

2 x 2 방향성 결합형 광 변조기의 제작 연구

Fabrication of electro-optical modulator of directional coupler 2x2

강기성* 채기병 소대화

명지대학교 전자공학과

KI SUNG KANG , KEE BYUNG CHAE , DAE WHA SOH

Dep. of Electronics Eng. Myong Ji Univ.

Abstract

A guided - wave electro - optical modulated directional coupler 2 x 2 was fabricated on X-cut LiNbO₃ by proton exchange with self-aligned method. The Electrode pattern was formed by the four extra gap electrode separation within self-aligned electrode mask. Initial cross over state turned that by controlling the annealing process and self-aligned electrodes are used in fabricating the electro-optical modulated directional coupler 2 x 2. The modulated directional coupler 2 x 2 has very good figures of merits: the measured crosstalk was -28.2 dB and the modulating valtage of 3.2[V].

제 I 장 서 론

광통신 시스템에서 안정적으로 동작할 수 있는 신호원을 제공하기 위하여 이에 수반하는 도파(guided-wave) 형태의 개념을 이용한 집적광학(integrated optics)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(1). 집적광학은 박막도파로를 이용하여 하나의 기판위에 여러개의 광신호처리소자를 형성시킬 수 있으므로 aligne의 어려움이없고 대량생산이 가능하며 미래의 완전한 광통신을 구현하는데 필수적인 소자로서 여러가지 기판재료와 특이적인 기술을 이용하여 연구되고 있다. 본 연구에서는 여러개의 입·출력을 갖는 방향성결합형 광변조기를 만들기 위해서 필수적이라고 할 수 있는 2 x 2 방향성결합형 광변조기를 제작 하였다. 방향성결합형 광변조기는 두개의 인접한 광도파로 간에 광파워를 주고 받으면서 나아가는 방향성 결합현상을 이용한다(2). 방향성결합형 광변조기는 변조를 하기위한 인가전압이 적고 crosstalk 이 다른 광변조기에 비하여 작게 될 수 있다는 유리한점을 갖고 있다. 이러한 특성을 갖는 방향성결합형 광변조기는 파워 분할기/결합기, 스위치 array 파장여파기, 모드변환기 등의 여러가지 신호처리분야에 응용되고 있으며 집적광학의 가장 기본적인 소자중의 하나이다. 1 x 2 방향성결합기를 응용하여 2개씩의 입력과 출력력을갖는 2 x 2 광도파로를 제작 하였으며 전극형성시에 정렬작업의 어려움을 간소화하기 위하여 전극용 mask 가 필요없는 자기정렬 전극구조를 이용하였다. 양자교환공정을 이용하여 광도파로를 제작하였으며 또한 최종적으로 방향성결합형 광 변조기를 제작한

후, 광섬유와의 결합을 가능하게 하기위하여 입 출력단의 두 광도파로간의 간격을 140 μm 로 충분히 띄워 광섬유와의 결합을 가능하게 하였다(3). 본 연구에서는 입력단에 입력광을 넣었을때 crosstalk 과 변조비 와 변조전압을 측정하였으며 제작된 방향성결합형 광변조기의 성능 효과 및 그 특성을 분석하였다.

제 II 장 실험 방법

2-1. 양자교환 및 폴리싱 , 어닐링

광 변조기를 제작하는데 있어서 가장 중요한 문제인 굴절율의 조절을 위해서 도파로내에서의 손실이 적은 광도파로를 만드는 방법으로는 그림 1)과 같은 타이타늄내부 확산(titanium indiffusion) 과 그림 2)와 같은 양자교환(proton exchange)공정을대표적으로 들 수 있다(4). Titanium indiffusion 공정은 광도파로를 만들려는 부분에 Ti filim 을 올린뒤에 고온에서 수시간 동안 표면 확산 시키면 깊이방향으로 확산되어 들어간다. 따라서 굴절율이 증가되고 광도파로가 증가하게 된다. 이때 Ti 두께와 폭, 내부 확산 시간과 온도, 그리고 확산시키는 방향에 따라 광도파로의 굴절율 분포가 결정된다. 양자교환공정은 LiNbO₃ 기판위에 광도파로를 만들려는 부분만 금속 마스크를 만들고, LiNbO₃ 기판을 산이나 수화물 속에 담궈서 가열하면 LiNbO₃ 의 Li⁺ 이온과 산이나 수화물에서 공급되는 H⁺이온이 양자 교환을 일으키게 되고 반응이 일어나 표면의 굴절율이 증가하게 된다. 본 실험에서는 benzoic-acid를 사용하였으며, 양자교환을 위해 필요한 온도는 150 °C - 240 °C 이하다.

