

광도파로 제작을 위한 단결정 LiNbO_3 건식 식각 특성

박우정[†] · 양우석* · 이한영* · 윤대호

성균관대학교 신소재공학과

*전자부품연구원 광부품센터

(2004년 10월 15일 접수; 2005년 2월 1일 승인)

Dry Etching Characteristics of LiNbO_3 Single Crystal for Optical Waveguide Fabrication

Woo-Jung Park,[†] Woo-Seok Yang,* Han-Young Lee,* and Dae-Ho Yoon

Department of Advanced Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

*Optical Telecommunication Components Laboratory, Korea Electronics Technology Institute, Gyunggi-Do 451-865, Korea

(Received October 15, 2004; Accepted February 1, 2005)

초 록

LiNbO_3 optical waveguide 구조를 neutral loop discharge plasma 방법으로 식각시 Ar과 C_3F_8 가 혼합된 가스 유량에 따른 식각속도와 표면조도 값의 특성을 관찰하였다. 식각 후 식각속도와 식각단면은 scanning electron microscopy로 비교 분석하였으며, 표면조도는 atomic force microscopy로 측정하였다. Ar과 C_3F_8 가 혼합된 가스 유량비를 각각 0.1 - 0.5로 증가시킴에 따라 식각속도와 표면조도는 0.2에서 가장 높게 나타났으며, bias power를 증가함에 따라 300 W에서 가장 우수한 식각속도와 가장 평탄한 표면 형상을 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

The etching characteristics of a LiNbO_3 optical waveguide structure have been investigated using neutral loop discharge plasma with the mixture of C_3F_8 and Ar and the bias power parameters. The etching rate and profile angle of optical waveguide with etching parameters were evaluated by scanning electron microscopy. Also, the etching RMS roughness was evaluated by atomic force microscopy. From the results of optimum etching conditions are the C_3F_8 gas flow ratio of 0.2 and the bias power of 300 W.

Key words: Neutral loop plasma, LiNbO_3 , Surface roughness, Etch rate, Sidewall angle

1. 서 론

LiNbO_3 단결정은 전기광학계수, 압전 계수 및 비선형 계수가 우수한 유전체 소재로서 광소자의 응용으로 널리 연구되어지고 있다. 근래 광통신의 보급 확대에 의해 LiNbO_3 결정을 이용한 40 GHz 대의 고속 광변조기 등의 광부품으로서 응용연구가 활발히 추진되고 있으며 광집적 회로의 개발을 목표로 적극적인 연구를 진행하고 있다.¹⁻⁴⁾ 광도파로는 넓은 대역폭을 달성하기 위해서 정확한 능선 유형으로 가공되어야 하며, 특히 식각에 의한 계단형 LiNbO_3 광도파로 구현기술은 전극과 공기와의 접촉면을 최대한 증가시킴으로써 전계가 느끼는 유효굴절률을 감소시키고 RF 위상속도가 광의 위상속도로 증가하여 40 Gbps 이상

의 초고속 광변조를 가능하게 한다.⁵⁻⁸⁾ 그러나 이러한 소자 제작을 위한 식각 기술에는 많은 문제점이 있다. 특히, 화학 식각 용액에 의한 LiNbO_3 결정의 식각은 식각속도가 매우 작고 식각면 또한 균일하지 않아 미세구조 관찰에는 용이하나 소자 공정상 패터닝공예는 거의 이용이 불가능하다.⁹⁾ 한편, LiNbO_3 건식 식각은 높은 이온 에너지에 의한 기판 손상을 최소화하여야 하므로 Ar 보다는 CHF_3 , CF_4 , C_3F_8 과 같은 반응가스를 이용하여야 한다. 그러나, 이러한 반응 식각은 LiNbO_3 와 할로겐화된 이온과의 반응에 의하여 식각 과정 동안 표면에 화합물을 형성하게 되며, 이러한 화합물은 식각 특성의 저해 요소로 작용하게 된다. 따라서 식각 과정에서 형성되는 Li 이온과 할로겐 이온과의 화합물 생성을 억제하기 위해서는 화학적 반응과 물리적 반응에 의한 식각이 병행되어야 하며, Ar 이온에 의한 물리적 식각은 LiNbO_3 식각 과정에서 생성되는 Li와 할로겐 이온간의 생성물을 효과적으로 제거할 수 있다. 본 연구에서는 LiNbO_3 기판에 Neutral Loop

