

# 자기정렬 방식을 이용한 X-cut LiNbO<sub>3</sub> 광 변조기 제작과 특성

## ( Fabrication and characterization of X-cut LiNbO<sub>3</sub> optical modulator using self-aligned method )

강기성\*      채기병      소대화

명지대학교 전자공학과

Ki Sung Kang, Kee Byung Chae, Dae Wha Soh,

Dep. of Electronics Eng. Myongji Univ.

### Abstract

An electro-optical single modulator is fabricated in X-cut LiNbO<sub>3</sub> by the annealed proton exchange and self-aligned method. First, the effect of annealing is characterized by examining single optical modulator. It is found that by controlling the annealing time, the single optical modulator can be made widely variable. The on-off state of modulator is performed by annealing process and self-aligned electrodes are used in fabricating the single modulator. The optical single modulator has very good figures of merits : the measured on-off switching voltage of about 2.7 V .

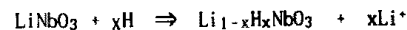
### 제 I 장. 서 론

반도체 레이저의 발명과 광 전자 공학의 발전에 따라 신호의 전송 및 처리에 전기나 전파 대신 레이저 광을 이용하고자 하는 연구가 시작되었으며, 1970년대에 눈부신 발전을 이룩한 다이오드 레이저와 광섬유를 이용한 광통신 관련 기술은 초고속 통신망에서 한계성을 나타내는 전자회로에 대체할 수 있는 광 소자의 개발에 박차를 가하고 있다. 고속 광 신호를 전달하기 위해서는 photo diode를 이용한 광신호의 전기적 신호로의 변환, 그리고 laser diode를 이용한 광 신호의 재현의 단계를 거치는 방법과 광 스위치를 이용한 스위칭 방법이 있다. 이들 경우를 비교해보면 신호의 변환 과정이 필요없는 광 스위치를 이용한 직접적인 스위칭이 유리함을 알 수 있다.<sup>1)</sup> 집적 광학 소자를 만들기 위해서는 광파의 전계에 대한 영향을 나타내는 전기 광학 상수 (electro-optic coefficient)가 큰 물질이 유리하다. 따라서 uniaxial ferroelectric crystal인 리튬 나이오베이트(LiNbO<sub>3</sub>)는 이러한 조건을 만족시키며 도파 손실이 낮은 광 도파로를 만들기에 적합하다. LiNbO<sub>3</sub> 기판위에 단일 모드 광도파로를 만들고 전극을 통하여 전계를 인가하면 전기 광학 효과에 의해서 광도파로의 굴절율에 변화를 줄 수 있다.<sup>2)</sup> 광 변조기는 이러한 굴절율 변화를 이용하여 입력 광을 변조(modulation) 또는 스위칭시킬 수 있으며, 방향성 결합 (directional coupling) 현상을 이용한 광 스위치, intersecting waveguides형 (x-type) 광 스위치,<sup>3)</sup> 그리고 마하젠더 간섭계형 변조기 (mach-zehnder interferometric modulator)<sup>4)</sup> 등의 기본적인 몇가지 유형으로 분류 된다. 본 논문에서는 양자교환 (proton exchange) 방법에 의해 광 도파로가 형성되는 과정에서 어닐링 효과와 자기 정렬 전극 (self-aligned electrode) 을 이용한 X-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판위에 제작된 단일 광 변조기에 대하여 연구 하였다.

