

Y-cut LiNbO₃ 양자확산 광도파로를 이용한

전기광학 차단형 광변조기

손 영 성*, 이 형 재, 신 상 영

한국과학기술원 전기 및 전자공학과

Electro-Optic Cutoff Modulator on Y-cut LiNbO₃

Proton-Diffused Channel Waveguides

Yung-Sung Son, Hyung-Jae Lee, and Sang-Yung Shin

Department of Electrical Engineering, K A I S T

ABSTRACT

The proton conserving effect of proton diffusion with self-aligned SiO₂-cladding is investigated by infrared transmission spectra. Based on the proton conserving effect, proton-diffused channel waveguides with self-aligned SiO₂-cladding are fabricated without surface damage on Y-cut LiNbO₃ substrates. And an electro-optic cutoff modulator with self-aligned electrode that utilizes a single-mode proton-diffused channel waveguide in a Y-cut X-propagating LiNbO₃ substrate is fabricated. Over 20 dB extinction has been achieved with applied voltage of 15 V.

LiNbO₃ 기판을 안식향산 용액속에서 양자교환(proton exchange)시키 광도파로를 제작하는 방법은 티타늄 내부화산방식에 비해 다양한 특성을 지니고 있어서 상당한 관심을 끌고 있다. 그러나 순수한 안식향산 용액으로 제작된 광도파로는 산란(scattering)에 의한 도파손실과 광섬유와의 모드 불일치로 인한 큰 결합손실을 나타낸다. 그리고 전기광학계수의 감소로 인해 전기광학소자로서의 사용에 제한요소가 된다. 이러한 결점들을 극복할 수 있는 방법으로 양자교환 후 보다 높은 온도에서 다시 열을 가하는 annealed proton exchange(APE)가 발표되었다 [1]. APE 방법으로

제작된 광도파로는 작은 도파손실을 지니며 전기광학효과와 감소가 크게 줄어 심지어는 APE 방법이 기존의 티타늄 내부화산방식보다 더 우수하다고 까지 주장하였다. 하지만 양자교환방식은 X와 Z-cut LiNbO₃ 기판에는 유용하나 Y-cut 기판에 대해서는 기판 표면에 심한 손상(surface damage)을 주고 도파특성이 크게 저하되는 단점을 지닌다 [2 - 4]. 표면탄성파(surface acoustic wave)를 이용하는 음향광학(acousto-optic) 소자에는 주로 Y-cut 기판을 사용하므로 심각한 결점이 된다 [5]. Y-cut 기판에서 표면손상을 억제하는 방법으로 미리 티타늄을 내부화산시킨 기판에 양자교환을 시키는

Ti indiffused proton exchange(TIPE)와 안식향산 용액속에 리튬이온을 섞어 화학적으로 완충용액을 만들어 양자교환 반응을 완화시키는 dilute melt proton exchange(DMPE) 등이 있다 [5 - 6]. 그러나 이러한 시도는 단일모드 채널 광도파로를 제작하기에는 적합하지 못하다. 현재까지 Y-cut LiNbO₃ 기판에 대해 양자교환 채널 광도파로와 전기광학효과에 대해 발표된 결과는 전기광학 소극(depolarization) 스위치 이외에는 없다 [7].

양자교환은 LiNbO₃ 단결정 기판과 안식향산 용액(150 - 300° C) 사이에서 일어나는 화학 반응이 주를 이룬다. 양자교환이 이루어지는 동안 수소는 수산기(OH⁻) 이온 형태로 LiNbO₃ 결정 내부에 존재하게 된다. 양자교환

