

LiNbO₃ 기판을 이용한 방향성결합형 광 변조기 특성 연구

A study on characterization of directional coupler using LiNbO₃

^o강기성^{*} 김창원^{**} 소대화^{***}

* 상지전문대학 전자과
** 경북대학교 센서기술연구소
*** 명지대학교 전자공학과

^o KI SUNG KANG^{*}, CHANG WON KIM^{**}, DAE WHA SOH^{***}

* Dept. of Electronics, Sang Ji Col.
** Sensor Technology Research Center Kyungpook National Univ.
*** Dept. of Electronics, Myong Ji Univ.

ABSTRACT

A guide-wave electro-optical modulated directional coupler 1X2 was fabricated on LiNbO₃ 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 1X2 has very good figures of merits; The measured crosstalk was -29.5[dB] and the modulating voltage of 8.0[V].

제 I 장 서 론

집적광학(integrated optics)의 역사는 1969년 벨 연구소의 Miller 가 광 IC 개념을 발표함으로써 시작되었다¹⁾. 1970년대초에 여러종류의 결정체가 집적광학의 재료로 검토되었으며, 그 중 SiO₂, KH₂PO₄, LiNbO₃, LiTaO₃, GaAs 등이 집적광학 재료로 많이 이용되고 있다. 그 후 수 [μm] 단위를 갖는 광 소자들이 현재까지 연구되어 지고 있다. 대표적으로 광 변조기, 모드변환기, RF스펙트럼분석기, 광 검파기들이 연구되었다.²⁾ 이들 기능소자들은 하나의 칩상에 집적화하고자 하는 집적광학 소자로 개발되어지고 있다³⁾. 광통신에 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 광 결합기, 광분파기, 광 변조기, 렌즈, 프리즘 등이 요구되고 있다.⁴⁾ 이러한 수동 및 능동 소자들을 정밀하게 배열하여 단일 칩상에 광 소자들을 박막형태로 집적화하여 효율적인 광통신을 운영하는데 필수요소가 되어지고 있다. 현재는 광손실과 변조전압을 감소시키며 대역폭⁵⁾을 향상시키기 위한 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 병행하여 연구가 활발히 진행되고 있다. 광 변조기는 광도파로의 형태에 따라서 단일 광 도파로 (optical single-waveguide), 가지형도파로 (branching-waveguid

e), 마하젠더간섭계형 (Mach-Zehnder interferometer), 방향성결합기 (directional coupler), X-스위치 (intersecting waveguide) 등의 기본적인 몇가지 유형으로 분류된다⁶⁾. 본 연구에서는 여러개의 입, 출력을 갖는 방향성결합기를 만들기 위해서 필수적이라 할수있는 1X2방향성결합기를 제작하였다. 방향성결합기는 두개의 인접한 광도파로 간에 광 파워를 주고받으면서 나아가는 방향성결합 현상을 이용한다. 방향성결합기는 변조를하기 위한 인가전압이 적고 Crosstalk이 다른 광 변조기에 비하여 작게될 수 있다는 유리한점을 갖고

있다. 본 연구에서는 양자교환공정을 이용하여 광도파로를 제작하였으며 최종적으로 방향성결합기를 제작한후 광의 진속및 출력을 원활하게하기 위하여 입, 출력 광도파로의폭을 6[μm]로 확장하여 제작하였다. 본 연구에서는 입력단에 입력광을 넣을 때 Crosstalk과 변조전압을 측정하였으며 방향성결합기의 성능효과 및 특성을 분석하였다.

제 II 장 실험 방법

2-1. 방향성 결합기의 제작과정

마스크 정렬작업을 수행 하지않고, 양자교환을 하기 위하여 사용한 Al을 전극으로 이용하는 자기정렬전극방법을 선택하였다. 먼저 LiNbO₃ 기판을 자른후 충분히 세척한 다음 양자교환 및 자기정렬전극으로 이용하기 위한 패턴을 설정하기 위하여 기판에 박막형태로 Al을 2500[Å]정도 증착한후 패턴을 형성하였다. 도파로가 형성될 부분에 굴절율을 증가시키기 위한 방법으로 150[°C]에서 약 60~120분 양자교환처리 하였다. 양자교환된 도파로의 양자원을 좌, 우 방향과 깊이방향으로 확산시키기 위하여 400[°C]에서 30~250분 양자확산 한 다음 자연냉각시킨후 광원이 입사될 도파로 단면의 중단결합(end fire coupling)을 위하여 폴리싱 처리 하였다. 방향성결합기의 제작과정을 그림1.와 같이 나타 내었다.