[†]Corresponding author : Woo-Jung Park
E-mail : wjpark@skku.edu
Tel : +82-31-290-7388 Fax : +82-31-290-7371

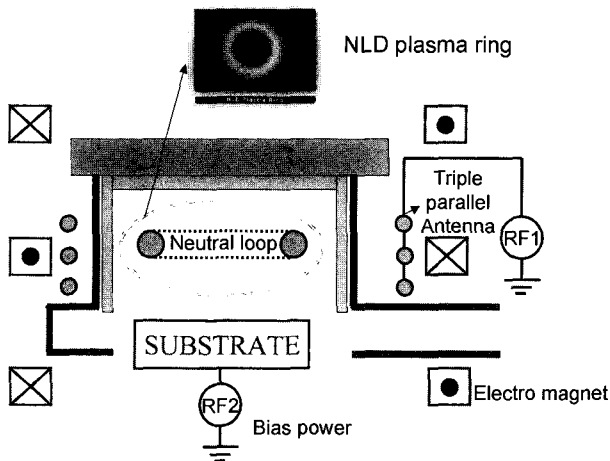


Fig. 1. Schematic diagram of NLD etching equipment.

Discharge(NLD) plasma로 C₃F₈/Ar 가스 유량비와 bias power의 공정변수에 따른 식각속도, 식각된 단면 및 표면 거칠기의 변화에 관하여 연구하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 장비의 개략도를 나타내었다. 진공 챔버로 이용된 석영관은 300 mm의 직경을 가지며 세 개의 전자기 코일들은 동축으로 놓여있다. 중성자 루프와 기관 전극간의 거리는 120 mm이다. 기관 전극은 13.56 MHz RF power로 되어 있으며, 중앙 coil의 power를 조정하여 중성자루프의 크기 조절이 가능하며 이를 통해 식각 패턴의 균일성을 얻을 수 있는 장점이 있으며, 저온 전자를 갖는 고밀도 플라즈마를 생성하여 낮은 압력 하에서 식각 공정이 진행됨으로써 평탄한 식각면과 빠른 식각 속도를 얻을 수 있다는 특징을 갖는다.

사용된 LiNbO₃ wafer는 CASTECH사의 양면이 연마된 3 inch 크기의 Z-cut LiNbO₃ wafer를 사용하였고, wafer를 세척 후 LiNbO₃ wafer 위에 Ni-Cr 및 Au 막을 E-beam evaporator를 이용하여 각각 25, 50 nm 두께로 증착하였으며 Ni-Cr 막은 LiNbO₃와 Au의 adhesion 막으로, Au는 LiNbO₃ 식각을 위한 Ni 마스크 제작의 seed 막으로 각각 사용하였다. LiNbO₃ 기관에 전극이 위치하는 도파로 주위만을 식각하기 위해 도파로의 폭은 8 μm, 식각 폭은 15 μm으로 패턴을 형성하기 위해 증착된 막 위에 positive PR를 약 1.5 μm 두께로 얇게 도포한 후 95°C의 oven에서 30분 동안 soft baking을 실시하였다. Quartz mask를 이용하여 자외선 하에서 17 mW의 4 sec 동안 노출시킨 후 전기도금을 이용하여 1.2 μm 두께의 Ni를 도금하였으며, 도금 외의 부분인 Au 및 Ni-Cr layer는 chemical etchant를 이용하여 각각 제거하여 패턴을 형성하였고, 실험 공정에 사용된 세부조건은 Table 1에 명시하였다.

Table 1. The Etching Parameters Used for the Etching of Z-Cut LiNbO₃

Parameters	Range
Etch time	20 min
Bias power	100~600 W
Antenna power	600 W
Operational pressure	2.5 × 10 ⁻³ Torr
Total gas amount	100 sccm
[C ₃ F ₈ /(Ar+C ₃ F ₈)] gas flow ratio	0.1~0.5
Circulation temperature	-20°C
He pressure	17 Torr

식각 후 식각속도와 식각된 단면은 Scanning Electron Microscopy(SEM, Phillips XL-30 FEG/ESEM)로 비교, 분석하였으며, 표면조도는 Atomic Force Microscopy(AFM, THERO-MICROSCOPE)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

LiNbO₃ 식각 공정변수를 antenna power 600 W, bias power 300 W와 총 가스 유량을 100 sccm 및 반응실 압력 2.5 × 10⁻³ Torr로 고정하고 C₃F₈ 가스 유량비를 0.1 - 0.5로 조절하여 20분간 식각하였다.

