase velocity between waveguide and electrode. We studied property of LiNbO<sub>3</sub> dry etching after waveguide patterning for optical modulation by using neutral loop discharge (NLD) plasma.

**Key Words** : LiNbO<sub>3</sub>, Waveguide, Modulator, Plasma, Etching

#### 1. 서론

현재, LiNbO<sub>3</sub> 광도파로를 이용한 변조기의 초고속 광 변조를 위해 LiNbO<sub>3</sub> 광도파로 양쪽 면을 약 3-4 $\mu$ m 정도의 깊이로 식각하여 구현하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 도파로 식각 구조의 효과는 도파로 주위를 공기로 대체함으로써 높은 M/W 특성 임피던스와 낮은 유효굴절율을 가지며, 강한 수직전계가 도파로에 분포 함으로써 낮은 구동전압과 광대역 고속변조가 가능하다.

이를 위한, LiNbO<sub>3</sub> 건식식각은 높은 이온 에너지에 의한 기관 손상을 최소화하여야 하므로 Ar 보다는 CHF<sub>3</sub>, CF<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> 과 같은 반응가스를 이용

하여야 한다. 그러나, 이러한 반응식각은 LiNbO<sub>3</sub>와 할로젠화된 이온과의 반응에 의하여 식각 과정동안 표면에 새로운 화합물을 형성하게 되며, 새로운 형성물은 식각 특성의 저해 요소로 작용하게 된다. 식각 과정에서 형성되는 Li이온과 할로젠 이온과의 화합물 생성을 억제하기 위해서는 화학적 반응과 물리적 반응에 의한 식각이 병행 되어야하며, Ar 이온에 의한 물리적 식각은 LiNbO<sub>3</sub> 식각 과정에서 생성되는 Li 와 할로젠 이온간의 생성물을 효과적으로 제거할 수 있다.

본 연구에서는 LiNbO<sub>3</sub> 기관에 식각패턴을 제작한 후 NLD (neutral loop discharge) plasma 로 C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>/Ar 가스 혼합비, bias power 및 챔버 내에서 기관 tilting 에 따른 식각 모양을 SEM (scanning electron microscopy)를 통하여 관찰하였다.

\* : 전자부품연구원 광부품연구센터  
(경기도 평택시 진위면 마산리 455-6,  
Fax: 031-6104-126  
Corresponding Author : wsyang@keti.re.kr)

\*\* : 단국대학교 전자공학과

\*\*\* : 성균관대학교 신소재공학과

\*\*\*\* : 성균관대학교 정보통신공학부

2003년 2월 26일 접수, 2003년 3월 30일 1차 심사완료,  
2003년 4월 8일 최종 심사완료

#### 2. 실험 방법

광변조기를 위한 LiNbO<sub>3</sub> 기관 식각을 위하여 두 가지 형태의 패턴을 갖는 포토 마스크를 제작하였

다. 첫 번째는 단지 전극이 위치하는 도파로 주위만을 식각하기 위한 형태이며, 다른 하나는 마하젠더 타입의 도파로 주위를 모두 식각하기 위한 패턴이다. 모든 경우 도파로의 폭은 8  $\mu\text{m}$ 이며, 식각 폭은 15  $\mu\text{m}$  이다. 사용된 기판은 Crystal Tech.사의 양면이 연마된 3" z-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판을 사용하였다.

본 연구를 위한 실험 흐름도를 그림 1에 나타내었다.

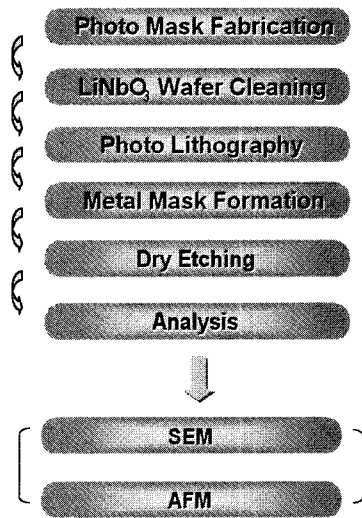


그림 1. 실험 흐름도.  
Fig. 1. The flow chart of the process.

