

## LiNbO<sub>3</sub>에 의한 1×2 방향성결합형 광 변조기 제작 및 특성 연구

강기성·소대화\*

상지전문대학 전자과

\*명지대학교 전자공학과

### A Study on Fabrication and Characterization of Directional Coupler 1×2 Optical Modulator Using LiNbO<sub>3</sub>

Ki Sung Kang and Dae Wha Soh\*

Dept. of Electronics, Sang Ji Col.

\*Dept. of Electronics, Myong Ji Univ.

**초 록** 1×2 방향성결합형 광 변조기를 LiNbO<sub>3</sub> 기판상에 양자교환에 의한 자기정렬 방식으로 제작하였다. 양자교환후 광 도파로의 안정을 위해 열처리를 하였다. 본 연구에서는 광 도파로를 제작한 후 열처리 시간에 의한 도파로의 굴절을 변화의 관계에 대하여 연구하였으며 전체효과가 우수한 자기정렬방식을 선택하였다. 제작된 1×2 방향성결합형 광 변조기는 변조전압 8.0V에서 크로스토크가 -29.5dB의 매우 우수한 특성을 나타내었다.

**Abstract** A guide-wave electro-optical modulated directional coupler 1×2 was fabricated on LiNbO<sub>3</sub> by proton exchange with self-aligned method. After proton exchange process, the waveguide is formed by annealing process. The relationship between refractive index change of waveguide and maximum output was studied along with the annealing time. A self-aligned method was used to simplify the fabrication process of the waveguide and to maximize the efficiency of electric field. The modulated directional coupler 1×2 has very good figures of merits: The measured crosstalk was -29.5 dB and the modulating voltage of 8.0 V.

### 1. 서 론

집적광학(integrated optics)의 역사는 1969년 벨 연구소의 Miller가 광 IC 개념을 발표함으로써 시작되었다<sup>1)</sup>. 1970년대초에 여러종류의 결정체가 집적광학의 재료로 검토되었으며, 그 중 SiO<sub>2</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>, GaAs 등이 집적광학 재료로 많이 이용되고 있다. 그후 수 μm 단위를 갖는 광 소자들의 현재까지 연구되어 지고 있다. 대표적으로 광 변조기, 모뎀변환기, RF스펙트럼분석기, 광 검파기들이 연구되었다<sup>2)</sup>. 이들 기능소자들은 하나의 칩상에 집적화하고자 하는 집적광학 소자로 개발되어지고 있다<sup>3)</sup>. 광 통신에 있어서 광원(laser diode), 광 섬유(전송매체), 광 검출기(photo detector)를 필수적인 요소로 꼽고

있다. 이러한 필수적인 요소와 시스템을 구축하기 위해서는 광을 제어하는 기능소자로 광결합기, 광 분파기, 광 변조기, 렌즈, 프리즘 등이 요구되고 있다<sup>4)</sup>. 이러한 수동 및 능동 소자들을 정밀하게 배열하여 단일칩상에 광 소자들을 박막형태로 집적화하여 효율적인 광 통신을 운영하는데 필수요소가 되어지고 있다. 현재는 광 손실과 변조전압을 감소시키며 대역폭<sup>5)</sup>을 향상시키기 위한 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 병행하여 연구가 활발히 진행되고 있다. 광 변조기는 광도파로의 형태에 따라서 단일 광 도파로(optical single-waveguide), 가지형도파로(branching-waveguide), 마하젠더 간섭계형(Mach-Zehnder interferometer), 방향성결합기(directional-coupler), X-스위치(intersecting waveguide)등의 기본적으로 몇가지

유형으로 분류된다<sup>6)</sup>. 본 연구에서는 여러개의 입, 출력을 갖는 방향성결합기를 만들기 위해서 필수적이라 할 수 있는 1×2 방향성결합기를 제작하였다. 방향성결합기는 두개의 인접한 도파로 간에 광 파워를 주고받으면서 나아가는 방향성결합현상을 이용한다. 방향성결합기는 변조를 하기위한 인가전압이 적고 Crosstalk이 다른 광 변조기에 비하여 작게될 수 있다는 유리한점을 갖고 있다. 본 연구에서는 양자교환 공정을 이용하여 광 도파로를 제작하였으며 최종적으로 방향성결합기를 제작한후 광의 집속 및 출력을 원활하게 하기 위하여 입·출력 광 도파로의 폭을 6 $\mu$ m로 확장하여 제작하였다. 본 연구에서는 입력단에 입력광을 넣을 때 Crosstalk과 변조전압을 측정하였으며 방향성결합기의 성능효과 및 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

