

## Helicon Wave Plasma에 의해 식각된 단결정 LiNbO<sub>3</sub>의 표면 형상 및 특성

박우정<sup>†</sup> · 양우석\* · 이한영\* · 윤대호

성균관대학교 신소재공학과

\*전자부품연구원 광부품센터

(2003년 4월 18일 접수; 2003년 8월 13일 승인)

### Surface Morphology and Characteristics of LiNbO<sub>3</sub> Single Crystal by Helicon Wave Plasma Etching

Woo-Jung Park,<sup>†</sup> Woo-Seok Yang,\* Han-Young Lee,\* and Dae-Ho Yoon

Department of Advanced Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 404-746, Korea

\*Optical Telecommunication Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Pyungtak 451-865, Korea

(Received April 18, 2003; Accepted August 13, 2003)

#### 초 록

단결정 LiNbO<sub>3</sub>를 helicon wave plasma 방법으로 식각시 bias power와 CF<sub>4</sub>, HBr, SF<sub>6</sub>가 혼합된 gas 유량에 따른 식각 속도와 rms roughness 값의 특성을 관찰하였다. 식각된 깊이는 surface profiler로 관찰하였으며 rms roughness 값은 Atomic Force Microscopy (AFM)으로 측정하였다. Bias power 증가함에 따라 500 W에서 가장 높은 식각 속도와 가장 평탄한 표면 형상을 얻을 수 있었으며, CF<sub>4</sub>, HBr, SF<sub>6</sub> gas 유량을 각각 10~30 sccm으로 증가시킴에 따라 식각 속도는 CF<sub>4</sub>, HBr, SF<sub>6</sub> gas 유량이 10 sccm, 30 sccm, 10 sccm에서 가장 높게 나타났으며, rms roughness 값은 CF<sub>4</sub>, HBr, SF<sub>6</sub> gas 유량이 30 sccm, 10 sccm, 30 sccm에서 가장 낮은 표면 조도를 나타내었다.

#### ABSTRACT

The etching characteristics of a LiNbO<sub>3</sub> single crystal have been investigated using helicon wave plasma source with bias power and the mixture of CF<sub>4</sub>, HBr, and SF<sub>6</sub> parameters. The etching rate of LiNbO<sub>3</sub> with etching parameters was evaluated by surface profiler. The etching surface was evaluated by Atomic Force Microscopy (AFM). The surface morphology of the etched LiNbO<sub>3</sub> changed with bias power and the mixture of CF<sub>4</sub>/Ar/Cl<sub>2</sub>, HBr/Ar/Cl<sub>2</sub>, and SF<sub>6</sub>/Ar/Cl<sub>2</sub> parameters. Optimum etching conditions, considering both the surface flatness and etch rate were determined.

**Key words :** LiNbO<sub>3</sub>, Dry etching, Helicon wave plasma, Surface roughness

#### 1. 서 론

광전자는 최근에 레이저의 발명, 발광 다이오드를 기본으로 각종 광반도체 재료의 진보와 고속 대용량의 정보처리를 목적으로 광정보처리 기술에 대한 사회적 요청 등으로 급속하게 사용영역이 넓어지고 있는 첨단공학의 한 분야이며, 최근 몇 년간 비선형 광학 및 전기광학 특성을 가진 새로운 재료에 관한 관심이 점차 고조되고 있다.<sup>1-3)</sup> LiNbO<sub>3</sub> 단결정은 전기광학계수, 압전 계수 및 비선형 계수가 우수한 유전체 소재로서 optical device의 응용으로 널리 연구되어지고 있다. 근래 광통신의 보급 확대로 인해 LiNbO<sub>3</sub> 결정을 이용한 40 GHz대의 고속 광변조기 등