세척된 LiNbO<sub>3</sub> 기판 위에 Ni-Cr 및 Au 막을 이빔 증착기 (E-beam evaporator)를 이용하여 500, 1000Å 두께로 각각 증착하였다. Ni-Cr 막은 LiNbO<sub>3</sub> 와 Au의 adhesion 막으로 Au는 LiNbO<sub>3</sub> 식각을 위한 Ni 마스크 제작을 위한 seed 막으로 각각 사용되어졌다. 증착된 막 위에 spin coater를 이용하여 positive 광감제를 약 1.5  $\mu\text{m}$  두께로 얇게 도포한 후 95°C의 oven에서 30분동안 soft baking 하였다. 다음으로 준비된 웨이퍼를 노광기를 이용하여 4 초동안 마스크를 대고 노출하였다. 이렇게 제작된 웨이퍼를 현상액에 담궈 자외선에 노출된 광감제를 제거하여 패턴을 얻었다.

LiNbO<sub>3</sub> 식각을 위한 마스크 제작은, 준비된 웨이퍼를 플라즈마 에서를 이용하여 패턴 사이에 남아 있는 잔여 광감제 찌꺼기를 제거한 후, 전기도금을 이용하여 1.2  $\mu\text{m}$  두께의 Ni를 도금하였다. 도금 외의 부분인 Au 및 Ni-Cr은 에천트를 이용하

여 각각 제거하였다.

그림 2에 본 연구에 이용되어진 장비의 개략도를 나타내었다.

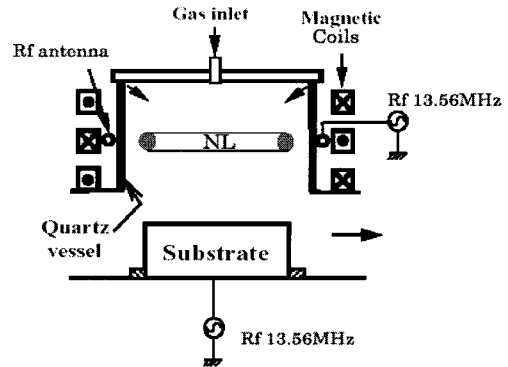


그림 2. NLD 식각장비 모식도.  
Fig. 2. Diagram of NLD etching equipment.

진공 챔버로 이용된 식영 그릇은 300 mm의 직경을 가지며 세 개의 전자기 코일들은 동축으로 놓여있다. Rf 안테나는 식영 그릇 주위에 고정되어 있으며 전자기 코일 중앙과 같은 곳에 위치하고 있다. 중성자 루프 (neutral loop)는 이 것과 동일 평행면에 생성되어지며 13.56MHz rf 전기장은 자기장에 영향을 미친다. 중성자 루프와 기판전극간의 거리는 120 mm이다. 기판전극은 13.56 MHz rf 파워로 되어 있으며, 중앙 코일의 파워를 조정하여 중성자루프의 크기 조절이 가능하며 이를 통해 식각 패턴의 균일성을 얻을 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

NLD 플라즈마는 NL(neutral loop)의 반경을 중앙코일의 전류로써 조절해 줌으로써 식각의 균일성을 얻을 수 있으며, 저온 전자 (Te)를 갖는 고밀도 플라즈마를 생성하여 낮은 압력 하에서 식각공정이 진행됨으로써 평탄한 식각 면과 빠른 식각율을 얻을 수 있다는 특징을 갖는다.

LiNbO<sub>3</sub> 식각을 위해서는 이러한 고밀도 플라즈마 상태에서도 패턴을 보호할 수 있으며 또한 선택비가 우수한 소재를 마스크로 선택하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 마스크로 Ni를 사용하였다.

LiNbO<sub>3</sub> 식각 공정변수를 Ar/C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> 가스혼합비 95/5, 안테나파워 600 W, 반응실 압력 0.33 pa 고정하고 바이어스 파워를 150, 300, 400 W로 하여 LiNbO<sub>3</sub>의 식각에서 바이어스 파워의 영향에 관하

여 관찰하였다.

그림 3에 300, 400 W의 바이어스 파워로 식각된 LiNbO<sub>3</sub> 기판의 단면 및 45° 기울인 사진을 나타내었다.