방향성 결합기의 제작과정

마스크 정렬작업을 수행 하지않고, 양자교환을 하기 위하여 사용한 Al을 전극으로 이용하는 자기정렬전극방법을 선택하였다. 먼저 LiNbO<sub>3</sub> 기판을 자른후 충분히 세척한 다음 양자교환 및 자기정렬전극으로 사용하기 위한 패턴을 설정하기 위하여 기판에 박막형태로 Al을 2500Å 정도 증착한 후 패턴을 형성하였다. 도파로가 형성될 부분에 굴절율을 증가시키기 위한 방법으로 150°C에서 약 60~120분 양자교환처리 하였다. 양자 교환된 도파로의 양자원을 좌, 우 방향과 깊이방향으로 확산시키기 위하여 400°C에서 30~250분 양자

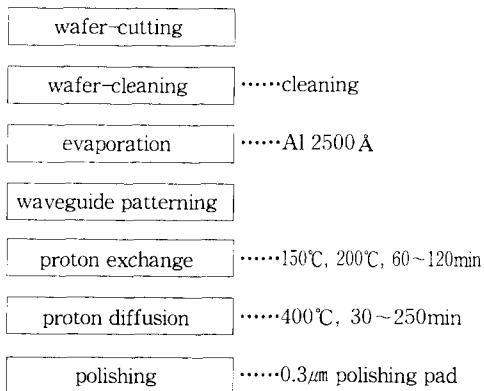


Fig. 1. Fabrication process of directional coupler

확인 한 다음 자연냉각시킨후 광원이 입사될 도파로 단면의 종단결합(end fire coupling)을 위하여 폴리싱 처리 하였다. 방향성결합기의 제작과정을 Fig. 1과 같이 나타 내었다.

자기 정렬방식을 이용한 광 도파로 및 전극 형성

다이싱 머신을 이용하여 시편을 10×6mm 정도 되게 자른 후 아세톤 및 메탄올에 순차적으로 담궈서 끓인후 표면을 처리하였다. 본 연구에서는 반복되어지는 마스크 공정 작업이 요구되지 않는 자기정렬방식을 이용하여 시편에 2500Å 정도의 Al을 증착 한후 양자교환이 이루어질 도파로를 형성 하기 위하여, PR 작업을 거친후 포토리소그라픽 방식으로 도파로부분의 PR을 제거한후 시편을 Al 에칭액에 넣어 광 도파로가 형성될부분만 Al을 제거시켰다. 그 다음 시편을 아세톤에 넣어 PR을 제거하면 양자교환을 하기위한 광 도파로가 형성된다. Fig. 2에서는 양자교환에 의한 방향

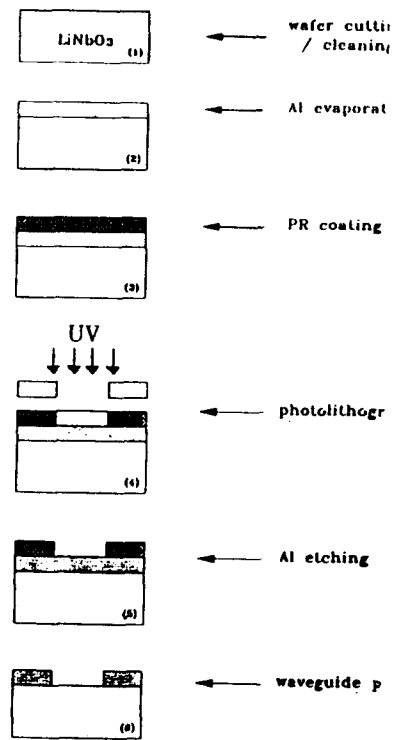


Fig. 2. Fabrication process of directional coupler by proton exchange.