Fig. 2는 [C₃F₈]/[Ar+C₃F₈] 가스 유량비를 0.1 - 0.5로 변화시켜 측정한 식각속도와 식각 단면의 변화를 관찰한 결과를 나타내었다. C₃F₈ 가스 유량이 증가함에 따라 식각 속도는 유량비 0.2까지 140.5 nm/min에서 184.0 nm/min으로 급격히 증가하다가 0.3에서 152.5 nm/min으로 감소하는 경향을 나타내었다. 가스 유량비 0.2에서 최대 식각 속도를 얻은 이유는 LiNbO₃의 구성요소와 F 원자의 결합에 의한 화학적 식각과 Ar 이온에 의한 물리적 식각의 상호보완적 작용 때문인 것으로 판단된다. C₃F₈ 가스 유량비

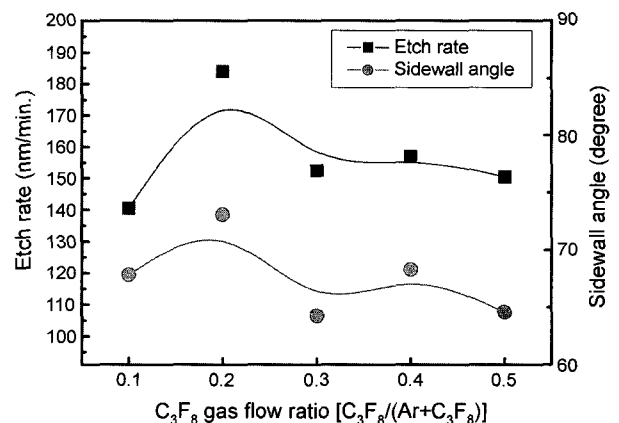


Fig. 2. LiNbO₃ etch rate and sidewall angle as functions of C₃F₈ gas flow ratio to Ar.

를 0.2까지 증가시켰을 때 LiNbO_3 의 식각속도는 증가하지만 C_3F_8 가스 유량비를 0.2 이상 더욱 증가시켰을 때 LiNbO_3 식각속도는 더욱 감소하였다. Olthoff 등은 CF 계열 가스 플라즈마 내에 CF_x^+ (i.e. CF_2^+ , CF^+)들이 존재하지만 이온의 유량이 Ar 가스만의 플라즈마와 비교하여 약 4배 정도 낮게 나타나고 있다고 보고하였다. 그러므로 LiNbO_3 의 식각 속도가 감소한 이유는 LiNbO_3 박막의 표면에 도달하는 이온의 유량의 감소에 의한 영향 또는 CF_x^+ 이온들은 LiNbO_3 의 표면과 반응하여 polymer 층을 형성하기 쉽기 때문이라 판단된다. 또한 $[\text{C}_3\text{F}_8]/[\text{Ar}+\text{C}_3\text{F}_8]$ 가스 유량비가 증가함에 따라 식각된 단면의 각도는 유량비 0.2까지 67.8° 에서 73.1° 로 급격히 증가하다가 0.3에서 64.3° 로 감소하는 경향을 보였다. 가스 유량비가 변화됨에 따라, 식각된 단면 각도 역시 영향을 받았는데, 이는 화학적 반응이 증가할 때 물리적 식각이 우선 되어질 때보다는 식각된 단면 각도가 급격히 개선되어지는 것으로 보였으나, 화학적 식각 반응이 증가하면 다시 식각된 단면 각도가 저하되었는데, 이런 현상은 이온의 유량의 감소에 의한 영향 또는 CF_x^+ 이온들은 LiNbO_3 의 표면과 반응하여 polymer 층을 형성하기 쉬워져 식각 단면 각도에 영향을 미쳐 저하된 것으로 판단된다. 따라서 $[\text{C}_3\text{F}_8]/[\text{Ar}+\text{C}_3\text{F}_8]$ 유량비가 0.2일 때 가장 최적의 조건임을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 $[\text{C}_3\text{F}_8]/[\text{Ar}+\text{C}_3\text{F}_8]$ 가스 유량비 0.2와 0.5일 때