반응의 정도는 반응의 시간과 온도에 따라 결정되어지며 광도파로를 형성시키기 위해서는 단지 부분적인 양자교환만이 필요하다 [8]. 그러나 소극에 의한 스위치는 TE_{11} 모드에서 동작한 다중모드 채널 광도파로 소자이다. 순수 안식향산 용액에서 Y-cut $LiNbO_3$ 기판을 양자교환하여 생기는 표면손상의 구조(mechanism)를 살펴보면, 깊이에 따른 격자(lattice)의 압력(strain)이 양자교환 과정에서 아주 짧은 시간안에 급격히 증가한다 [3]. 양자교환 시간이 증가하면 양자교환 층이 두꺼워지면서 기관과의 경계면이 뚜렷해져서 압력을 완화시키기 위한 격자의 결함(defect)이 생겨난다. 표면손상이 일어나는 임계깊이는 대략 200 nm 정도로 보고되었다 [3]. 따라서 표면에서의 양자교환 반응을 완화시켜 양자교환율을 낮추면 원하지 않는 손상을 억제할 수 있다. 광도파로를 형성하기 위한 양자교환율을 자기정렬된(self-aligned) SiO_2 클래딩을 이용한 양자확산방법으로 낮출 수 있음이 제안되었다 [9].

본 논문에서는 양자확산 과정에서 SiO_2 클래딩에 의한 양자보존효과를 알아보기 위해 Z-cut $LiNbO_3$ 기판을 적외선 투과 스펙트럼 분석하였다. 그 결과를 바탕으로 Y-cut 기관에 순수한 안식향산 용액속에서 양자교환 후 양자확산시켜 표면손상이 없는 채널 광도파로를 제작하였다. 그리고 양자확산 채널 광도파로를 이용하여 차단형 광변조기를 자기정렬된 전극구조로 제작하여 전기광학 변조특성을 측정하였다.

$LiNbO_3$ 단결정 내부에 수산기(OH^-) 이온 형태로 존재하는 양자의 특성은 적외선 투과 스펙트럼분석으로 관측할 수 있다 [8, 10]. 수산기 이온은 $LiNbO_3$ 단결정 내부에도 불순물로 항상 존재한다. 순수한 $LiNbO_3$ 단결정 내에서의 OH^- 흡수 파장은 $3491cm^{-1}$ 와 $3478cm^{-1}$ 부근이며 실제로는 중첩되어 $3485cm^{-1}$ 부근에서 peak가 하나로 나타난다. 양자교환된 $Li_{1-x}H_xNbO_3$ 형태의 기관에서는 $3510cm^{-1}$ 부근에서 peak가 생겨 x

값이 증가함에 따라 OH band의 폭과 깊이가 증가한다. 따라서 실제로는 순수한 기관에서의 $3480cm^{-1}$ peak와 중첩되어 양자교환된 정도에 따라 $3510cm^{-1}$ 와의 사이에서 peak값을 갖는다. 그러므로 peak값이 $3510cm^{-1}$ 근처로 접근할수록 양자교환 정도가 심한 것을 알 수 있으며 x 값이 커질수록 OH band의 폭이 넓어진다.

SiO_2 클래딩에 의한 양자보존효과를 확인하고자 Z-cut $LiNbO_3$ 기관에 여러가지 조건으로 양자교환 및 확산을 한 후 적외선 투과 스펙트럼분석을 하였다 [11]. 측정결과를 표 1에 정리하였으며 이중에서 대표적인 하나를 그림 1에 나타내었다. 실제로 양자교환된 정도를 알기 위해서는 OH band의 면적을 사용하여야 하며 순수한 단결정에서의 면적은 제외하여야 한다. 또한 양자교환은 기관 앞뒤에서 모두 일어나지만 SiO_2 클래딩에 의한 효과는 한면에서만 일어나므로 이를 고려하여 측정값으로부터 수정한 값을 표 1에 나타내었다. 그러므로 측정결과인 그림 1과 표 1에서 동일조건외 값이 다르다. 따라서 실제 분석은 표 1을 사용하여야 한다. 그림 1의 (A)를 보면 OH band의 폭이 넓고 $3500cm^{-1}$ 부근 쪽 모서리의 경사가 완만하게 나타나서 표면근처에서 심하게 양자교환이 이루어졌음을 알 수 있다. 그림 1의 (B)를 보면 완만하던 모서리의 경사가 회복되어 좌우대칭의 형태로 바뀌어 표면에서 심하게 물려있던 OH^- 이온이 일부는 외부로 확산되고 나머지 일부는 내부로 깊숙히 확산되어 결정의 특성이 회복되었음을 나타낸다. 또한 SiO_2 클래딩에 의한 양자보존효과를 뚜렷이 알 수 있다. 표 1에서 보면 양자교환시간이 길고 양자교환온도가 높을수록 OH band의 peak가 $3500cm^{-1}$ 부근에서 나타남을 알 수 있고 양자확산을 시키면 $3480cm^{-1}$ 쪽으로 옮겨감을 알 수 있다. 또한 모든 경우에서 SiO_2 클래딩에 의한 양자보존효과를 나타내므로 일관된 특성임을 알 수 있다.