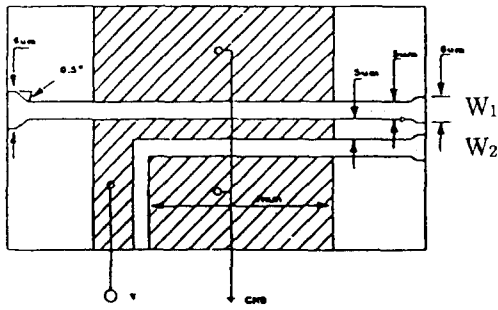


Fig. 3. Structure of directional coupler using self-aligned method

성 결합형 광 변조기의 제작과정을 나타내었다. 본 실험에서 이용한 자기정렬방식은 기존의 방식과는 달리 도파로 형성을 위한 마스크 제작과정이 필요 없다. 양자교환을 하기 위하여 이용된 Al패턴을 직접 전극으로 이용하므로 전극을 형성하기 위한 정렬 과정이 요구되지 않는다. 기존의 전극형성과정의 단점은 도파로의 가장자리와 전극의 가장자리 부분이 정확히, 정렬되지 않으므로 전계가 아주적게 나타났다. 그러나 자기정렬 방식은<sup>7)</sup> 이러한 얼라인 과정이 요구되지 않으므로 전극으로 이용되는 Al이 광 도파로와 최대한 밀착되므로 전계의 효율을 높이는 데 매우 적절한 방법이다. Fig. 3에서는 자기정렬방식을 이용한 방향 결합기의 결합길이에 대한 전극구조를 나타내었다.

방향성 결합기 제작을 위한 양자교환 및 양자확산 공정

양자교환에 필요한 앰플을 제작하기 위하여 내경이 10mm인 파이렉스 튜브를 토오치로 가공하여 LiNbO<sub>3</sub>시편과 벤젠산(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>COOH)을 넣어서 아래 Fig. 4와 같이 가공한다. 앰플을 150°C 전기로속에 넣어서 수십분 정도 기다리면 아랫쪽의 벤젠산이 녹아서 액체 상태가 된다. 이때 앰플을 뒤집어서 40~60분 정도 넣어두면 기관표면에서 양자교환<sup>8)</sup>이 일어난다. 그 다음 앰플을 식힌후 LiNbO<sub>3</sub> 시편을 꺼내어 입, 출력단의 단면을 사포(#1500)로 갈아낸후 약 0.3μm입자 굵기를 갖는 polishing pad에 갈아서 처리한다. 표면에 밀집되어있는 양자(H<sup>+</sup>)들을 깊이 방향으로 확산하기 위하여 열처리 한후, 형성된 광 도파로의 굴절



Fig. 4. Fabrication of Ampoule

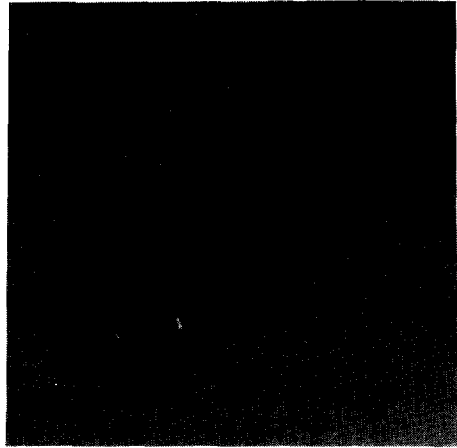


Fig. 5. Aspect of fabricated devices

을 분포를 결정하게 된다.

양자교환 및 양자확산을 하기 위하여 이용된 Al 패턴을 직접전극으로 이용하므로 전극을 형성하기 위한 얼라인 과정이 요구되지 않는다. 기존의 전극형성의 단점은 도파로의 가장자리와 전극의 가장자리 부분이 정확히 얼라인 되지 않으므로 전계효율이 아주 적게 나타났다<sup>9)</sup>. 본 실험에서는 이러한 얼라인 과정이 요구되지 않으므로 전극으로 이용되는 Al이 광 도파로와 최대한 밀착되므로 전계의 효율을 높이는 데 매우 적절한 방식이다. 자기정렬방식으로 제작된 시편은 크기가 작기 때문에 취급하기가 매우 어려우며 충격에 깨어지기 쉬우므로 에폭시 기관에 부가적인 전극패드를 제작하여 패드위에 시편을 고정하였으며, 시편과 에폭시패드와의 분당을 하기 위하

여(ZEBEX, MODEL ZB-202-L)을 이용하여 Fig. 5와 같이 초음파 본딩 하였다.