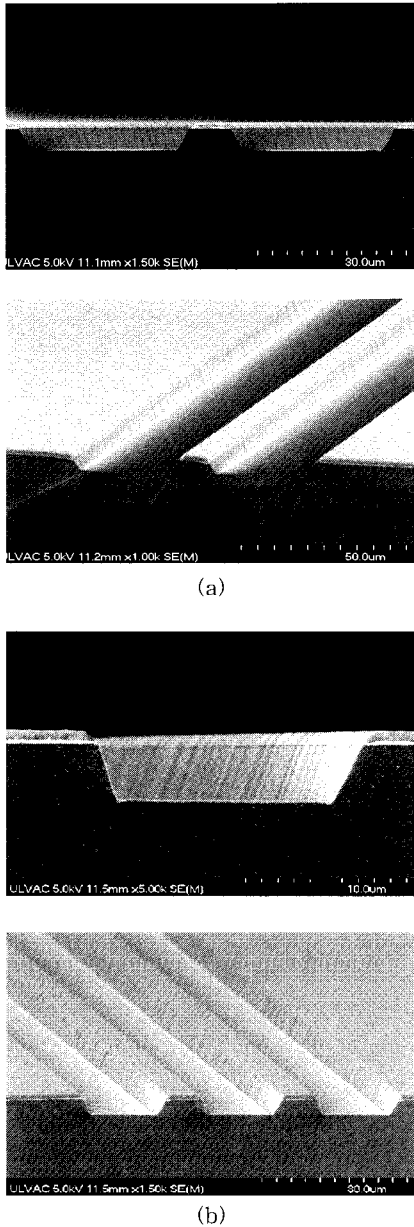


그림 3. 300 W(a), 400 W(b) 바이어스 파워에 따라 LiNbO<sub>3</sub> 식각 된 SEM 단면 및 45° 사진.  
 Fig. 3. 300 W(a), 400 W(b); SEM photograph of LiNbO<sub>3</sub> etched according to bias power.

300 W 바이어스 파워로 40분 동안 식각된 LiNbO<sub>3</sub> 기판(그림 3 (a))은 식각 깊이 4.7 $\mu$ m, 벽면 각도 약 72도이며, 400 W로 30분 동안 식각된 기판(그림 3 (b))은 식각 깊이 4.7 $\mu$ m, 벽면각도 약 74도 이다. 두 경우 식각 표면이 굉장히 깨끗했으며 마스크의 측면 형상이 LiNbO<sub>3</sub> 식각 면의 형상에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 바이어스 파워 증가에 따라 전자의 경우 0.12  $\mu$ m/min, 후자의 경우는 0.16  $\mu$ m/min으로 식각율이 증가함을 알 수 있었다. 특히, 400 W 이상의 바이어스 파워에서 식각된 LiNbO<sub>3</sub>는 micro-trench 현상이 관찰 되었다. 이는 높은 바이어스에서 식각이 진행되는 동안 패턴 측면과 식각 표면사이의 계면이 상대적으로 취약하여 식각표면 보다 식각 속도가 상대적으로 빠르게 진행됨으로 일어나는 현상으로 생각되어진다.

위와 동일한 조건하에서 바이어스 파워 150 W으로 30분 동안 식각된 LiNbO<sub>3</sub>의 사진을 그림 4에 나타내었다. 식각 깊이는 약 1.7  $\mu$ m 이다. 식각 표면의 불균일성 및 표면이 깨지는 현상을 관찰할 수 있으며, 깨진 잔여물들이 표면에 남아있는 것을 알 수 있다. 따라서, 최소한 LiNbO<sub>3</sub> 식각을 위한 바이어스 파워는 약 250 ~ 350W이며, 약 0.1  $\mu$ m

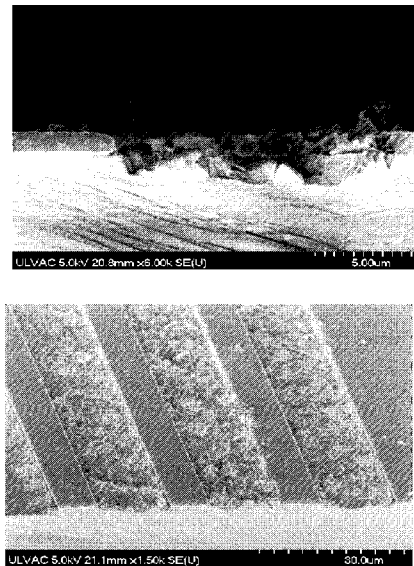


그림 4. 바이어스 파워 150 W에서의 LiNbO<sub>3</sub> 식각 사진.  
 Fig. 4. SEM photograph of etched LiNbO<sub>3</sub> to the 150 W bias power.