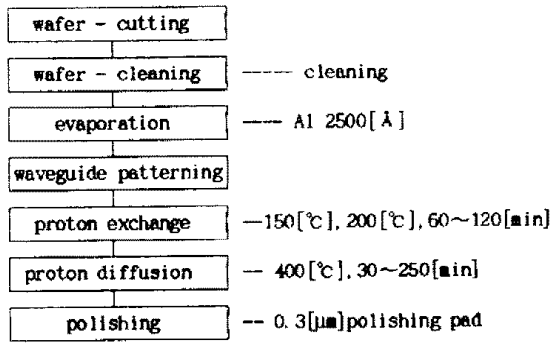


그림1. 방향성 결합기의 제작과정
Fig. 1. Fabrication process of directional coupler

2-2. 자기 정렬방식을 이용한 광도파로 및 전극 형성

다이싱 머신을 이용하여 시편을 10x6[mm] 정도 되게 자른 후 Acetone 및 Methanol에 순차적으로 담궈서 끓인후 표면을 처리하였다. 그리고 evaporator를 이용하여 2500[Å] 정도의 Al을 증착 한후 양자교환이 이루어질 도파로를 형성 하기위하여, PR 작업을 거친후 포토리소그래픽 방식으로 도파로부분의 PR을

제거한후 광 도파로를 그림2.와 같이 형성 하였다. 본 실험 에서 이용한 자기정렬방식은 기존의 방식과는 달리 도파로 형성을 위한 마스크 제작과정이 필요 없다. 양자교환을 하기위하여 이용된 Al패턴을 직접 전극으로 이용하므로 전극을 형성하기 위한 정렬 과정이 요구되지 않는다. 기존의 전극형성과정의 단점은 도파로의 가장자리와 전극의 가장자리 부분이 정확히 정렬 되지않으므로 전체의 효율이 아주적게 나타났다. 그러나 자기정렬 방식은⁷⁾ 이러한 align 과정이 요구되지 않으므로 전극으로 이용되는 Al이 광 도파로와 최대한 밀착되므로 전체의 효율을 높이는데 매우 적절한 방법이다. 그림3.에서는 자기정렬방식을 이용한 방향성결합기의 전극구조를 나타내었다.

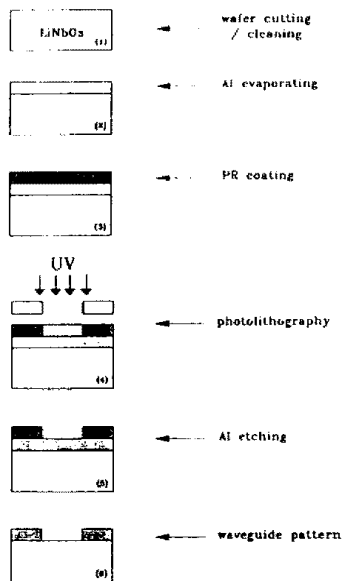


그림2. 양자교환에 의한 방향성 결합기의 제작과정
Fig. 2. Fabrication process of directional coupler by proton exchange.

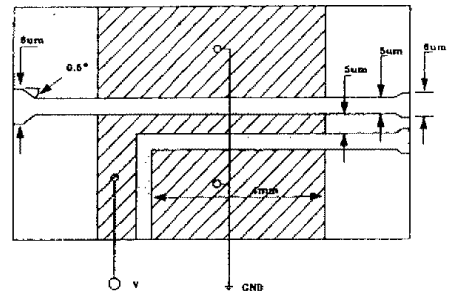


그림3. 자기정렬방식을 이용한 방향성 결합기의 전극구조
Fig. 3. Structure of directional coupler using self-aligned method