### 3. 실험 및 결과 고찰

#### 광 도파로의 특성 측정

LiNbO<sub>3</sub> 시편위에 전극을 증착한 상태에서 열처리 시간에 의해 도파모드의 변화를 조사 하였다. 제작된 시편중 2개를 선택하여 열처리 시간을 30~250분으로 순차적으로 변화시켰을때 방향성결합형 광 변조기의 입력 도파로 W<sub>1</sub>으로 변조된 출력전압을 측정장치를 이용하여 Table 1에 작성하였다. Fig. 6에서는 열처리를 수행함으로써 시간에 따라서 출력이 증가하다 떨어지는 것을 볼 수 있다. 출력이 증가 하다가 감소하는 현상을 볼수 있는데, 이것은 열처리 시간에 의하여 양자 밀도 변화에 따른 도파로 굴절률 변화와 광 도파로 폭의 변화로 인한 위상부정합(phase mismatch)에 기인된 때문이다.

#### 광 도파로의 X-선 회절분석

LiNbO<sub>3</sub>기판을 이용한 광 변조기를 제작하기 위하여 양자교환후 양자확산된 광 도파로 부분에 대한 X-선 회절분석 실험을 하여 그 결과를 Fig. 7에 나타냈다. X-선 회절기는 PW 3710을 이용 하였으며, Cu타겟을 사용하여 회절각도의 범위는 30°에서 80°에 걸쳐서 측정 하였다. Fig. 7(a)에서는 LiNbO<sub>3</sub> 기판에 대한 X-선 회절분석 결과로 LiNbO<sub>3</sub> 결정분포가 62.410°와 63.870° 근처에서 피크를 형성하므로 LiNbO<sub>3</sub> 기판이 균일한 결정구조를 갖

고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)에서는 LiNbO<sub>3</sub> 기판에 광 도파로를 형성한 후 오일 베스에서 150°C로 120분 양자교환된 기판을 X-선 회절분석한 결과로서 LiNbO<sub>3</sub> 결정분포가 62.760°와 64.160° 정도에서 피크가 형성되어 양자교환전의 62.410°와 63.870°보다 0.35° 및 0.29° 편위된 결과를 볼 수 있으며, 또한, 양자교환을 하므로 Li<sub>1-x</sub>H<sub>x</sub>NbO<sub>3</sub>의 결정구조를 갖는 피크가 64.525°에서 나타나므로 Li<sup>+</sup> 이온과 H<sup>+</sup> 이온이 치환된 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(c)의 경우 150°C 120분 양자교환후 O<sub>2</sub> 분위기에서 400°C로 60분간 열처리하여 양자확산된 LiNbO<sub>3</sub>의 X-선 회절결과로서 양

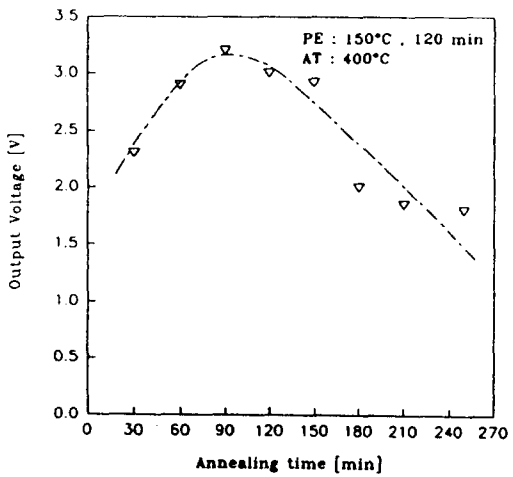
Table 1. Output voltage at various proton exchange condition and annealing temperatures

(시편 1) PE : 150°C, 120min. AT : 400°C

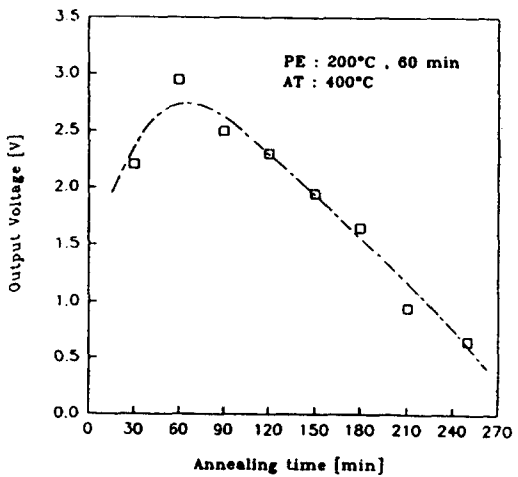
Annealing time [min]	30	60	90	120	150	180	210	250
Output voltage [V]	2.3	2.9	3.2	3.0	2.92	2.0	1.85	1.8