/min 이상의 식각율과 75°의 측면 각도를 갖는 효과적인 LiNbO<sub>3</sub> 식각을 위해서는 300 W 이상의 높은 바이어스 파워를 필요로 한다. 또한, 초고속 광변조기 구현을 위해 400 W 이상의 바이어스 파워 조건에서 나타나는 micro-trench 구조를 극대화시키는 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 생각되어진다.

Ar/C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> 가스혼합비를 95/5 (그림 3(a)), 90/10 (그림 5), 안테나파워 600 W, 바이어스 파워 300 W, 반응실 압력 0.33 pa, 식각시간을 각각 40, 30 분으로 하여 LiNbO<sub>3</sub> 식각에 미치는 영향을 관찰하였다. 가스혼합비가 90/10인 경우 식각 깊이 3.8μm, 벽면각도 74도 이다. 가스혼합비가 달라도 식각율은 약 0.12 μm/min으로 같은 결과를 얻었으며, 단지 벽면 각도만이 영향을 받았는데, 이는 화학적 반응이 증가되어질 때 물리적 식각이 우선 되어질 때보다는 LiNbO<sub>3</sub> 식각면이 개선되어지는 것으로 보여진다.

그림 6은 식각된 LiNbO<sub>3</sub> 표면의 AFM (atomic force microscopy) 이미지를 나타내었다. 다양한 바이어스 파워 및 가스혼합비 조건에서 식각된 모든 LiNbO<sub>3</sub> 표면은 균일한 표면을 가졌다.

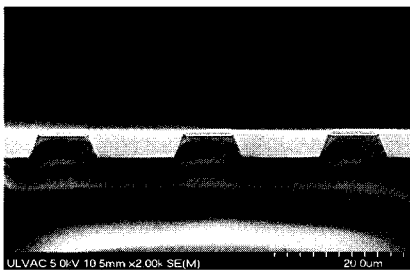


그림 5. Ar/C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>=95/10의 조건에서 식각된 사진.  
Fig. 5. SEM photograph of Ar/C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>=95/10 condition.

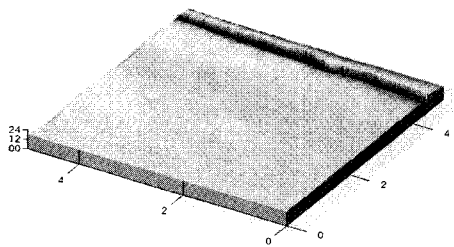


그림 6. 식각된 LiNbO<sub>3</sub> 표면의 AFM 이미지.  
Fig. 6. AFM image of etched LiNbO<sub>3</sub> surface.

LiNbO<sub>3</sub> 기판을 패턴에 수평한 방향으로 약 10도 정도 기울여 식각한 사진을 그림 7에 나타내었다. 공정 변수는 Ar/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>=90/10, 안테나 파워 600 W, 바이어스 파워 300 W이며, 식각 시간은 35분이다. 식각 깊이는 4.5 μm로 식각율은 약 0.13 μm/min이다. 식각 각도는 왼쪽 73도, 오른쪽 68도로 약 5도 정도의 차이를 보였다. 패턴의 왼쪽 면은 기울어진 LiNbO<sub>3</sub> 기판의 윗쪽에 위치한 것이고 오른쪽의 패턴은 그 반대 면에 위치한 패턴이다. 이로부터, 초고속 광변조기의 이상적인 식각 패턴은 도파로가 될 식각 벽면이 90도 각도를 갖는 것이나 단순한 공정변수의 변화로는 실현이 힘들 것으로 보이며, 챔버 내에서 기판에 각도를 주어 식각하는 방법은 위의 문제를 해결할 수 있는 한가지 방법으로 제안되어질 수 있을 것으로 생각되어지며 지속적인 연구가 필요하다.