의 광 부품으로서 응용연구가 활발히 추진되고 있으며 광 집적 회로의 개발을 목표로 적극적인 연구를 진행하고 있다.<sup>4-7)</sup> 광도파로는 넓은 대역폭을 달성하기 위해서 정확한 능선 유형으로 가공되어야 하며, 특히 식각에 의한 계단형 LiNbO<sub>3</sub> 광도파로 구현 기술은 전극과 공기와의 접촉면을 최대한 증가시킴으로써 전계가 느끼는 유효 굴절률을 감소시키고 rf 위상속도가 광의 위상속도로 증가하여 40 Gbps 이상의 초고속 광변조를 가능하게 한다.<sup>8-11)</sup> 그러나 이러한 소자 제작을 위한 식각 기술에는 많은 문제점이 있다. 화학 etchant에 의한 LiNbO<sub>3</sub> 결정의 식각은 식각 속도가 매우 느리고 식각면 또한 균일하지 않아 미세구조 관찰에는 용이하나 소자 공정상 패터닝공정에는 거의 이용이 불가능하다. 따라서 LiNbO<sub>3</sub> 결정의 패터닝 공정은 건식 식각을 이용하여야 한다. 일반적으로 건식 식각 기술은 Reactive Ion Etching (RIE) 방법이 주로 사용되어져 왔고 이러한 방법은 플라즈마 충격에 의한 미세 결합

<sup>†</sup>Corresponding author : Woo-Jung Park  
E-mail : dhyoon@skku.ac.kr  
Tel : +82-31-290-7361 Fax : +82-31-290-7371

발생이 문제되어져 왔으며 이를 개선하기 위하여 중성 이온 식각 및 Electron Cyclotron Resonance (ECR) 식각 기술이 사용되고 있다. 특히, 이러한 건식 식각법은 화학적인 메커니즘에 의한 작용 이외에 조건에 따라 이온충격에 따른 표면의 물리적 특성을 변화시킬 수도 있으며 플라즈마를 생성시키기 위한 에너지원으로써 인가된 rf 전원은 가스성분의 전자충돌에 의해 이온화와 분해를 유발시켜 자유 라디칼을 생성한다. LiNbO<sub>3</sub> 표면은 이러한 화학반응에 의해서 식각이 진행되며 식각 조건에 따라 LiNbO<sub>3</sub>의 식각 속도의 변화 및 그에 따른 특성 고찰이 가능하다. 따라서 식각 속도와 표면 거칠기에 따른 특성을 이해하고 식각면에 결함이 매우 적은 우수한 도파로 소자 제작이 가능한 새로운 기술을 확보함으로써 계단형 LiNbO<sub>3</sub> 도파로를 이용한 초고속 광변조 소자 제작을 현실화할 수 있다.

## 2. 실험방법

시편은 X-cut, Z-cut 3인치 단결정 LiNbO<sub>3</sub> wafer를 사용하였고, 시편크기는 20×20 mm<sup>2</sup>로 dicing하여 사용하였다. 웨이퍼 세정을 D.I water : Deconex=96 : 4(vol%)를 40°C에서 30분간 초음파 세정 후, D.I water로 30분간 초음파 세정하였다. 그리고 각각 acetone, methyl alcohol, trichloroethylene, isopropyl alcohol의 순으로 각각 5분동안 초음파 세정 후, dry oven(90°C)에서 건조시켜 냉각 후 사용하였다. Table 1은 각 시편의 주요 실험 공정 변수를 간략하게 나타내었으며, Fig. 1은 LiNbO<sub>3</sub> 식각을 위해 사용된 helicon wave plasma etcher(NSE-8000 seris, NEXSO)의 개략도를 나타내었다. 본 장비의 사양은 rf power source

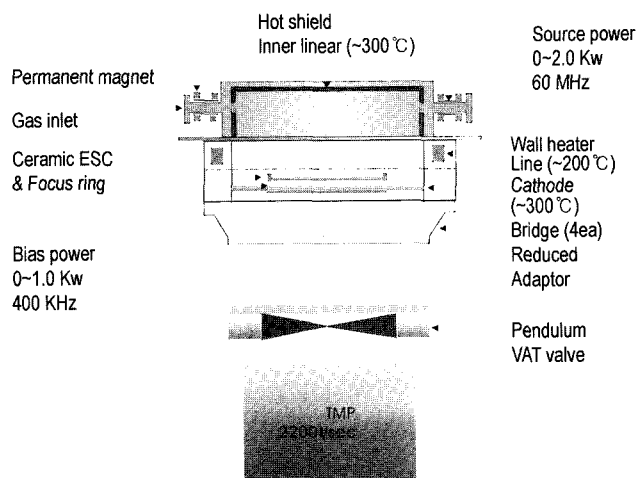


Fig. 1. Schematic diagram of the helicon wave plasma source etcher (NSE-8000 seris, NEXSO).