2-3. 방향성 결합기 제작을 위한 양자교환 및 양자 확산 공정

양자교환에 필요한 앰플을 제작하기 위하여 내경이 10[mm]인 파이렉스 튜브를 토오치로 가공하여 LiNbO₃ 시편과 벤젠산(C₆H₅COOH)을 넣어서 아래 그림4.와 같이 가공한다. 앰플을 150[°C] 전기로속에 넣어서 수십분 정도 기다리면 아랫쪽의 벤젠산이 녹아서 액체 상태가 된다. 이때 앰플을 뒤집어서 40~60분 정도 넣어두면 기판표면에서 양자교환⁸⁾이 일어난다. 그 다음 앰플을 식힌후 LiNbO₃ 시편을 꺼내어 입,출력단의 단면을 사포(#1500)로 갈아낸후 약 0.3[μm] 입자 굵기를 갖는 polishing pad에 갈아서 처리한다. 표면에 밀집 되어있는 양자 (H⁺)들을 깊이 방향으로 확산 하기 위하여 열처리 한후, 형성된 광 도파로의 굴절을 분포를 결정하게 된다.



그림4. 제작된 앰플
Fig. 4. Fabricated of Ampoule.

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 전체효율이 아주 적게 나타났다⁸⁾. 본 실험에서는 이러한 얼라인 과정이 요구되지 않으므로 전극으로 이용되는 Al이 광 도파로와 최대한 밀착되므로 전체의 효율을 높이는데 매우 적절한 방법이다. 자기정렬방식으로 제작된 시편은 크기가 작기때문에 취급하기가 매우 어려우며 충격에 깨어지기 쉬우므로 에폭시 기판에 부가적인 전극패드를 제작하여 패드위에 시편을 고정하였으며, 시편과 에폭시패드와의 본딩을 하기 위하여 (ZEBEX, MODEL ZB-202-L)을 이용하여 그림5.와 같이 초음파 본딩 하였다.



그림 5. 제작된 소자의 외형
Fig. 5. Aspect of fabricated devices

제 III 장 실험 결과 및 고찰

3-1. 광 도파로의 특성 측정

LiNbO₃ 시편위에 전극을 증착한 상태에서 열처리 시간에 의해 도파모드의 변화를 조사하였다. 제작된 시편중 2개를 선택하여 열처리 시간을 30~250분으로 순차적으로 변화시켰을때 방향성결합형 광 변조기의 입력 도파로 W₁으로 변조된 출력전압을 측정장치를 이용하여 표1.에 작성하였다. 그림6.에서는 열처리를 수행함으로써 시간에 따라서 출력이 증가하다 떨어지는 것을 볼 수 있다. 출력이 증가하다가 감소하는 현상을 볼 수 있는데, 이것은 열처리 시간에 의하여 양자 밀도 변화에 따른 도파로 굴절을 변화와 광 도파로 폭의 변화로 인한 위상부정합(phase mismatch)에 기인된 때문이다.

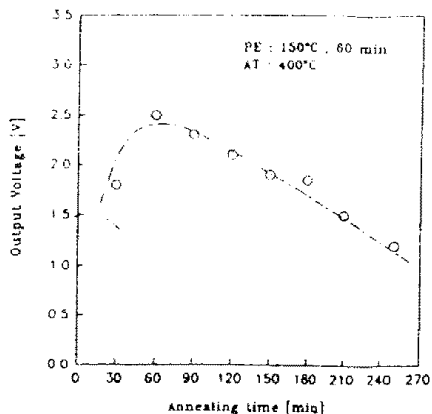
(시편1) PE: 150[°C], 60[min]. AT: 400[°C]

| Annealing time [min] | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 250 |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| Output voltage [V] | 1.8 | 2.5 | 2.3 | 2.1 | 1.9 | 1.85 | 1.5 | 1.2 |

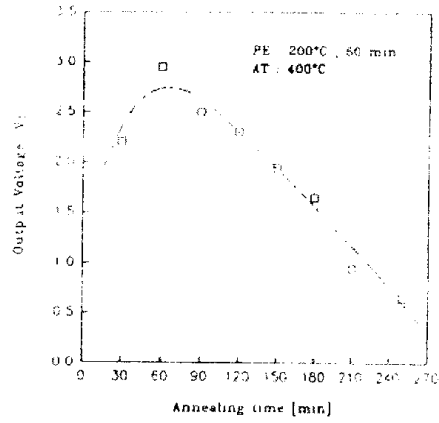
(시편2) PE: 200[°C], 60[min]. AT: 400[°C]

| 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 |

표 1. 양자교환 조건과 열처리온도에 따른 출력전압
Table. 1. Output voltage to proton exchange condition and annealing temperature



a) 양자교환 : 150[°C], 60분



b) 양자교환 : 200[°C], 60분

그림 6. 열처리시간 과 출력전압 관계
Fig. 6. Relation of annealing time V. S. output voltage.