(시편 2) PE : 200°C, 60min. AT : 400°C

Annealing time [min]	30	60	90	120	150	180	210	250
Output voltage [V]	2.2	2.95	2.5	2.3	1.95	1.65	0.95	0.65



(a) PE: 150°C, 120 min

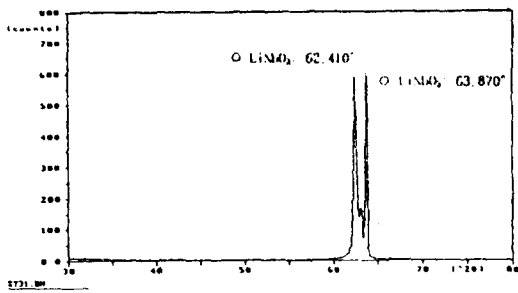


(b) PE: 200°C, 60 min.

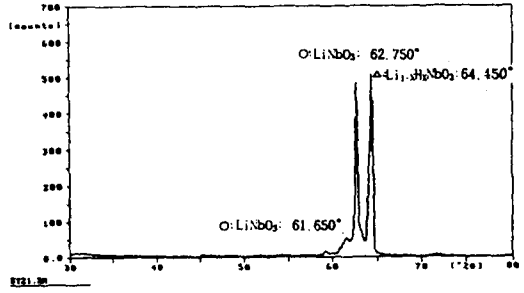
Fig. 6. Relation of annealing time v.s. output voltage.

자교환시의 62.760°와 64.160°와 64.525° 부근으로 다시 환원되어감을 확인할 수 있다. 여기서 Li<sup>+</sup>와 H<sup>+</sup>가 치환되는 양에 따라 피크의 밀도가 바뀌는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(d)는 200°C 60분 양자교환된 기판으로 LiNbO<sub>3</sub> 결정분포가 61.650°와 62.750° 정도에서 피크가 형성되어 양자교환전의 62,410°와 63.870°보다 -0.76°와 -1.12° 편위된 결과를 볼 수 있다. 또한, 양자교환을 하므로 치환된 피크는 64.450°에서 나타났다. 이러한 이유는 LiNbO<sub>3</sub> 기판을 양자교환에 적당한 시간과 온

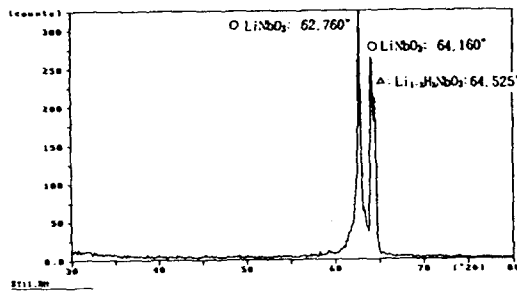
도에서 반응하여 양자교환이 이루어졌음을 확인하여 주는 결과로서 양자교환 온도 및 시간에 따라 기판의 결정구조가 변하므로 굴절률에 의한 특성변화가 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 양자교환 온도가 높을수록 낮은 각도에서 양자교환이 빨리 이루어짐을 알 수 있다. Fig. 7(e)의 경우 200°C 60분 양자교환후 400°C로 60분간 열처리한 결과로서, 62.370°와 63.395°로 환원되어 감을 알 수 있고 치환된 피크의 밀도변화를 확인할 수 있다. 이러한 X-선 회절결과의 변화는 양자교환 후 적



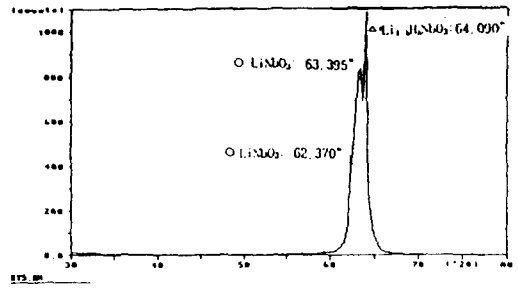
(a) before proton exchange



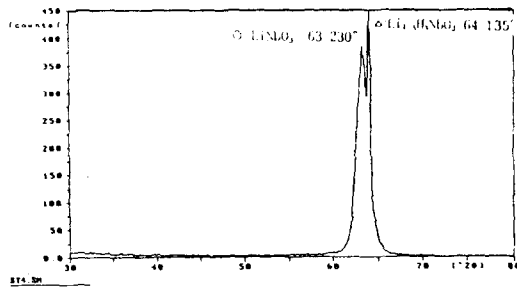
(d) after proton exchange : 200°C, 60min