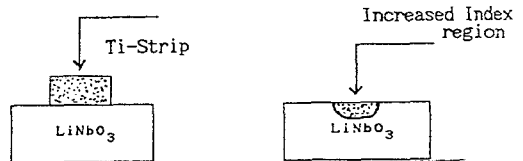


그림 1. Titanium - indiffusion method

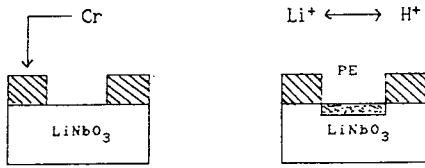


그림 2. Proton - exchange method

양자교환에 필요한 Ampoule 을 제작 하기 위하여 내경이 10 mm 인 pyrex tube 를 torch 로 가공하여 LiNbO₃ 시편과 벤젠산을 넣어서 Ampoule 을 150°C 전기로 속에 넣어서 40-60 분 정도 넣어두면 기판표면에서 양자교환이 일어난다⁽⁵⁾. Ampoule 을 식힌후 LiNbO₃ 시편을 빼내어서 입.출력 단의 단면을 사포(#1500)로 갈아낸후 약 0.3μm 입자굵기를 갖는 Polishing Pad 에 갈아서 입.출력 단면을 깨끗하게 만든다. Polishing 이 깨끗하게 되지 않으면 입.출력 단에서 반사되는 손실이 커지므로 매우 주의 해야 하는 공정이다. 또한 표면에 밀집되어있는 교환된 양자들을 깊이 방향으로 확산시키기 위하여 400°C 전기로에서 10 분 - 15 분정도 충분한 양의 산소를 흘리면서 annealing 을 함으로써 광도파로의 굴절률분포를 결정하게 된다. 이공정은 광도파로 형성의 마지막 공정으로 주의하여 처리 하여야 한다.

2-2. 자기정렬 방식을 이용한 2 x 2 방향성 결합형 광 변조기의 전극 patterning

그림 3) 에서는 광도파로 형성을 위한 양자 교환용 mask 를 제작하여 mask 로 사용된 Cr 을 전극으로 사용할 수 있는 자기정렬 전극 (Self-aligned electrode) 구조를 택함으로써, aligner 를 사용하지 않고 2x2 방향성 결합형 광변조기를 제작하였다. 이때 필요한 부분만을 전극으로 이용하기 위하여 그림 3) 과 같이 4 개의 전극 분리용 extra gap 을 만들었다. 이 gap 들은 일종의 도파로 구조를 갖고 있으므로 이들로 인하여 전파손실 (propagation loss)이 발생하게 된다. 그러나 이 gap 들은 방향성 결합기의 2 x 2 광도파로와 90°의 각도를 이루고 gap 폭도 4μm 이하로 작기 때문에 이들에 의한 전파손실은 무시할정도로 작게 분포된다. 그림 3) 에서는 2 x 2 광도파로 사이의 좁은 간격으로 전극에 직접 전압을 인가

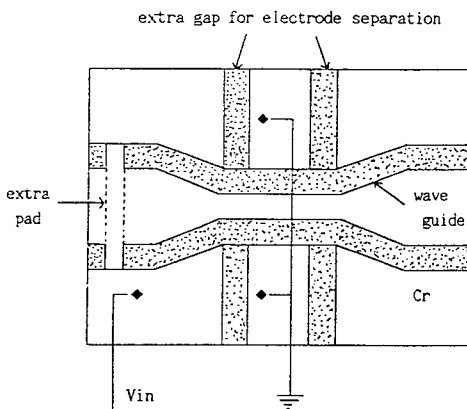


그림 3. Self-aligned electrode mask with extra gap for electrode separation

하기 어렵기 때문에 extra pad 를 만들어서 광도파로의 넓은 부분에 전압을 인가하였다⁽⁶⁾. 2 x 2 광도파로의 간격은 4μm 이고 결합 전극의 길이는 4mm 이고 입력과 출력단의 bending 각도는 1° 이고 입력단과 출력단의 광도파로와 도파로의 간격은 140 μm이다. 그림 4) 에서는 양자교환을 한후 전극으로 이용하기위한 자기정렬 전극 pattern 공정 과정을 나타 냈다.