SiO_2 클래딩에 의한 양자보존효과를 바탕으로 Y-cut $LiNbO_3$ 기관에 순수한 안식향산 용액을 이용하여

표면손상이 없는 양자확산 광도파로 제작을 시도하였다.

양자확산방식으로 Y-cut LiNbO_3 기판에 자기정렬된 SiO_2 클래딩을 지닌 채널 광도파로를 제작하였다 [9, 11]. 몇가지 조건으로 채널 광도파로를 제작하여 633 nm 파장에서 near-field pattern을 관측한 결과 채널폭이 4 μm 이고 양자교환 2 시간 후 양자확산 30 분의 경우 모드가 가장 밝게 나타났다. 실제로 평면 광도파로의 경우는 150°C 에서 약 1 시간의 양자교환으로 표면손상이 일어났으나 채널 광도파로의 경우에는 4 시간이 지나서 표면손상이 일어났다. 따라서 2 시간의 양자교환으로 광도파로를 형성시킬 수 있으므로 안정된 결과를 얻을 수 있다. 이를 토대로 양자교환에 사용한 금속마스크를 자기정렬된 평행전극으로 사용하여 전기광학소자의 가장 간단한 구조인 차단형 광변조기를 제작하여 전기광학특성을 측정하였다. 제작한 차단형 광변조기의 개략도를 그림 2에 나타내었다. 채널 폭이 3 μm 인 차단형 광변조기의 전기광학 변조특성을 파장 633 nm에서 측정하여 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보면 전압에 따라 광출력이 거의 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. -5 V 에서 +10 V까지의 전압으로 소멸비가 20 dB(99 % 변조) 이상을 얻었다. 이 값은 X-cut LiNbO_3 기판을 이용하여 얻은 결과에 비금가는 것으로 Y-cut LiNbO_3 기판의 전기광학효과가 저하되지 않았음을 알 수 있다 [12]. 또한 전극이 자기정렬된 형태이므로 구조적으로 전기광학효율이 높으며 공정에 신뢰도가 높다.

결론으로, 적외선 투과 스펙트럼분석으로 양자확산 과정에서 SiO_2 클래딩에 의한 양자보존효과를 확인하였다. 그 결과를 바탕으로 Y-cut LiNbO_3 기판에 표면손상이 없는 채널 광도파로를 제작하였다. 또한 이를 이용하여 차단형 광변조기를 제작하고 광변조특성을 측정하여 전기광학효과가 저하되지 않았음을 확인하였다.