의 식각된 단면과 도파로 형상 및 식각벽과 표면을 SEM을 통해 관찰하였다. 식각단면의 넓이는 가스 유량비 0.2와 0.5 두 경우 모두 식각된 윗면에서 $11\mu\text{m}$ 에서 $13.9\mu\text{m}$ 로 증가되는 것을 발견할 수 있었으며, 식각된 도파로의 형상은 깨끗하였다. 또한 C_3F_8 유량비가 0.2로 식각된 식각벽과 식각면은 평탄하였으나 C_3F_8 유량비가 0.5에서 식각된 식각벽과 식각면은 0.2 보다 더 거칠고, 반응물이 많이 쌓여 있는 것을 볼 수 있었다. 이런 반응물 발생 원인으로서는 Li는 F 이온들과 우선적으로 결합을 하며 이런 LiF 반응물들이 식각된 표면과 식각된 벽에 많이 축적된다.^{2,9)} 이는 식각 속도의 감소와 광도파시 광손실에 상당한 영향을 미칠 것으로 사료되며 이를 해결하기 위한 연구가 진행되어져야 할 것으로 생각된다.

Fig. 4는 C_3F_8 가스 유량 증가 변화에 따른 식각된 표면의 표면조도를 나타내었다. C_3F_8 유량이 증가함에 따라 표면조도는 31.0nm 에서 20.6nm 로 계속 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 물리적 식각 반응의 Ar 이온 스퍼터링의 감소에 의한 식각속도 감소에 따른 영향과 화학적 식각 반응생성물 활성화에 의하여 F 이온들이 LiNbO_3 의 표면과 더 많은 반응하여 polymer 층을 형성하여 반응물들이 식각속도를 감소시켜 표면거칠기에 영향을 미치는 것으로 생각된다.⁸⁾