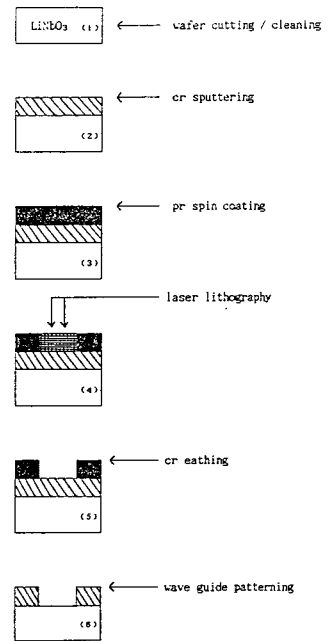


그림 4. Fabrication process of self-aligned electrode for proton exchange

제 III 장 실험 결과 및 고찰

3-1. 특성 측정

그림 5), 그림 6) 은 W1 과 W2 에 입력을 넣고 5.2 V 삼각파 인가전압을 걸었을 때 2 x 2 광도파로에서의 광출력 세기에 의해 나타난 변조현상 이다. 인가전압의 주파수는 수십 Hz 에서 수십 MHz 까지 조절 하였다. 인가전압에 비례하는 2 x 2 광출력단의 위상부정합 δ 의 함수는 이론적으로 계산된 2 x 2 광출력단의 광 파워의 변화로 나타낼수 있다. 이때 결합영역의 길이는 천이길이와 같다. 인가전압 Vin = 0 V 일 때 cross-overstate 에서 천이된 광 파워의 세기가 최대가 아니고 어느정도의 인가전압이 가해져야 최대가 되는 이유는 제작상의 오차로 인하여 초기에 2 x 2 광도파로간에 위상부정합이 존재하기 때문이다. 초기에 2 x 2 광도파로간에 위상 부정합이 없고 (δ=0)결합영역의 길이가 천이길이와 같은 경우에는 cross-over state 에서 광 파워가 입력된 광도파로에서의 광출력이 없어야 하지만 실험상에서 외부의 전계가 위상부정합을 상쇄하고 난 후에도 annealing 을 이용하여 결합영역의 길이와 천이길이를 맞출 수 없기 때문에 남아있는 광파워가 존재하게 된다. 이렇게 남아있는 광 파워가 crosstalk 으로 작용한다.

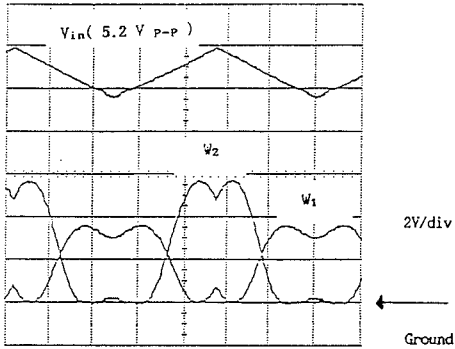


Fig 5. Input power at W1

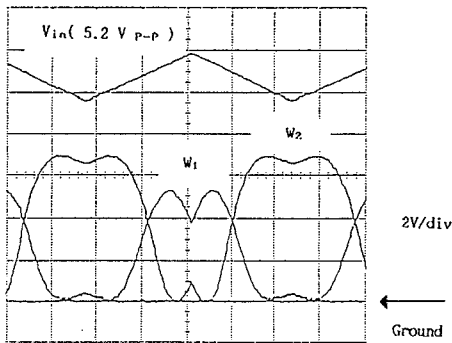


Fig 6. Input power W 2

그림 7) 에서는 W1 에 입력이 들어갔을때, cross-over state 에서 W1 에 남아있는출력광파워 양을 알기 위하여 그림 5) 를 확대한것이다.

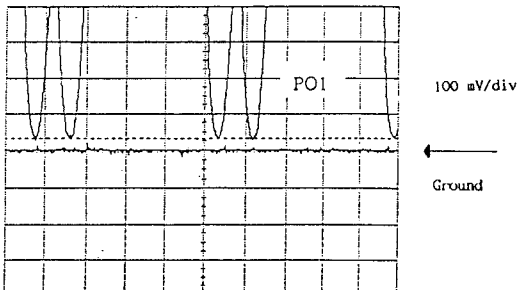


Fig 7. Input power at W 1 (widely)

그림 8) 에서는 W1 에 입력을 가했을때 W1 의 출력이 인가전압에 의하여 변조상태가 되기 위한 인가전압의 양을 보여주고 있다.그림에서 W1 의 변조전압 $V_m = 3.2 V$ 였다.