### 제 II 장. 실험 방법.

#### 2-1. 양자 교환.

LiNbO<sub>3</sub> 기판위의 굴절율을 증가시켜서 손실이 적은 광도파로를 만드는 방법으로는 그림 1)에서와 같이 타이타늄 내부 확산(titanium indiffusion)과 그림 2)에서 양자 교환 (proton exchange) 공정을 대표적으로 들 수 있다. 5) Titanium-indiffusion 공정은 광 도파로를 만들려는 부분에 Ti를 필름 형식으로 올린뒤에 고온에서 수시간 동안 표면 확산 시키면 깊이 방향으로 확산되어 들어간다. 따라서 굴절율이 증가되고 광 도파로가 형성하게 된다.<sup>6)</sup> 이때 Ti 두께와 폭, 내부 확산 시간과 온도, 그리고 확산시키는 방향에 따라 광 도파로의 굴절율 분포가 결정 된다. 양자교환 공정은 LiNbO<sub>3</sub> 기판위에 광 도파로를 만들려는 부분만 열려있도록 금속 마스크를 만들고, 다음 LiNbO<sub>3</sub> 기판을 산이나 수화물 속에 담겨서 가열하면 LiNbO<sub>3</sub>의 Li<sup>+</sup> 이온과 산이나 수화물에서 공급되는 H<sup>+</sup> 이온이 양자 교환을 일으키게 되고 반응이 일어난 표면의 굴절율이 증가 하게 된다. 양자 교환의 화학 반응식은 다음과 같다.



본 실험에서는 benzoic-acid 를 사용하였으며 양자교환을 위해 필요한 온도는 150°C에서 245°C이하 이다.