는 최대 2 kW, 60 MHz이며, bias power는 최대 1 kW, 400 KHz로 다른 플라즈마 방식과는 달리 높은 이온화율과 더 높은 고밀도의 플라즈마를 만든다. 또한 helicon wave plasma source는 낮은 압력에서도 사용이 가능하며, uniformity가 균일하다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 식각 속도는 LiNbO<sub>3</sub> 단결정의 식각된 깊이를 surface profiler(TENCOR P-10)를 5회씩 측정하여 평균값을 식각된 깊이로 정하여 오차의 범위를 줄였으며, Atomic Force Microscopy (AFM, Thero-microscopes, USA)로 식각 되어진 LiNbO<sub>3</sub>의 rms roughness 값을 측정하기 위하여 주입되는 각각의 변수에 따라 측정하여 상호 비교하였으며 상온에서 5×5 μm로 실시하였다.

Table 1. LiNbO<sub>3</sub> Dry Etching of Experimental Parameters

	Bias power (W)	LiNbO <sub>3</sub> wafer	Pressure (mT)	Source power (W)	Ar (sccm)	CF <sub>4</sub> (sccm)	HBr (sccm)	SF <sub>6</sub> (sccm)	Cl <sub>2</sub> (sccm)
Sample 1	300	X-cut	3	1800	70	10	0	0	20
Sample 2	300	Z-cut	3	1800	70	10	0	0	20
Sample 3	500	X-cut	3	1800	70	10	0	0	20
Sample 4	500	Z-cut	3	1800	70	10	0	0	20
Sample 5	700	X-cut	3	1800	70	10	0	0	20
Sample 6	700	Z-cut	3	1800	70	10	0	0	20
Sample 7	500	Z-cut	3	1800	60	20	0	0	20
Sample 8	500	Z-cut	3	1800	50	30	0	0	20
Sample 9	500	Z-cut	3	1800	70	0	10	0	20
Sample 10	500	Z-cut	3	1800	60	0	20	0	20
Sample 11	500	Z-cut	3	1800	50	0	30	0	20
Sample 12	500	Z-cut	3	1800	70	0	0	10	20
Sample 13	500	Z-cut	3	1800	60	0	0	20	20
Sample 14	500	Z-cut	3	1800	50	0	0	30	20

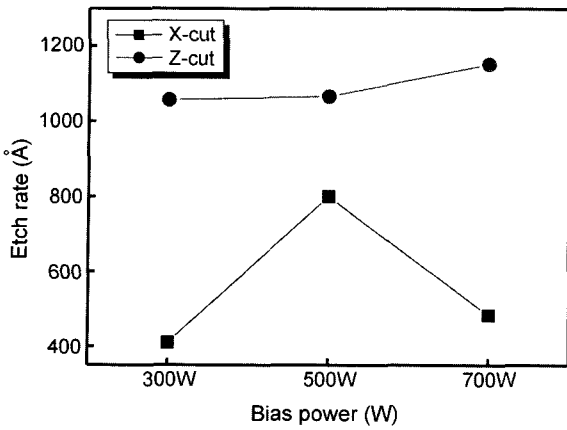


Fig. 2. Comparison of X and Z-cut LiNbO<sub>3</sub> etch rate as variation of bias power.

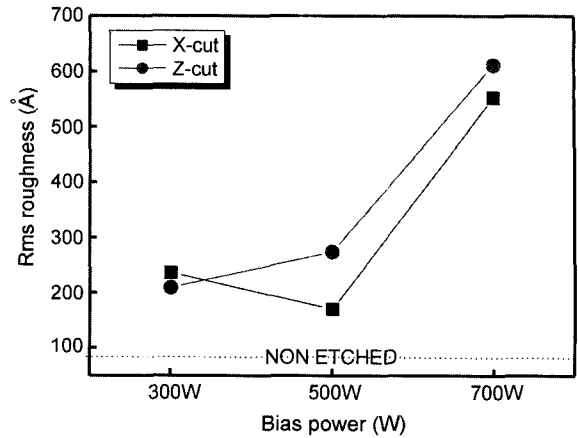


Fig. 4. Comparison of X and Z-cut LiNbO<sub>3</sub> of rms roughness as variation of bias power.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. Bias Power에 의한 식각 속도와 표면 형상의 변화