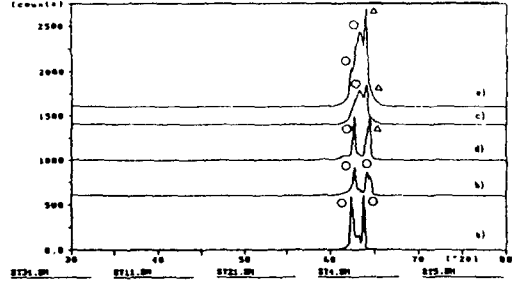
(b) after proton exchange(150°C, 120min)



(e) after proton exchange : 200°C, 60min  
proton diffusion : 400°C, 60min



(c) after proton exchange : 150°C, 120min  
proton diffusion : 400°C, 60min



(f) before/after of proton exchange and diffusion

Fig. 7. Analysis of X-ray diffraction LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide.

절한 온도에서 열처리함으로써 양자교환 된 부분이 다시 안정된 결정구조로 형성되어 짐을 보여 주는 것으로, Fig. 7(f)에서 양자교환 150[°C] 120분, 200°C 60분 처리된 시편에 대한 결과를 비교하여 볼 수 있다. 그림(b), (d)에서 양자교환 온도와 시간에 의해 치환된 양자의 편위각을 0.075°의 편위된 각을 확인할 수 있다. 또한 (c),(e)의 경우 양자교환 후 적절한 온도에서 열처리 하므로써 열처리를 하지않은 (b),(d)의 경우에 비해 결정성이 좋아지는 것을 볼 수 있다. 이와같은 결과는 H<sup>+</sup>이온이 치환되어도 LiNbO<sub>3</sub>의 결정 피크 이외의 다른 피크가 생성되는 것이 아니며, LiNbO<sub>3</sub> 일정면의 피크가 성장하거나 또는 LiNbO<sub>3</sub>의 결정피크들의 각도가 이동(shift)간 및 열처리에 의해 매우 큰 영향이 있음을 확인할 수 있다. 그러므로 양자교환 150°C 120분 일때와 200°C 60분에서의 광 출력특성이 차이가 있는 것을 위의 결과에서 나타난 결과와 잘 일치되고 있음을 확인할 수 있다.

**방향성 결합기 특성 측정**

방향성 결합기는 결합영역에서의 좁은 각격 때문에 Z-cut LiNbO<sub>3</sub>를 이용하여 수직 방향으로 전계를 가하는 형태가 일반적으로 대두되고 있다. 이때의 전극은 광 도파로를 완전히 만든 후에 전계의 효율을 고려하여 적절한 위치에 얼라인하여 만든다. 이러한 경우 수 μm의 폭과 수 μm의 길이를 갖는 전극을 정확한 위치에 만들기가 어려우며 이로인해 전계의 효율도 감소한다. 본 실험에서 사용한 자기정렬 전극은 이러한 얼라이너 작업을 하지 않고 양자교환을 하기 위하여 마스크로 사용한 Al을 이용하였다. 전극이 광 도파로와 최대한 밀착되므로 전계의 효율면에서 상당히 큰 효과를 갖게 된다. 따라서 이와같은 조건에서 제작된 방향성 결합기에서 크로스토크를 줄이는 것이 매우 중요하다. 크로스토크를 줄이기 위한 방법으로는 reversed Δβ전극 형태가 좋으나 소자가 커지고 인가전압이 증가하며, 전극이 복잡해 지는 단점이 있다. 실험에서 이용한 방법은 열처리를 해 나가면서 천이된 광 출력이 최대가 되는 지점에서 광 도파로 에서의 광 출력이 없어야 하지만 실험상에서 외부의 전계가 외상부정합을 상쇄하고 난후에도 열처리를 이용하여 결합길이와 천이