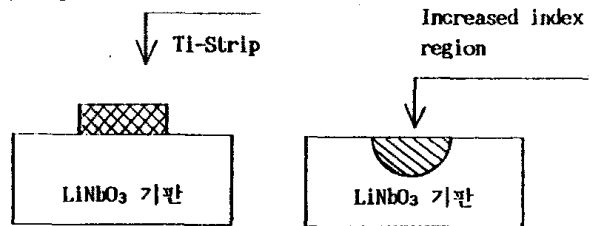


Fig. 1. Titanium-indiffusion method

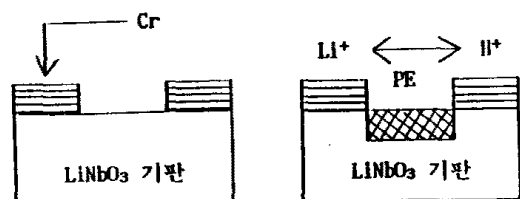


Fig. 2. Proton exchange

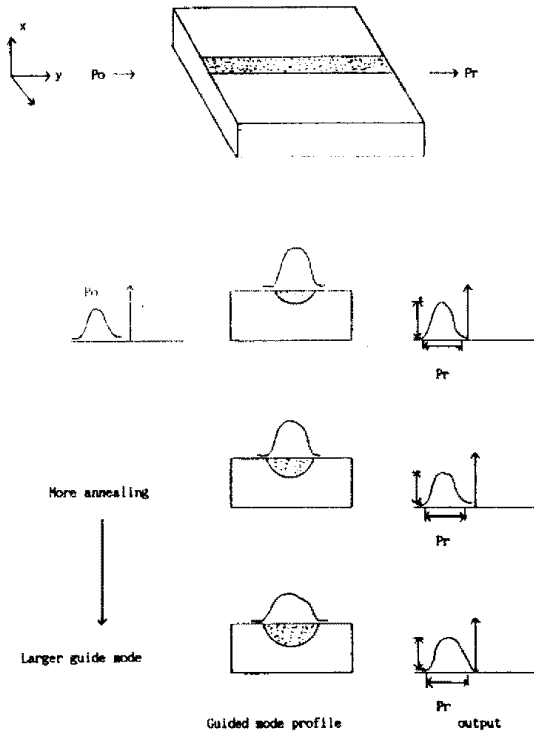


Fig. 5. Annealing effect of single optical modulator

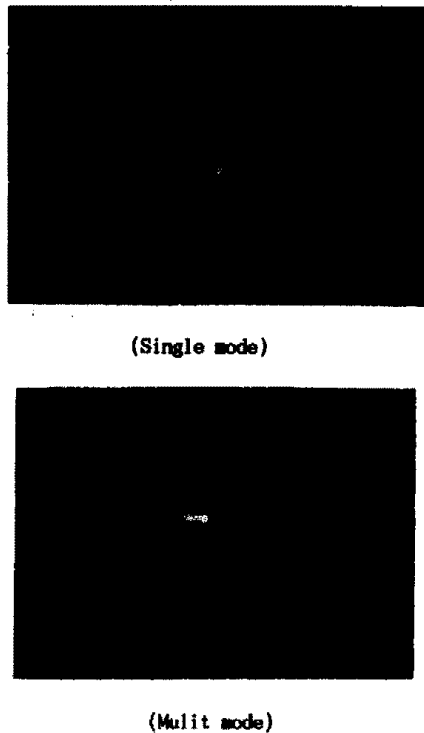


Fig. 6. Output patterns of single/multi mode by annealing time

### 3-2. 단일 광 도파로의 특성 측정.

Annealing에 의해 도파로가 넓어지면 도파 모드가 커지는 현상을 살펴 보기 위해 LiNbO<sub>3</sub> 시편위에 전극을 올리지 않은 상태에서 어닐링 시간 에 의해 도파 모드의 변화를 조사하였다. 7) 그림 6)은 광 도파로의 폭이 4 $\mu$ m 인 것으로 어닐링

처리시간에 따라서 도파 광의 출력이 변화하는 것을 나타낸 것이다. 제작된 LiNbO<sub>3</sub> 시편 중 3개를 선택하여 어닐링 시간을 30 - 260분으로 순차적으로 변화시켰을때의 단일 도파로에서의 Transferred Power ratio 를 측정 한 값을 표1)에 작성 하였고, 이 값을 5차 다항식으로 처리하여 곡선화 하였다. 그림6)에서 어닐링 을 수행함으로써 시간에따라서 출력이 증가하다 떨어지는것을 볼수 있다. 그림 7)은 각각 3개의 단일 광 도파로에 대해서 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 출력이 99 % 까지 증가 하다가 감소하는 현상을 볼수 있는데, 이것은 어닐링 처리시간에 의하여 양자 필드 변화에 따른 도파로 굴절율변화와 광 도파로 폭의 변화로 인한 위상 부정합 (phase mismatch)에 기인된 때문이다. 8)

Table. 1. The effect of annealing on data

annealing time	30	40	50	60	70	80	90	100
Pr(%)	0.5	0.7	1.2	1.5	1.7	2.0	3.5	7.5
annealing time	110	120	130	140	150	160	170	180
Pr(%)	8.9	9.5	10.2	11.5	12.8	15.0	17.0	17.8
annealing time	190	200	210	220	230	240	250	260
Pr(%)	20.5	25.5	30.7	39.2	50.2	45.2	43.8	40.4

시편 1

annealing time	30	40	50	60	70	80	90	100
Pr(%)	1.2	1.7	2.0	4.8	7.5	9.72	10.8	12.5
annealing time	110	120	130	140	150	160	170	180
Pr(%)	13.8	14.5	25.2	27.2	30.5	38.5	40.5	50.2
annealing time	190	200	210	220	230	240	250	260
Pr(%)	62.8	72.7	80.2	89.8	97.6	99.5	96.9	95.4

시편 2

annealing time	30	40	50	60	70	80	90	100
Pr(%)	0.7	0.9	1.0	1.9	1.4	5.0	7.4	11.0
annealing time	110	120	130	140	150	160	170	180
Pr(%)	18.7	22.7	40.2	53.1	62.8	72.3	84.0	93.0
annealing time	190	200	210	220	230	240	250	260
Pr(%)	97.6	99.5	98.7	93.1	80.6	70.0	30.0	28.4