References

- [1] P. G. Suchoski, T. K. Findakly, and F. J. Leonberger, "Stable low-loss proton-exchanged LiNbO_3 waveguide devices with no electro-optic degradation," *Opt. Lett.*, **13**, pp. 1050 - 1052, 1988.
- [2] M. Goodwin and C. Stewart, "Proton - exchanged optical waveguides in Y-cut lithium niobate," *Electron. Lett.*, **19**, pp. 223 - 224, 1983.
- [3] A. Campari, C. Ferrari, G. Mazzi, C. Summonte, S. M. Alshukri, A. Dawar, R. M. De La Rue, and A. C. G. Nutt, "Strain and surface damage induced by proton-exchange in Y-cut LiNbO_3 ," *J. Appl. Phys.*, **58**, pp. 4521 - 4524, 1985.
- [4] C. Canali, A. Canera, G. DellaMea, P. Mazzoldi, S. M. Alshukri, A. C. G. Nutt, and R. M. De La Rue, "Structural characterization of proton exchanged LiNbO_3 optical waveguides," *J. Appl. Phys.*, **59**, pp. 2643 - 2649, 1986.
- [5] A. L. Dawar and J. C. Joshi, "Fabrication of optical waveguides in Y-lithium niobate from dilute melts proton exchange technique," *Opt. Commun.*, **73**, pp. 199 - 202, 1989.
- [6] K. K. Wong, "Proton exchange in undoped lithium niobate (dilute melt)," in *Properties of Lithium Niobate*, pp. 239 - 242, INSPEC, London, 1989.
- [7] R. T. Chen, "Electro - optic depolarization switch on y-cut LiNbO_3 proton - exchanged channel waveguides *Appl. Phys. Lett.*, **54**, pp. 2628 - 2630, 1989.
- [8] A. Loni, G. Hay, R. M. De La Rue, and J. M. Winfield, "Proton-exchanged LiNbO_3 waveguides : The effects of post-exchange annealing and buffered melts as determined by infrared spectroscopy, optical waveguide measurements, and hydrogen isotopic exchange reactions," *J. Lightwave Technol.*, **7**, pp. 911 - 919, 1989.

- [9] Yung-Sung Son, Jong-Sung Kim, and Sang-Yung Shin, "Fabrication of proton - diffused LiNbO_3 waveguides with self-aligned SiO_2 - cladding," in *Tech. Dig. 7th Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Communication*, Kobe, Japan, July 18 - 21, 1989, Paper 19D3-2.
- [10] L. Kovacs and I. Foldvari, "IR spectra of hydroxyl ions in lithium niobate," in *Properties of Lithium Niobate*, pp. 189 - 199, INSPEC, London, 1989.
- [11] 손영성, 이형재, 신상영, "자기정렬된 SiO_2 클래딩 구조를 갖는 양자 확산 LiNbO_3 광도파로의 특성," 대한전기학회 하계 종합학술대회 논문집, pp. 655 - 658, 1989. 7. 21.
- [12] 김중성, 손영성, 이형재, 신상영, "양자 확산 LiNbO_3 채널 광도파로를 이용한 차단형 광변조기," 대한전기학회 추계 종합학술대회 논문집, pp. 502 - 504, 1989. 11. 25.

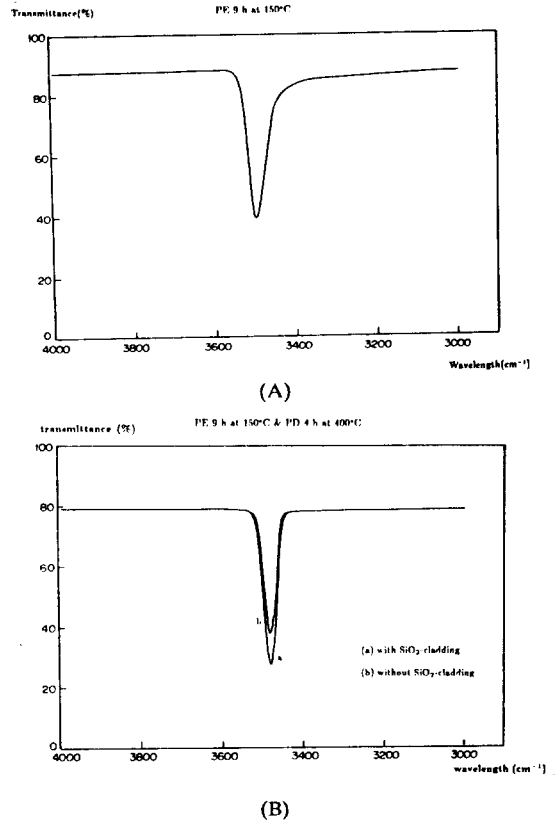


그림 1. Z-cut LiNbO_3 기판의 적외선 투과 스펙트럼
 (A) 150°C에서 양자 확산 9 시간
 (B) 양자 확산 후 400°C에서 양자 확산 4 시간
 이 중에서 a는 SiO_2 클래딩이 있는 경우이고
 b는 없는 경우임