Fig. 2는 bias power의 변화에 따른 X, Z-cut LiNbO<sub>3</sub>의 식각 속도의 변화를 나타내었다. X-cut의 LiNbO<sub>3</sub>는 bias power가 증가함에 따라 500 W에서 식각 속도가 800 Å/min으로 가장 높았으며 그 이후 bias power가 증가할수록 식각 속도가 483 Å/min으로 현저히 감소하는 경향을 나타내었다. Z-cut의 LiNbO<sub>3</sub>는 bias power가 증가할수록 식각 속도는 계속 증가하는 경향을 나타내었으며, bias power

700 W에서 식각 속도가 1153 Å/min으로 가장 높았다. 또한 동일한 조건의 bias power에서는 Z-cut의 LiNbO<sub>3</sub>가 X-cut의 LiNbO<sub>3</sub> 보다 식각 속도가 훨씬 높음을 확인할 수 있었다. 이는 bias power의 증가에 따른 etch rate의 증가는 power의 증가에 따른 이온 에너지의 증가로 인한 이온 충격 효과의 강화가 그 원인을 예상할 수 있다.

Fig. 3은 bias power의 변화에 따른 X, Z-cut LiNbO<sub>3</sub>의 표면형상을 AFM으로 관찰하였으며, Fig. 4는 식각된 X, Z-cut LiNbO<sub>3</sub> 시편의 rms roughness 값을 나타내었다. 식각 전의 X, Z-cut 시편의 경우 90 Å의 rms roughness를

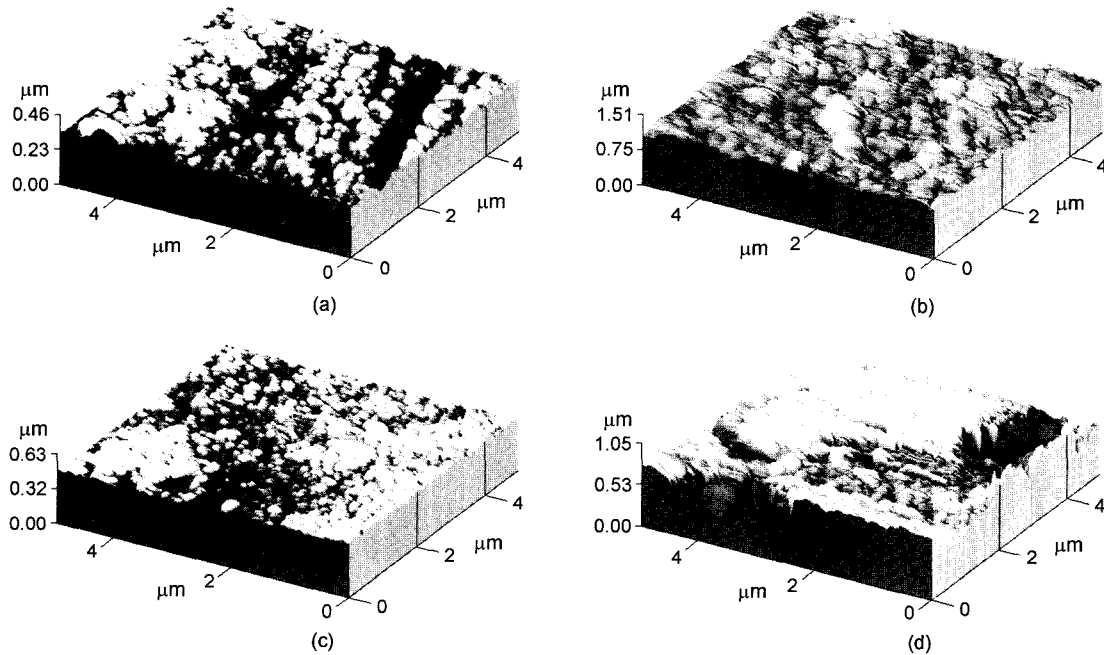


Fig. 3. AFM images of etched X and Z-cut LiNbO<sub>3</sub> as effect of bias power parameters. (a) Etched X-cut LiNbO<sub>3</sub> bias power 500 W, (b) Etched X-cut LiNbO<sub>3</sub> bias power 700 W, (c) Etched Z-cut LiNbO<sub>3</sub> bias power 500 W, and (d) Etched Z-cut LiNbO<sub>3</sub> bias power 700 W.