시편 3

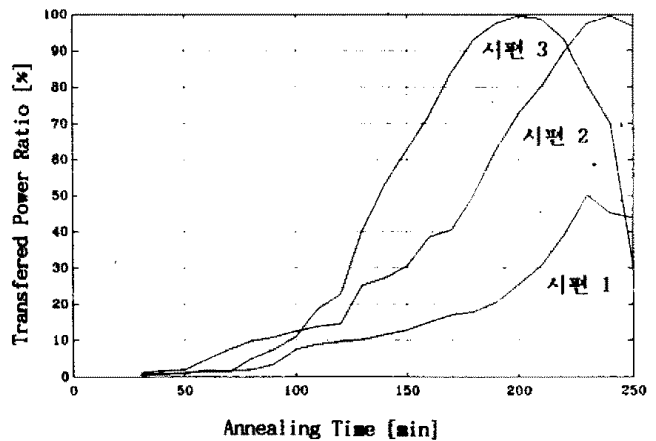


Fig. 7. The effect of annealing on transferred power

## 2.2 양자 교환 및 플라싱, 어닐링

양자교환에 필요한 Ampoule을 제작하기 위하여 내경이 10mm인 pyrex tube를 torch로 가공하여 LiNbO<sub>3</sub>시편과 벤젠산(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>COOH)을 넣어서 아래 그림3)과 같이 가공한다. Ampoule을 150°C 전기로속에 넣어서 수십분 정도 기다리면 아랫쪽의 벤젠산이 녹아서 액체 상태가 된다. 이때 Ampoule을 뒤집어서 40 - 60분 정도 넣어두면 기판표면에서 양자 교환이 일어난다. 그 다음 Ampoule을 식힌후 LiNbO<sub>3</sub> 시편을 꺼내어 입출력단의 단면을 사포(#1500)로 갈아낸후 약 0.3 μm 입자 굵기를 갖는 polishing pad에 갈아서 깨끗하게 만든다. 표면에 밀집 되어있는 양자(H<sup>+</sup>)들을 깊이 방향으로 확산하기 위하여 어닐링을 한후, 형성된 광 도파로의 굴절을 분포를 결정 하게 된다.

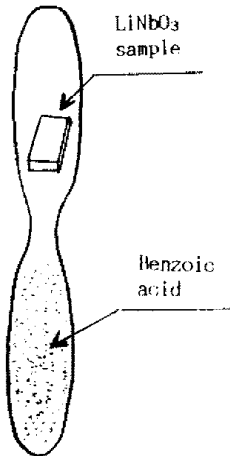


Fig. 3. Ampoule for proton exchange

### 2-3. 자기 정렬방식을 이용한 LiNbO<sub>3</sub> 기판의 Patterning

Diamond saw를 이용하여 시편을 10 x 6 mm 정도 되게 자른후 TCE, Acetone 및 Methanol에 순차적으로 담궈서 끓이고 표면을 면봉으로 닦아 내었다. 그리고 sputter를 이용하여 100Å 정도의 Cr을 코팅 한후 양자 교환이 이루어질 도파로를 형성 하기위하여 PR 작업을 거친후 레이저 리소그래피 방식으로 도파로부분의 PR을제거한후 Cr-7(Cr etchant)을 이용하여 광 도파로를 그림 4)와같이 patterning 하였다. 본 실험 에서 이용한 자기정렬방식은 기존의 방식과는 달리 도파로 형성을 위한 마스크 제작과정이 필요 없다. 양자교환을 하기위하여 이용된 Cr 패턴을 직접 전극으로 이용하므로 전극을 형성하기 위한 align 과정이 요구되지 않는다. 기존의 전극 형성과정의 단점은 도파로의 edge와 전극의 edge 부분이 정확히 align 되지않으므로 전계의효율이 아주적게 나타났다. 그러나 자기정렬 방식은 이러한 align 과정이 요구되지않으므로 전극으로 이용되는 Cr이 광도파로와 최대한 밀착되므로 전계의 효율을 높이는데 매우 적절한 방식이다. 본 실험에서는 전극의 도전성을 높이고자 자기 정렬 방식으로 제작되어진 전극에 Au로 코팅하기 위하여 Image Reverse 공정 방식을 선택하여 전극을 형성하였다. 전극에 Au로 옴리기 위한 Image Reverse공정 방식은 Back Illumination 방식으로 Cr위에 Au로 sputtering한후 Lift-off하여 전극을 형성 하였다.