길이를 맞출 수 없기 때문에 남아있는 광 파워가 크로스토크로 작용한다. Fig. 8은 150°C, 120분 양자교환하고, 400°C, 60분 열처리한 조건이며, Fig. 9는 200°C, 60분 양자교환하고 400°C, 60분 열처리 하였을때 각기 다른 시편에 대해서 구형파를 입력으로 가하였을때 변조하는 출력 광신호를 photo-diode로 잡은 파형을 나타낸 그림이다. 스위칭 전압 만큼의 V<sub>p-p</sub>를 갖는 구형파가 주기적으로 가해짐에 따라 천이된 출력부(transferred output port)와 입력광이 들어와서 천이되고 남은쪽의 출력(remained output port)이 서로 상반되게 점멸하는 것을 볼 수 있다. 따라서 아래의 Table 2와 3은 Vlot/div 값과 time base 값의 관계를 나타냈으며, 각파형의 peak-to-peak 전압 및 각 시편에 대한 크로스토크를 표시하였다. 표와 그림에서 알 수 있듯이 제작 조건에 따라 크로스토크가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 제작상의 오차로 인하여 방향성결합 변조현상이 일어나는 광 도파로의 전파손실이 다르기 때문이다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 입력단과 출력단의 두개의 즉 1×2광 도파로가 같은 특성을 갖도록 제작상에 주의를 기울여야 할 것이다.

Table 2. PE : 150°C, 120min, AT : 400°C, 60min. PE : 150°C 120min, AT : 400°C, 60min

	Vol/div	time base	V <sub>p-p</sub> (input)	8[V]
A	5.0[V]	500[μs]	V <sub>p-p</sub> (W <sub>1</sub> )	2.95[V]
B	2.0[V]		V <sub>p-p</sub> (W <sub>2</sub> )	3.9[mV]
C	5.0[mv]		Crosstalk	-28.8[dB]

Table 3. PE : 200°C, 60min, AT : 400°C, 60min. PE : 200°C 60min, AT : 400°C, 60min

	Vol/div	time base	V <sub>p-p</sub> (input)	8[V]
A	5.0[V]	500[μs]	V <sub>p-p</sub> (W <sub>1</sub> )	3.5[V]
B	2.0[V]		V <sub>p-p</sub> (W <sub>2</sub> )	3.9[mV]
C	5.0[mv]		Crosstalk	-29.5[dB]

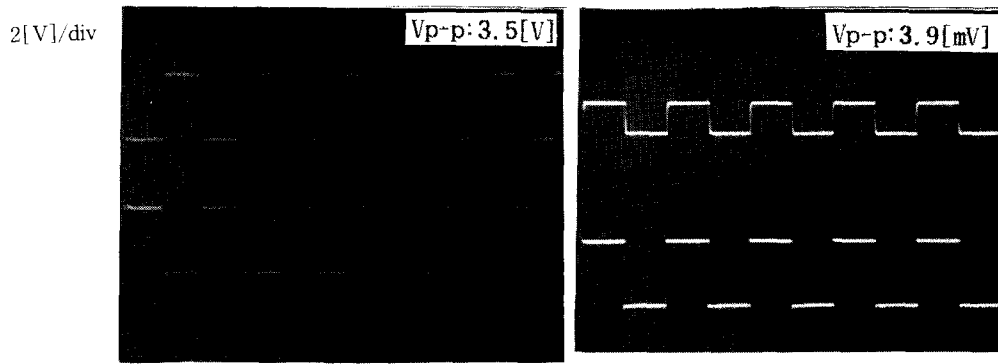


Fig. 8. Output characteristics of optical wave guide applied square wave PE : 150°C, 120min. AT : 400°C, 60min  
(a) input waveguide( $W_1$ ) (b) coupling waveguide( $W_2$ )

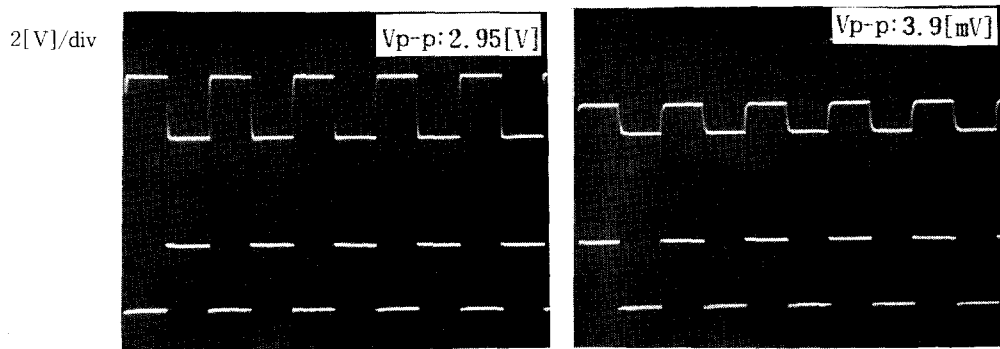


Fig. 9. Output characteristics of optical wave guide applied square wave PE : 200°C, 60min, AT : 400°C, 60min.  
(a) input waveguide( $W_1$ ) (b) coupling waveguide( $W_2$ )