3-2. 방향성 결합기 특성 측정

방향성 결합기는 결합영역에서의 좁은 간격 때문에 Z-cut LiNbO₃를 이용하여 수직 방향으로 전계를 가하는 형태가 일반적으로 대두 되고있다. 이때의 전극은 광 도파로를 완전히 만든 후에 전계의 효율을 고려하여 적절한 위치에 얼라인하여 만든다. 이러한 경우 수[μm]의 폭과 수[mm]의 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 광도파로와 최대한 밀착되므로 전계의 효율면에서 상당히 큰 효과를 갖게 된다. 따라서 이와같은 조건에서 제작된 방향성 결합기에서 크로스토크를 줄이는것이 매우 중요하다¹⁰⁾. 크로스토크를 줄이기 위한 방법으로는 reversed $\Delta\beta$ 전극 형태가 좋으나 소자가 커지고 인가전압이 증가하며, 전극이 복잡해지는 단점이 있다. 실험에서 이용한 방법은 열처리를 해 나가면서 천이된 광 출력이 최대가 되는 지점에서 전계를 가하여 위상 부정합으로 인한 스위칭을 시키는 것이다. 광 파워가 입력된 광 도파로에서의 광 출력이 없어야 하지만 실험상에서 외부의 전계가 위상부정합을 상쇄하고 난후에도 열처리를 이용하여 결합길이와 천이길이를 맞출 수 없기 때문에 남아있는 광 파워가 크로스토크로 작용한다. 그림7.는 150[°C], 60분 양자교환하고, 400[°C], 60분 열처리한 조건이며, 그림8.은 200[°C], 60분 양자교환 하고 400[°C], 60분 열처리 하였을때 각기 다른 시편에 대해서 구형파를 입력으로 가하였을때 변조하는 출력 광신호를 photodiode로 잡은 파형을 나타낸 그림이다. 스위칭 전압 만큼의 V_{p-p}를 갖는 구형파가 주기적으로 가해짐에 따라 천이된 출력부 (transferred output port)와 입력광이 들어와서 천이되고 남은쪽의 출력(remained output port)이 서로 상반되게 점멸하는것을 볼 수 있다. 따라서 아래의 표 2와 3은 Volt/div 값과 time base 값의 관계를 나타냈으며, 각파형의 peak-to-peak 전압및 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 1X2 광 도파로가 같은 특성을 갖도록 제작상에 주의를 기울여야 할 것이다.

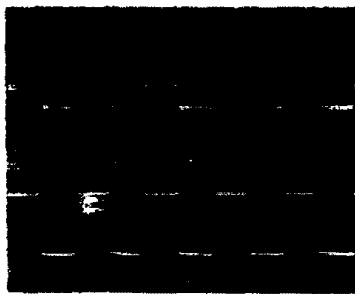
표 2. 양자교환 150[°C], 60분 열처리 400[°C], 60분
Table 2. PE: 150[°C], 60[min], AT: 400[°C], 60[min].

PE: 150[°C] 60[min], AT: 400[°C] 60[min]

| | Vol/div | time base | V_{p-p} (input) | 8[V] |
|---|---------|-----------|-------------------|-----------|
| A | 5.0[V] | 500[μs] | $V_{p-p}(W_1)$ | 2.5[V] |
| B | 2.0[V] | | $V_{p-p}(W_2)$ | 4.5[mv] |
| C | 5.0[mv] | | Crosstalk | -27.4[dB] |



a) input waveguide(W_1)



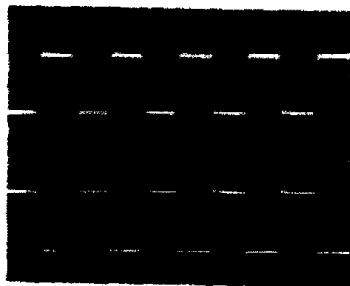
b) coupling waveguide(W_2)

그림 7. 구형파 전압을 가했을때 광도파로의 출력특성
(양자교환: 150[°C], 60분. 열처리 400[°C], 60분)
Fig. 7. Output characteristics of optical wave
guide applied square wave.
PE: 150[°C], 60[min], AT: 400[°C], 60[min].