Fig. 5는 LiNbO_3 식각 공정변수를 antenna power 600 W,

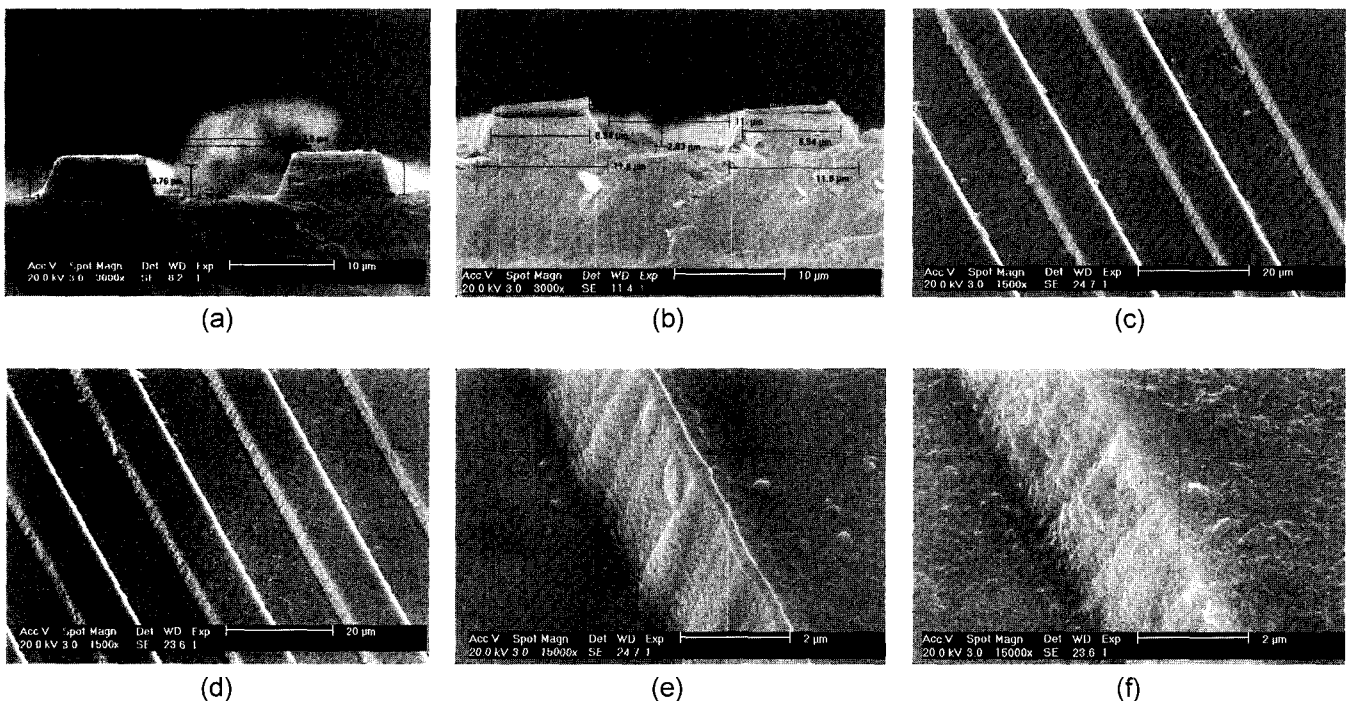


Fig. 3. SEM micrographs of etched LiNbO_3 waveguides for various C_3F_8 gas flow ratio.

(a) Etch profile of LiNbO_3 at 0.2 C_3F_8 (Cross-sectional view), (b) Etch profile of LiNbO_3 at 0.5 C_3F_8 (Cross-sectional view), (c) Etched LiNbO_3 waveguide at 0.2 C_3F_8 (Side view), (d) Etched LiNbO_3 waveguide at 0.5 C_3F_8 (Side view), (e) Sidewall roughness at 0.2 the C_3F_8 , and (f) Sidewall roughness at 0.5 the C_3F_8 .

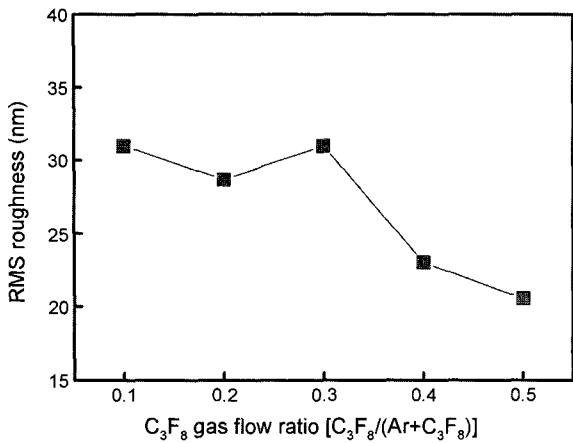


Fig. 4. RMS roughness of etched LiNbO₃ as a function of C₃F₈ gas flow ratio to Ar.

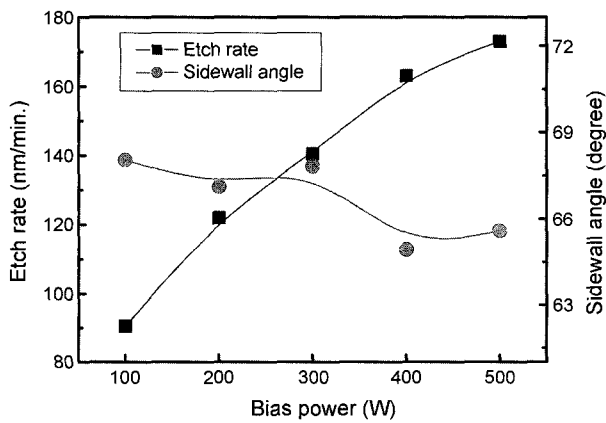


Fig. 5. LiNbO₃ etch rate and profile as function of bias power.

[C₃F₈]/[Ar+C₃F₈] 가스 유량비 0.2 및 반응실 압력 2.5 × 10⁻³ Torr로 고정하고 bias power를 100 - 500 W로 변화하여 20분간 식각 후 식각 속도와 식각단면의 변화를 나타내었다. Bias power가 증가함에 따라 식각속도는 90.5 nm/min에서 173.0 nm/min으로 매우 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 원인으로는 Ar 이온이 bias power 증가에 따라 점점 더 많은 방향성을 가지고 기관과의 충돌을 더 많이 일으켜 식각속도가 크게 향상 되어진다고 판단된다. 또한 bias power가 증가함에 따라 식각단면 각도는 68.0°에서 65.59°로 약간 감소하는 경향을 보였으며 bias power의 증가는 Ar 이온의 sputtering 효과에는 영향을 주어 식각속도 향상에는 영향을 주지만 F 이온들에 의한 polymer 형성 또한 활성화 시켜 식각단면 각도의 개선에는 오히려 저해하는 것으로 추측된다.