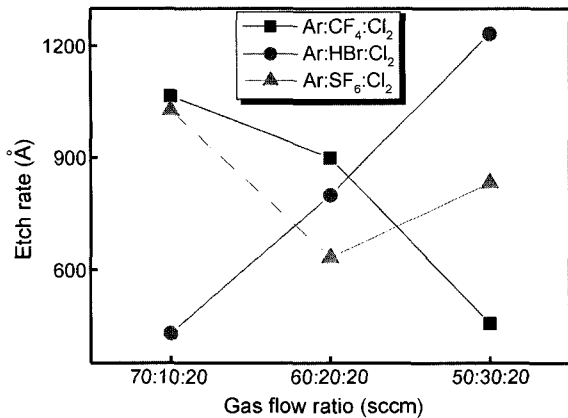


Fig. 5. Comparison of etch rate as variation of gas flow ratio.

나타내었으며, bias power의 변화에 의해 etching된 X-cut의 LiNbO<sub>3</sub> 시편은 bias power의 증가에 의해 식각된 면의 표면이 거칠어지는 형상을 확인할 수 있었다. 또한 식각 속도가 가장 높은 bias power 500 W에서의 rms roughness 값이 170 Å로 가장 낮음을 알 수 있었다. Bias power 700 W에서의 rms roughness 값은 553 Å으로 가장 높았다. Bias power의 변화에 의해 etching된 Z-cut의 LiNbO<sub>3</sub> 시편은 bias power가 증가함에 따라 표면 형상이 매우 거칠어짐을 확인할 수 있었으며, rms roughness 700 W에서 612 Å으로 가장 높았음을 확인할 수 있었다. 이는 bias power의 증가로 인해 이온의 직진성이 증가하여 식각 속도는 향상되었지만, bias power의 증가로 ion의 운동에너지가 증가되어 고 에너지를 가진 ion이 LiNbO<sub>3</sub> 기판에 충돌하게 되므로 시료의 표면 손상을 야기하여 표면이 거칠어져서 rms roughness 값은 증가되어짐으로 판단된다.

### 3.2. 혼합된 가스의 유량의 변화에 따른 식각 속도와 표면 형상의 변화 및 특성

Fig. 5는 Z-cut LiNbO<sub>3</sub> 시편의 각 공정 조건을 동일시 하고 Cl<sub>2</sub> gas의 유량은 고정시켜 CF<sub>4</sub>, HBr, SF<sub>6</sub> 가스의 유량을 각각 10, 20, 30 sccm으로 변화시켜 식각 속도 변화를 나타낸 것이다. CF<sub>4</sub> gas 유량을 10, 20, 30 sccm으로 각각 변화시켰을 때 CF<sub>4</sub> gas가 10 sccm일 때 식각 속도가 1066 Å/min으로 가장 높았으며, 그 이후 CF<sub>4</sub> 가스 유량이 증가함에 따라 식각 속도가 457 Å/min으로 급격히 감소함을 알 수 있었다. HBr gas 유량의 변화에 따라 gas 양이 증가할수록 식각 속도가 430 Å/min에서 1233 Å/min으로 급격히 증가하였으며 HBr gas가 30 sccm에서 가장 높은 식각 속도를 나타내었다. SF<sub>6</sub> gas 유량이 증가함에 따라 10 sccm에서 1027 Å/min으로 식각 속도가 가장 높았으며 그 이후 점차 식각 속도가 감소하다가 SF<sub>6</sub> gas를 30 sccm으로 변화시켰을 때 833 Å/min으로 식각 속도가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 같은 유량에서의 각각의 반응성 gas에 의한 식각 속도를 관찰하였을 때

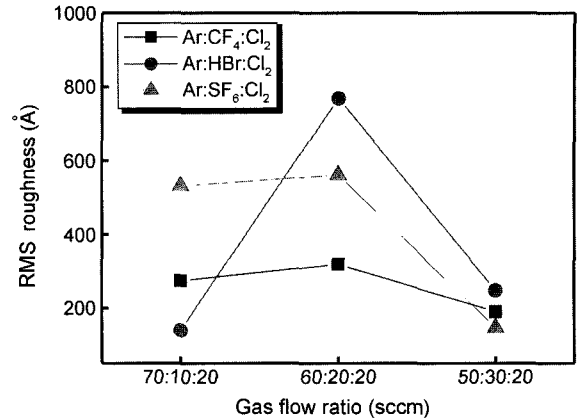


Fig. 6. Comparison of Z-cut LiNbO<sub>3</sub> of rms roughness as variation of gas flow ratio.