표 3. 양자교환 200[°C], 60분, 열처리 400[°C], 60분
Table 3. PE: 200[°C], 60[min], AT: 400[°C], 60[min].

PE: 200[°C] 60[min], AT: 400[°C] 60[min]

| | Vol/div | time base | V_{p-p} (input) | 8[V] |
|---|---------|-----------|-------------------|-----------|
| A | 5.0[V] | 500[μs] | $V_{p-p}(W_1)$ | 3.5[V] |
| B | 2.0[V] | | $V_{p-p}(W_2)$ | 3.9[mv] |
| C | 5.0[mv] | | Crosstalk | -29.5[dB] |



a) input waveguide (W_1)



b) coupling waveguide(W_2)

그림 8. 구형파 전압을 가했을때 광도파로의 출력특성
(양자교환: 200[°C], 60분. 열처리 400[°C], 60분)
Fig. 8. Output characteristics of optical wave
guide applied square wave.
PE: 200[°C], 60[min], AT: 400[°C], 60[min].

제 IV 장 결론

전극과 전체효율을 최적화할 수 있는 자기정렬 전극구조를 갖는 1X2 방향성결합기를 LiNbO₃ 기판을 이용하여 제작하였다. 또한 입, 출력광의 집속 및 출력을 위하여 입, 출력단의 광 도파로폭을 6[μm]로 하였다. 본 연구에서는 1X2 방향성결합기의 입력 도파로에 입력광을 넣고 광 도파로 출력을 측정한 결과 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 결합 길이를 최소화 할 수 있다.

2) 열처리효과를 이용하여 초기 교차상태를 조절할 수 있으므로 8[V]의 구동전압으로 스위칭 현상을 확인하였다.

3) 1X2 방향성결합기에 구동전압 8[V]에서 양자교환 및 열처리 조건 (PE: 150[°C], 60[min], AT: 400[°C], 60[min])일때 도파로 (W_1)에서 2.5[V], 도파로 (W_2)에서 4.5[mv]이며 크로스토크 -27.4[dB] 이다. 또한 (PE: 200[°C], 60[min], AT: 400[°C], 60[min])에서 도파로 (W_1)은 3.5[V], 도파로 (W_2)는 3.9[mv]이고, 크로스토크 -29.5[dB] 를 얻으므로 양자교환 및 열처리 조건에 따라 특성변화가 있음을 확인하였다.

본 실험에서 제작한 1X2 방향성결합기의 성능은 이미 보고된 방향성결합기에 비해변조전압이 낮고 크로스토크 현상이 매우적게 나타났다.

Reference

1. H. Yasaka, 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. S. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Kimura, "Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor laser," IEEE J. of pp. 582-590, 1982.
3. T. C Koch, J. E. Bowers, "Nature of wavelength clipping in directly modulation semiconductor laser," Electronics Lett., Vol. 20, No 25/26 pp. 1038-1039, 1984.

4. 김 창 민, "집적광학 기술의 발전동향," 한국통신학회지 제 10권, 제8호, PP. 51-53, 1993.
5. J. A Fleck and M. D. Feit, "Beam propagation in uniaxial anisotropic media," J. Soc, Vol. 73, pp. 920-926, 1983.
6. R. C. Alliferness, C. H. Joyner, L. Buhl, S. K. Korotky, "High-speed Traveling Wave directional coupler switch/modulator for $\lambda=1.32 \mu\text{m}$," IEE E J of Quantum electronics, Vol. 19, pp. 1339-1341, 1983.
7. 장용용, 채기병, 강기성, 소대화, "X-스위칭 광 변조기의 설계 및 분석," 한국전기전자재료학회지 제 4권, 3호, PP. 249-258, 1991.
8. 소대화, 강기성, 채기병, 장용용, "BPM 알고리즘을 이용한 LiNbO₃ 광 스위치 전계분포와 굴절률 변화의 연구," 한국전기전자 재료학회 춘계발표회 논문집 pp. 38-42, 1991.
9. L. Thylen, "Intergrated optics in LiNbO₃ Recent developments in devices for telecommunications," J. Lightwave Technol., vol. 6, pp. 847-861, 1988.
10. Ki Sung Kang, Dae Wha Soh, "A study on the fabrication of LiNbO₃ high speed optical modulation using BPM computer simulation," Proceedings of the international conference computer technology and applications. shenyang, chnia. PP. 489-497, 1994.