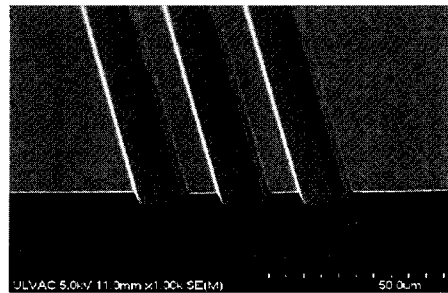
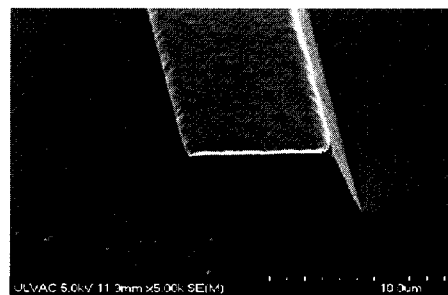


그림 7. LiNbO<sub>3</sub> 기판을 10도 기울여 식각된 사진.  
Fig. 7. SEM photograph of 10 degree tilt etching.

LiNbO<sub>3</sub> 식각 기술은 초고속 광변조기 및 다양한 전기-광학 소자의 특성 향상과 응용범위를 넓히기 위해 반드시 필요한 기술이다. 이의 실현을 위해서는 LiNbO<sub>3</sub> 식각 메커니즘을 이해하여야 하며, 식각된 도파로 벽면 roughness 개선 및 각도를 90도에

가깝도록 하는 연구가 진행 중이며, 또한 식각된 도파로의 광 특성에 관한 연구가 현재 병행되고 있다.

#### 4. 결론

LiNbO<sub>3</sub> 기판 위에 Ni 마스크를 제작하여 다양한 바이어스 파워 및 가스혼합비를 공정 변수로 하여 식각된 패턴 형상을 관찰하였다.

바이어스 파워를 변수로 한 경우, 150 W에서는 식각이 되지 않았으며, 300 W와 400 W에서는 각각 0.12, 0.16  $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 식각율을 나타냈다. 특히, 400 W 이상의 바이어스 파워에서 식각된 시편은 micro-trench 구조를 관찰할 수 있었다.

가스혼합비를 변수로 하여 식각된 경우, 식각율의 변화는 없었으며, 단지 식각면의 기울기에 영향을 줄 수 있었다. 또한, LiNbO<sub>3</sub> 기판을 10기울여서 식각한 경우 각각 68과 73도로 기울어진 윗면에 위치한 도파로의 기울기가 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 다양한 조건하에서 식각된 모든 기판의 표면은 깨끗했으며, Ni 마스크가 측벽의 roughness에 영향을 주는 것을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- [1] K. Shima, N. Mitsugi, and H. Nagata, "Surface precipitates on single crystal LiNbO<sub>3</sub> after dry-etching by CHF<sub>3</sub> plasma", J. Mater. Res., Vol. 13, p. 527, 1998.
- [2] C. plehnert, V. Norkus, S. Mohling, and A. Hayes, "Reactive ion beam etching of lithium tantalate and its application for pyroelectric infrared detectors", Surface and Coating Technol., Vol. 74, p. 932, 1995.
- [3] F. Laurell, J. Webjorn, G. Arvidsson, and S. Seki, "Wet etching of proton-exchanged lithium niobate-A novel proceeding technique", J. Lightwave Technol., Vol. 10, p. 1606, 1992.
- [4] W. L. Chen, R. S. Chen, J. H. Lee, and W. S. Wang, "Lithium niobate ridge waveguides by nickel diffusion and proton-exchanged wet etching", IEEE Phon. Technol., Vol. 10, p. 1318, 1995.
- [5] K. Noguchi, O. Mitomi, K. Kawano, and M. Yanagibashi, "Highly efficient 40-GHz band

width Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical modulator employing ridge structure", IEEE Phon. Technol. Lett., Vol. 5, p. 52, 1993.

- [6] H. Nagata, N. Mitrugui, K. Shima, M. Tamai, and E. M. Haga, "Growth of crystalline LiF on CF<sub>4</sub> plasma etched LiNbO<sub>3</sub> substrates", J. Crystal Growth, Vol. 187, p. 573, 1998.