Fig. 6은 LiNbO₃ 식각 공정변수를 antenna power 600 W, [C₃F₈]/[Ar+C₃F₈] 가스 유량 유량비를 0.2 및 반응실 압력 2.5 × 10⁻³ Torr로 고정하고 bias power를 100 - 500 W로 변화하여 20분간 식각한 후 표면조도의 변화를 나타내었

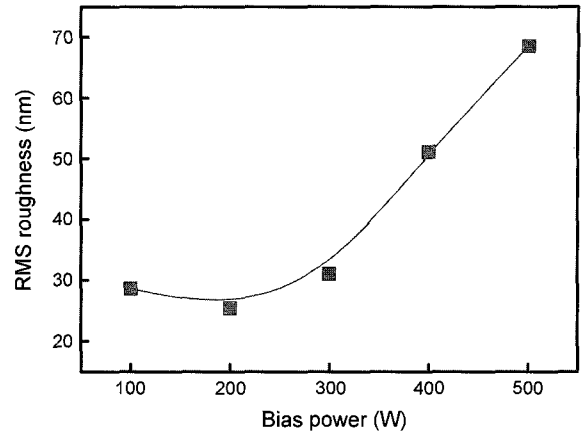


Fig. 6. RMS roughness of etched LiNbO₃ with bias power.

다. Bias power가 증가함에 따라 표면거칠기는 25.4 nm에서 68.5 nm으로 크게 증가 하였는데 이는 식각속도의 증가와 같은 원인으로 Ar 이온이 더 많은 방향성을 가지고 기관과의 많은 충돌을 일으킴에 따라 기관의 표면거칠기가 크게 증가하는 것으로 사료된다.¹⁰⁾

4. 결 론

본 연구는 [C₃F₈]/[Ar+C₃F₈] 가스 유량비 및 bias power를 공정 변수로 하여 LiNbO₃ 기관의 다양한 식각된 패턴 형상을 관찰하였다. [C₃F₈]/[Ar+C₃F₈] 가스 유량비가 증가함에 따라 식각속도는 0.2까지 140.5 nm/min에서 184.0 nm/min으로 급격히 증가하다가 0.3에서 152.5 nm/min으로 감소하는 경향을 나타내었으며, C₃F₈ 가스 유량비가 증가함에 따라 식각된 단면은 0.2까지 67.8°에서 73.1°로 급격히 증가하다가 0.3에서 64.3°로 감소하는 경향을 보였으며, C₃F₈ 유량비를 0.2 첨가하였을 때 가장 최적의 조건임을 확인 할 수 있었다. Bias power가 증가함에 따라 식각속도는 90.5 nm/min에서 173.0 nm/min으로 매우 급격하게 증가하는 경향을 나타내었으나, 식각된 단면은 68.0°에서 65.6°로 약간 감소하는 경향을 보였다. 또한 bias power가 증가함에 따라 RMS roughness는 25.4 nm에서 68.5 nm로 매우 표면조도가 매우 거칠어졌음을 확인 할 수 있었다.

REFERENCES

1. 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).
2. 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).
3. 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).
4. 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).
 5. K. Tajima, N. Kuwabara, F. Amemiya, and R. Kobayashi, "Sensitivity Improvement of Electric Field Sensor with LiNbO₃ Electro-Optic Crystals by Loading Inductance," *Trans. ICICE 76 B (II)*, 538-45 (1993).
 6. K. Nishikawa and S. Furuichi, *Techn. Digest 13 th Sensor Symp.* pp. 105-08 (1995).
 7. O. Mitomi, K. Noguchi, and H. Miyazawa, "Design of Ultra-Board-Band LiNbO₃ Optical Modulators with Ridge Structure," *IEEE Trans. Micro Wave Theory Tech.*, **43** 2203-07 (1995).
 8. J. K. Olthoff and Y. Wang, "Studies of Ion Bombardment in High Density Plasmas Containing CF₄," *J. Vac. Sci. Tech. A*, **17** 1552-57 (1999).
 9. M. Tamuma and S. Yoshikado, "Etching Characteristics of LiNbO₃ Crystal by Fluorine Gas Plasma Reactive Ion Etching," *Sci. and Tech. of Adv. Mater.*, **2** 563-69 (2001).
 10. W. J. Park, W. S. Yang, H. Y. Lee, and D. H. Yoon, "Surface Morphology and Characteristics of LiNbO₃ Single Crystal by Helicon Wave Plasma Etching," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** 886-90 (2003).