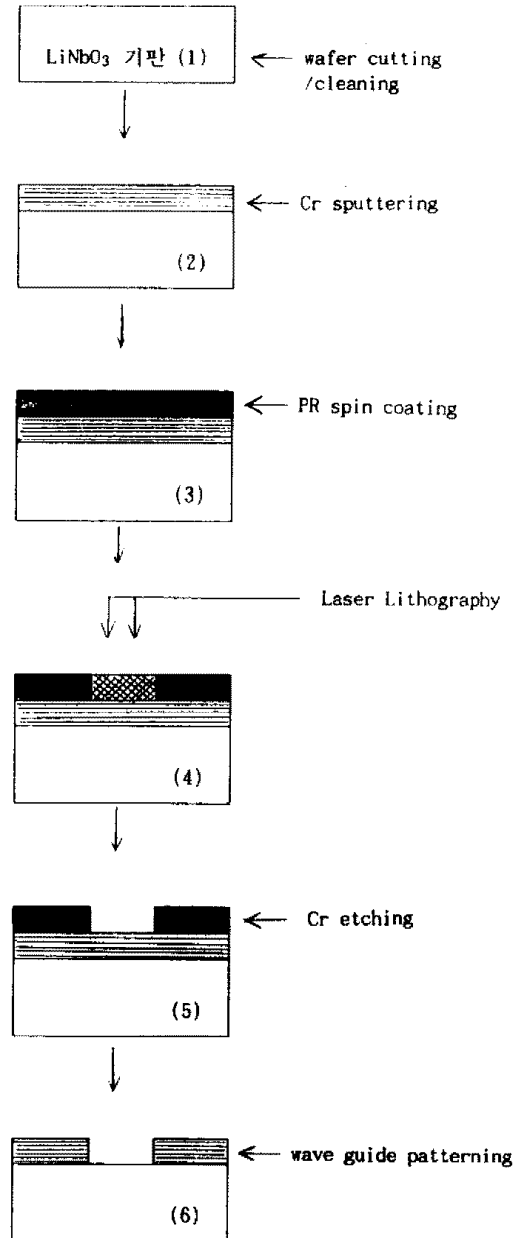


Fig. 4. Fabrication process of optical waveguide for proton exchange

## 제 3장 . 결과 및 고찰.

### 3-1. Annealing 의 효과.

광 도파로의 최종 적인 굴절을 분포는 공정의 마지막 단계인 열처리(annealing)를 이용하여 넓은 범위에서 조절 할수 있다. 어닐링처리를 수행함으로써 H<sup>+</sup>가 깊이 방향과 좌우로 확산되면, 이에 따라 광 도파로가 넓어지면서 도파로에 존재하는 모드도 또한 변하게된다. 이로인해 광 파워(transferred optical power)가 증가 하게 된다. 그림 5)는 단일 광 변조기에서의 어닐링 효과를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 단일 광 도파로를 제작 및 설계하기 위하여 simulation한 결과 도파로 폭이 4μm일때 on - off현상이 나타났다. 이러한 simulation 결과를 이용하여 단일 광 변조기를 제작한 결과 어닐링 시간에 따라 광 도파로가 조절됨으로 single mode와 multi mode가 나타난 것을 그림 6)에 표시 하였다.

1. L. McCaughan, "Low-loss Polarization-independent electrooptical switches at  $\lambda=1.3$  micron," *J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-2, pp. 51-52, 1984
2. A. L. Dawar, S. M. Al-shukri, and R. M. De La Rue, "Guided-wave acoustooptic interaction in proton-exchanged Y-cut LiNbO<sub>3</sub>," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 48, pp. 1579-1581, 1986
3. Lar Thylem, "Integrated optics in LiNbO<sub>3</sub>: Recent developments in devices for telecommunications" *J. Lightwave Technol.*, Vol. 6, pp. 847-861, 1988.
4. V. Ramaswamy, M. D. Divino, and R. D. Standly, "Balanced bridge modulator switch using Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> strip waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 32, pp. 664-646, 1978.
5. R. V. Schmidt and I. P. Kaminow, "Metal diffused optical waveguide in LiNbO<sub>3</sub>," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 25, pp. 458-460, 1974
6. Neyer, W. Mevemkamp, L. Thylem, and B. Lagerstram, "A beam propagation method analysis of active and passive waveguide crossing," *J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-3, pp. 635-642, 1985
7. 강기성, 박정철, 장용용 소대화: "X-스위치 광도파로의 이론적 해석", *한국통신학회 학술 발표회 논문집* Vol. 10, No. 2 pp. 296-302, 1991
8. 소대화, 강기성, 채기병, 장용용: "X-스위치 광변조기의 설계 및 분석", *전기전자재료학회 논문지*, Vol. 4권3호, pp 249-258, 1991