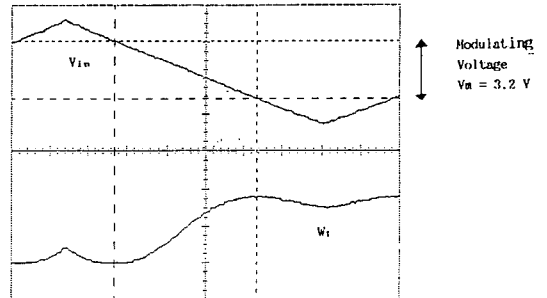


Fig 8. Modulating Voltage at W1

2 x 2 방향성결합형 광변조기의 특성측정 결과 각도파로에 입력이 들어갔을때cross-over state 와 bar state 에서의 crosstalk 과 각 도파로에서의 변조비의 관계는 다음과 같은 식을 이용하여 구하였다.

$$\text{cross talk} = 10 \log \frac{P_r}{P_t + P_r} : \text{cross-over state}$$

$$\text{cross talk} = 10 \log \frac{P_r}{P_t + P_r} : \text{bar state}$$

$$\text{modulating rate} = 10 \log \left[\frac{\text{on 상태 일때의 광출력}}{\text{off 상태 일때의 광출력}} \right]$$

표1)에서 알수 있듯이 W1에 입력 광을 넣었을때 cross-over state 와 bar state에서 crosstalk 이 달라지는것을 확인 할 수 있다. 이러한 이유는 제작상의 오차로 인하여방향성결합 변조현상이 일어나는 2 x 2 두 광도파로의 전파손실이 다르기 때문이다.이러한 문제점을 보완 하기 위해서는 2 x 2로된 두개의 광도파로가 같은 특성을 갖도록 제작상에서 주의를 기울여야 할 것이다.

표 1) Crosstalk and modulating ratio of electro - optical modulator directi - onal coupler on input at W 1.

state	Out Power		crosstalk
	W1 (P_r)	W2 (P_t)	
=	3.0V	4.5 mV	- 28.2 dB
x	25 mV	5.3 V	- 23.3 dB
변조비	20.7dB	30.7dB	

제 IV 장 결 론

전극과 전계의 효율을 최적화 할수있는 자기정렬 전극 구조를 갖는 2 x 2 방향성결합형 광변조기를 X-cut LiNbO₃ 기판을 이용하여 제작하였다. 또한 양자교환을 하기 위하여 사용하던 mask의 일 부분만을 전극으로 이용하기 위하여 4 개의 전극 분리용 extra gap 을 만들었다. annealing 공정을 이용하여 방향성 결합형 광변조기의 초기cross-over state 를 다소 조절할수 있으나 실제 실험상에서 annealing 시간만을 조절 하여 결합영역의 길이와 천이길이를 정확하게 일치 시킬수 없기 때문에 초기 완전한cross-over state를 구현하기란 매우어렵다. 본연구에서는 2 x 2 방향성결합형 광변조기의 각 도파로에 입력광을 넣고 도파로의 출력을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1). 2 x 2 방향성결합형 광변조기 에 구동전압을 가했을 때 Pr의 전압이 3.0V 였으며, Pt 의 전압이 4.5 mV 일 때 crosstalk 는 - 28.2 dB 을 얻었다.
- 2). 2 x 2 방향성결합형 광변조기 에 구동전압을 가하지 않았을때 Pr 의 전압은 2.5mV 이고, Pt 의 전압은 5.3 V 이며 crosstalk 는 -23.3 dB 로 나타났다.
- 3). 변조비의 관계는 W1 과 W2 에서 20.7 dB : 30.7 dB 나타났다.
- 4). 결합영역의 길이가 4 mm 일때의 변조현상으로서 V_m = 3.2 V 을 얻었다.

본 실험에서 제작한 2 x 2 방향성 결합형 광 변조기 의 성능은 이미 보고된 방향성 결합형 광 변조기에 비해 변조 전압에 의해 나타나는 crosstalk 현상이 매우 적게 나타났다.

Reference

- [1] P.S.Cross and R.V.Shmidt, "Al Gbit/s Integrated optical modulator", IEEE J. Quantum Electron, vol. QE-15, pp.1415-1418, 1979.
- [2] A.Neyer, W.Mevenkamp, L.Thylen, B.Lagerstrom, " A Beam Propagation Method Analysis of Active and Passive Waveguide Crossings", IEEE J.Lightwave Tech., LT-3, pp.635-642, 1985.
- [3] R.C.Alferness, " Waveguide electro-optic modulators", IEEE . Microwave Theory Tech., vol. MTT-30 . pp.1121-1137, 1982.
- [4] T.Nishihara, M.Haruna, T.Suhara, "Optical Integrated Circuits", McGraw-Hill Book Company, 294-295, 1989
- [5] 강기성, 채기병, 소대화 "광 변조기 제작을 위한 양자 확산 및 자기 정렬 방식에 관한 연구", 한국 전기 전자 재료학회 논문지, Vol. 제6권 1호, pp 8-14,
- [6] A.Neyer, "Electrooptic X-switch using Single-Mode Ti:LiNbO₃ Channel Waveguides", Electronics Let., Vol.19, No.14, 1983.