CF<sub>4</sub> gas가 각각 10 sccm과 20 sccm일 때는 1066 Å/min과 900 Å/min으로 식각 속도가 가장 높았으나, 30 sccm에서는 가장 낮은 식각 속도를 나타내었으며, HBr gas를 사용한 시편이 가장 높은 식각 속도를 나타내었다. 위의 결과로 볼 때 F를 함유한 gas들은 화학적인 반응을 일으키는 gas가 LiNbO<sub>3</sub>와 완전히 반응하지 못하여 etch rate를 증가시키지 못한 것으로 사료되며, Ar 이온 충격에 의한 물리적인 식각에 많이 의존함을 알 수 있으며, HBr gas 양을 변화시킨 시편은 HBr의 첨가량이 증가함에 따라 식각 속도가 430 Å/min에서 1233 Å/min으로 증가하였다. 이러한 원인으로서는 F 이온보다 Br 이온의 질량이 훨씬 크며, gas 첨가량에 따라 점점 많아진 이러한 Br 이온들이 직진성을 가지고 시편과의 충돌을 더 많이 일으켜 식각 속도에 영향을 미친다고 판단된다.<sup>12,13)</sup>

Fig. 6은 Z-cut LiNbO<sub>3</sub> 시편에서 각 공정 조건을 동일시 하고 Cl<sub>2</sub> gas의 유량을 고정시킨 후 CF<sub>4</sub>, HBr, SF<sub>6</sub> 가스 유량을 각각 10, 20, 30 sccm으로 식각된 시편을 AFM으로 분석하여 rms roughness 값을 측정하였다. CF<sub>4</sub> gas 유량을 각각 10, 20, 30 sccm으로 변화를 주어 사용하였을 때 rms roughness 값은 점차적으로 증가하다가 감소하는 경향을 보였으며 CF<sub>4</sub> gas가 30 sccm일 때 190 Å으로 rms roughness 값이 가장 낮게 나타났으며 HBr gas를 사용하여 유량을 변화시켰을 때 HBr gas 20 sccm에서 rms roughness 값이 769 Å으로 가장 높게 나타났으며, 20 sccm 이상에서는 rms roughness 값이 급격히 저하됨을 알 수 있었다. SF<sub>6</sub> gas의 경우 유량을 증가시켰을 때 20 sccm까지 rms roughness 값이 531 Å에서 561 Å으로 약간 감소하였으나 그 이후 유량을 증가시켰을 때 147 Å로 매우 낮은 rms roughness 값을 나타내었다. 이는 LiF가 Ar ion 충격에 의해 물리적으로 제거되어야 하는데 화학적인 반응을 증가함에 따라 LiF가 효과적으로 제거되지 못하여 LiF가 표면에 축적되어져서 surface roughness가 감소되어진 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 helicon wave plasma etcher를 이용하여 X-cut, Z-cut LiNbO<sub>3</sub> wafer에 bias power를 변화시켰다. Bias power가 300~700 W로 증가시킴에 따라 X-cut LiNbO<sub>3</sub>는 식각 속도는 500 W에서 증가하다가 그 이후 다시 감소하는 경향을 보였고, rms roughness 값은 500 W에서 가장 낮았으며 그 이후 다시 증가하는 경향을 나타내었다. X-cut LiNbO<sub>3</sub>에서는 bias power 500 W에서 최고의 식각 속도와 가장 평탄한 표면 형상을 얻을 수 있었다. 또한 bias power가 증가함에 따라 식각된 Z-cut LiNbO<sub>3</sub> wafer의 식각 속도는 계속 증가하였으며, rms roughness 역시 계속 증가하는 경향을 나타내었다.