#### 4. 결 론

전극과 관계효율을 최적화할 수 있는 자기 정렬 전극구조를 갖는  $1 \times 2$  방향성결합기를  $\text{LiNbO}_3$  기판을 이용하여 제작하였다. 또한 입·출력광의 집속 및 출력을 위하여 입, 출력단의 광 도파로폭을  $6\mu\text{m}$ 로 하였다. 본 연구에서는  $1 \times 2$  방향성결합기의 입력 도파로에 입력광을 넣고 광 도파로 출력을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 천이 길이를 처음부터 정확하게 맞추지 않고서도 열처리의 효과를 이용하여 초기 교차상태를 만들 수 있기 때문에 정확한 시간과 온도 조절에 의해서 결합길이를 최소화 할 수 있다.

2) 열처리효과를 이용하여 초기 교차상태를 조절할 수 있으므로 8V의 구동전압으로 스위칭 현상을 확인하였다.

3) 양자교환 수행후 확산과정에서 열처리

시간에 따른 양자밀도의 변화 및 도파로 굴절을 변화를 조절할 수 있음을 확인할 수 있다.

4)  $1 \times 2$  방향성결합기에 구동전압 8V에서 양자교환 및 열처리 조건(PE: 150°C 120min, AT: 400°C, 60min)일때 도파로 ( $W_1$ )에서 2.95V, 도파로( $W_2$ )에서 3.9mV이며 크로스토크 -28.8dB이다. 또한, (PE: 200°C, 60min, AT: 400°C, 60min)에서 도파로( $W_1$ )은 3.5V, 도파로( $W_2$ )는 3.9mV이고, 크로스토크 -29.5dB를 얻으므로 양자교환 및 열처리조건에 따라 특성변화가 있음을 확인하였다.

본 실험에서 제작한  $1 \times 2$  방향성결합기의 성능은 이미 보고된 방향성결합기에 비해변조전압이 낮고 크로스토크 현상을 매우 효율적으로 조절 하였다.

#### 참 고 문 헌

1. H. Yaska, Y. Yoshikuni, Y. Nakanokoe, "Optical frequency stabilization and line

- width reduction of a multi electrode DFB laser with current feedback," Reprint with permission from election, lett., vol. **23**, No. 21. pp. 1161-1162, 1987.
2. L. Mccaugham, "Low-loss Polarization-independent electrooptical switches at  $\lambda=1.3$  micron," J, Lightwave Technol., Vol, LT-2, pp, 51-52, 1984
  3. T.C Koch, J.E. Bowers, "Nature of wavelength clipping in directly modulation semiconductor laser," Electronics Lett., Vol. **20**, No 25/26 pp. 1038-1-39, 1984.
  4. J.A Fleck and M.D. Felt, "Beam propagation in uniaxial anisotropic media," J. Soc, Vol. **73**, pp. 920-926, 1983.
  5. R.C. Allferness, C.H. Joyner, L. Buhl, S. K. Korotky, "High-speed Traveling Wave directional coupler switch/modulator for  $\lambda=1.32\mu\text{m}$ ," IEEE J of Quantum electronics, Vol. **19**, pp. 1339-1341, 1983.
  6. 장용웅, 채기병, 강기성, 소대화, "X-스위칭 광 변조기의 설계 및 분석," 한국전기전자재료학회지 제4권 3호, pp. 249 : 258, 1991.
  7. 소대화, 강기성, 채기병, 장용웅, "BPM알고리즘을 이용한 LiNbO<sub>3</sub> 광 스위치 전계 분포와 굴절을 변화의 연구." 한국전기전자 재료학회 춘계발표회 논문집 pp. 38-42, 1991.
  8. L. Thylen, "Intergrated optics in LiNbO<sub>3</sub> Recent developments in devices for telecommunications," J. Lightwawe Technol., vol. **6**, pp. 847-861, 1988.
  9. Ki Sung Kang, Daw Wha Soh, "A study on the fabrication of LiNbO<sub>3</sub> high speed optical modulation using BPM computer simulation," Proceedings of the international conference computer technology and applications, Shenyang, China, pp. 489-497, 1984.