일반적으로 광 변조기의 전극은 광 도파로를 완전히 제작한 후에 전계의 효율을 고려하여 적당한 위치에 정렬하여 만들게 된다. 이 경우 수  $\mu\text{m}$ 의 폭과 수  $\text{mm}$ 의 길이를 갖는 전극을 정확한 위치에 만들기가 매우 어려우며, 이러한 현상에 의해 전계의 효율도 감소한다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 실험에서는 반복되어지는 마스크 정렬 작업을 하지 않고 양자 교환을 하기 위하여 사용한 Cr을 자기 정렬전극으로 이용하였으며 image reversal 공정을 통하여 Cr 위에 Au를 증착하여 전극을 형성하였다. 자기 정렬 방식으로 제작된 전극은 광 도파로와 최대한으로 밀착되므로 전계의 효율 면에서도 상당히 높게 나타나게 된다. 자기 정렬 방식으로 전극을 형성하여 방향성 결합기나, 마하젠더 간섭계형 변조기, X-switch형 변조기에 적용하면 crosstalk을 줄이는 방법으로 매우 큰 효과가 있을 것으로 기대된다.

그림 8)은 단일 광 변조기의 출력 모드를 투명막(screen)에 비춰서 찍은 사진이다. 어닐링 시간에 의해서 광 도파로의 폭이 변함으로써 출력 광의 형태가 단일 모드에서 멀티 모드로 변하는 것을 알 수 있다. 어닐링에 의한 도파로 폭 조절은 정확한 온도와 시간을 제어하는 것으로 이루어질 수 있는데 전기로내에서의 온도와 시간 조절은 비교적 잘 되지만, 시편을 넣고 꺼내는 과정에서 온도의 변화 속도가 굴절률의 변화 및 폭에 미치는 영향에 대해서는 조사하기 어려웠다.

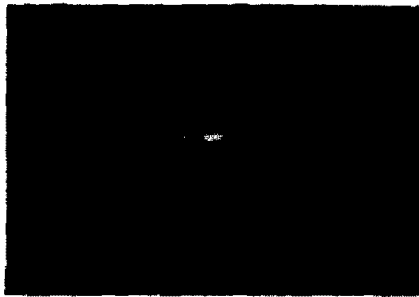


Fig. 8. Multi mode output patten of single optical modulator

#### 제 IV 장. 결 론

본 실험에서는 X-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판으로 자기 정렬 방식을 적용하여 양자 교환 공정을 이용한 단일 광 도파로를 제작하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 어닐링 시간에 의해 광 도파로폭이 점차적으로 증가하였고, 이에 따라 굴절률과 출력이 변화 하였으며, 단일 모드로부터 멀티 모드로 변화 되는 것을 확인 하였다.
- 2) 자기 정렬 방법을 제작공정에 적용함으로써 기존 방식에 비하여 마스크 공정을 줄일 수 있으므로 간단화된 공정방식을 채택 하였다.
- 3) 자기 정렬 방식으로 제작된 전극은 광 도파로와 최대한 밀착되므로 전극과 전계의 효율을 최적화 하였다. 따라서, LiNbO<sub>3</sub> 기판을 이용한 방향성 결합기, 마하젠더 간섭계형 변조기 및 X-Switch형 광 변조기 등의 제작에 응용함으로써 공정 과정과 전극의 정렬 과정을 더욱 효율적이며 간단하게 제작할 수 있을 것으로 기대 된다.