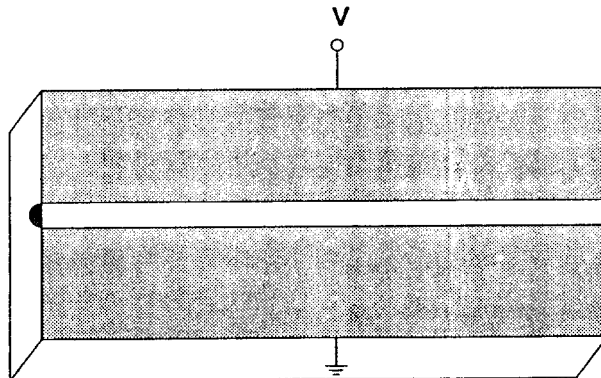


그림 2. 제작한 차단형 광변조기의 개략도

표 1. Z-cut LiNbO₃ 기판의 양자교환 및 확산시간에 따른 적외선 투과 스펙트럼

Sample	Absorption (%)	Absorption area(a.u.)	Peak wavelength (cm ⁻¹)
PE(1 h, 150°C)	11.0	17.5	3496
PD(15 min, 400°C)	9.5	6.5	3480
with cladding	15.5	17.5	3482
PD(60 min, 400°C)	7.0	5.0	3479
with cladding	14.0	10.0	3479
PE(9 h, 150°C)	20.5	38.5	3498
PD(60 min, 400°C)	26.5	29.5	3484
with cladding	28.5	29.5	3484
PD(4 h, 400°C)	17.0	14.5	3479
with cladding	27.0	31.5	3482
PE(1 h, 250°C)	37.5	71.5	3501
PD(60 min, 400°C)	37.0	65.5	3498
with cladding	44.0	81.5	3497
PD(4 h, 400°C)	33.5	58.5	3491
with cladding	30.5	57.5	3492

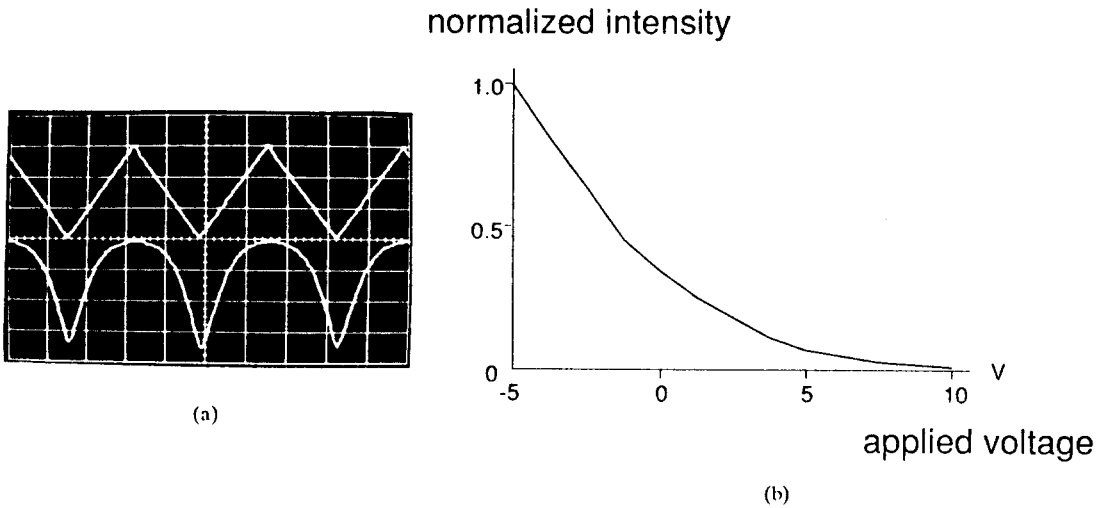


그림 3. 채널 폭 3 μm인 차단형 광변조기의 전기광학 변조특성

(a) 삼각파 전압에 대한 광출력

(b) 전압에 따른 광출력 특성