또한 Z-cut LiNbO<sub>3</sub> wafer를 이용하여 Ar, Cl<sub>2</sub> gas와 각각 CF<sub>4</sub>, HBr, SF<sub>6</sub> 반응성 가스 유량을 변화시킨 결과는 CF<sub>4</sub>, HBr, SF<sub>6</sub> gas 유량을 각각 10~30 sccm으로 증가시킴에 따라 식각 속도는 CF<sub>4</sub> gas에서 10 sccm, HBr gas에서 30 sccm, SF<sub>6</sub> gas에서는 10 sccm에서 가장 높게 나타났으며, rms roughness 값은 CF<sub>4</sub> gas 30 sccm, HBr gas 10 sccm, SF<sub>6</sub> gas 30 sccm에서 가장 낮은 rms roughness 값을 나타내었다. 또한 HBr gas가 30 sccm일 때 1233 Å/min으로 가장 높은 식각 속도를 나타냈으며 rms roughness 값은 CF<sub>4</sub> gas 30 sccm일 때 190 Å으로 가장 낮게 나타났었다.

#### REFERENCES

1. S. K. Koroty, G. Eisentein, R. S. Tucker, J. J. Veselka, and G. Raybon, "Optical Intensity Modulation to 40 GHz Using a Waveguide Electro-optic Switch," *Appl. Phys. Lett.*, **50** 1631-33 (1987).
2. J. H. Scraffuer and R. R. Hayes, "Velocity-matching in Millimeter wave Integrated Optic Modulators with Periodic Electrodes," *J. Lightwave Tech.*, **12** 503-05 (1994).
3. W. E. Martin, "Low-threshold Room-temperature Double-heterostructure GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> Injection Lasers at 1- $\mu$ m Wavelengths," *Appl. Phys. Lett.*, **26** 562-64 (1975).
4. E. Van Tomme, P. P. Van Daele, R. G. Baets, and P. E. Lagasse, "Integrated Optic Devices Based on Nonlinear Optical Polymers," *IEEE J. Quant. Electron.*, **27** 778-79 (1991).
5. D. G. Girton, S. L. Kwiatkowski, G. F. Lipscomb, and R. S. Lytel, "20 GHz Electro-optic Polymer Mach-Zehnder Modulator," *Appl. Phys. Lett.*, **58** 1730-32 (1991).
6. C. C. Teng, "Traveling-wave Polymeric Optical Intensity Modulator with More than 40 GHz of 3-dB Electrical Bandwidth," *Appl. Phys. Lett.*, **60** 1538-40 (1992).
7. E. Van Tomme, P. P. Van Daele, R. G. Baets, and G. F. Lipscomb, "Complementary Optical Tap Fabricated in an Electro-optic Polymer Waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, **58** 1558-60 (1991).
8. K. Tajima, N. Kuwabara, F. Amemiya, and R. Kobayashi, "Sensitivity Improvement of Electric Field Sensor with LiNbO<sub>3</sub> Electro-optic Crystals by Loading Inductance," *Trans. ICICE*, **76 B** [III] 538-45 (1993).
9. K. Nishikawa and S. Furuichi, *Tech. Digest 13 th Sensor Symp.*, 105-08 (1995).
10. O. Mitomi, K. Noguchi, and H. Miyazawa, "Design of Ultra-Broad-Band LiNbO<sub>3</sub> Optical Modulators with Ridge Structure," *IEEE Trans. Micro. wave Theory Tech.*, **43** 2203-07 (1995).
11. M. Tamuma and S. Yoshikado, "Etching Characteristics of LiNbO<sub>3</sub> Crystal by Fluorine Gas Plasma Reactive Ion Etching," *Science and Tech. Adv. Mater.*, **2** 563-69 (2001).
12. N. H. Kim, C. I. Kim, and E. G. Chang, "Investigations on the Etching of Platinum Film Using High Density Inductively Coupled Ar/Cl<sub>2</sub>/HBr Plasmas," *Trans. Elec. and Electronic Mater.*, **1** [3] 14-7 (2000).
13. S. B. Yu, N. H. Kim, C. I. Kim, and E. G. Chang, "Notching Effect during the Etching Undoped Amorphous Silicon Using High Density Cl<sub>2</sub>/HBr/O<sub>2</sub> Plasma," *J. Kor. Inst. Electrical and Electronic Mater. Eng.*, **13** [8] 651-57 (2000).