

방향성 결합형 광 변조기 제작 및 특성 연구

논문
8-4-7

A study on fabrication and characterization of directional coupling optical modulator

강기성*, 소대화**
(Ki-Sung Kang*, Dae-Wha Soh**)

Abstract

A directional coupler which on the X-cut LiNbO₃ substrate is fabricated by using proton exchange method and 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 on-off state of modulator has been observed with the switching of the directional coupler by the electric field effect and also the switching voltage of the directional coupler has been measured with 8.0 [V].

Key Words(중요용어) : Uniaxial ferroelectric crystal(강유전체), Proton exchange(양자교환), Self-aligned method(자기정렬 방식), Directional coupling(방향성 결합), End fire coupling(직접결합)

1. 서 론

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 비교해 보면 신호의 변환 과정이 필요없는 광 스위치를 이용한 직접적인 스위칭이 유리함을 알 수 있다.¹⁾ 집적 광학 소자를 만들기 위해서는 광파의 전계에 대한 영향을 나타내는 전기광학상수(electro-optic coefficient)가 큰 물질이 유리하다. 따라서 uniaxial ferroelectric crystal인

리튬 나이오베이트(LiNbO₃)는 이러한 조건을 만족시키며, 도파 손실이 낮은 광 도파로를 만들기에는 적합하다. 따라서 LiNbO₃ 기판위에 단일 모드 광 도파로를 만들고 전극을 통하여 전계를 인가하면, 전기 광학 효과에 의해서 광 도파로의 굴절율에 변화를 줄 수 있다.²⁾ 광 변조기는 이러한 굴절율 변화를 이용하여 입력 광을 변조(modulation) 또는 스위칭 시킬 수 있으며, 방향성결합 (directional coupling)현상을 이용한 광 스위치, intersecting waveguides형 (x-type)광 스위치,³⁾ 그리고 마하젠더 간섭계형 변조기(mach-zehnder interferometric modulator)⁴⁾ 등의 기본적인 몇가지 유형으로 분류된다. 본 논문에서는 양자교환 (proton exchange) 방법을 이용하여 광 도파로가 형성되는 과정에서 열처리 효과와 자기 정렬 방식 (self-aligned method)을 이용하여 전극을 형성하는 방법으로 X-cut LiNbO₃ 기판위에 제작된 방향성 결합기에 대하여 연구 하였다.

2. 실험 방법

2-1) 방향성 결합기의 기본원리

* : 상지전문대 전자과
** : 명지대학교 전자공학과
접수일자 : 1995년 2월 10일
심사완료 : 1995년 6월 13일

기본적인 형태의 방향성 결합기를 그림 1.과 같이 나타내는데 $z=0$ 인 입력부에서 한쪽 광도파로에 전파되는 광파워가 z 축을 따라 진행하면서 다른쪽 광도파로로 천이되는 것을 보이고있다. 이러한 천이현상은 두개의 광도파로 내에 존재 할 수 있는 전파모드가 서로 겹쳐서 발생하는것으로 방향성 결합(directional coupling)이라고한다.

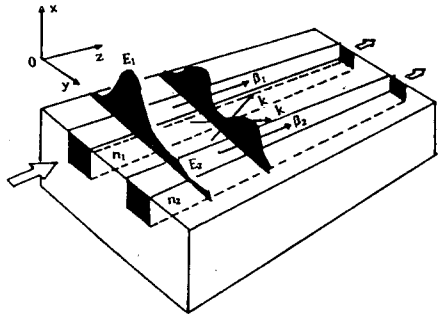


그림 1. 방향성 결합기의 기본 구조

Fig. 1. Basic structure of directional coupler.

2-2) 방향성 결합기의 제작과정

본 연구의 변조기 형태는 반복되어지는 마스크 정렬작업을 수행 하지않고, 양자교환을 하기위하여 사용한 Al을 전극으로 이용하는 자기정렬전극방법을 선택하였다. 먼저 LiNbO₃ 기판을 자른후 아세톤,메탄올,TCE로 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 종단결합(end fire coupling)을 위하여 폴리싱 처리 하였다. 방향성결합기의 제작과정을 그림2.와 같이 나타 내었다.

2-3) 자기 정렬방식을 이용한 광도파로 및 전극 형성

다이싱 머신을 이용하여 시편을 10x6[mm] 정도 되게 자른 후 시편의 표면및 단면의 불순물을 제거하기 위하여 세척액인 Acetone 및 Methanol에 순차적으로 담귀서 끓인후 표면 및 단면을 을 처리 하였다. 그리고 evaporator를 이용하여 2500[Å]

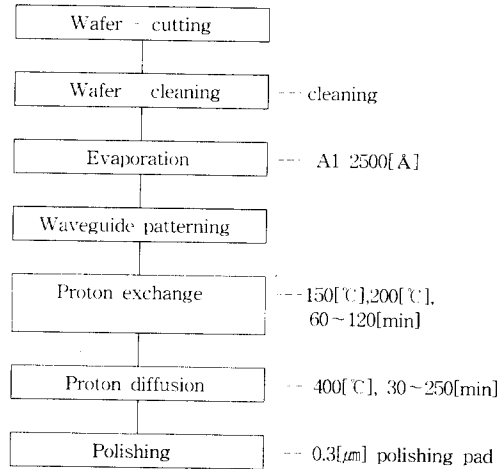


그림 2. 방향성 결합기의 제작과정

Fig. 2. Fabrication process of directional coupler.

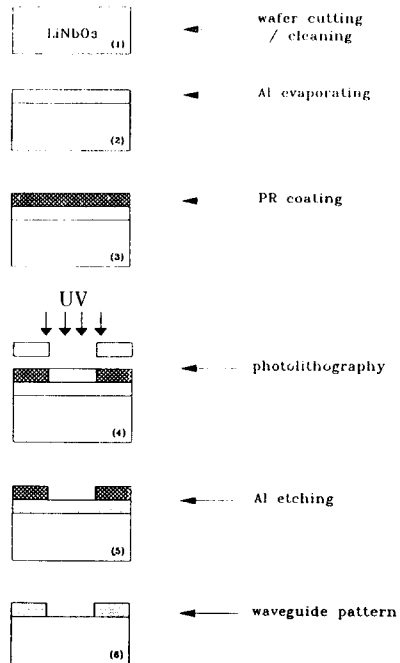


그림 3. 양자교환에 의한 방향성 결합기의 제작 과정

Fig. 3. Fabrication process of directional coupler by proton exchange.

정도의 Al을 증착 한후 양자교환이 이루어질 도파로를 형성 하기위하여, PR 작업을 거친후 포토리소그래픽 방식으로 도파로부분의 PR을 제거한후

광 도파로를 그림 3과 같이 형성 하였다. 본 실험에서 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 방식은⁵⁾ 이러한 align 과정이 요구되지 않으므로 전극으로 이용되는 Al이 광도파로와 최대한 밀착되므로 전체의 효율을 높이는데 매우 적절한 방법이다.

2-4) 방향성 결합기 제작을 위한 양자교환 및 양자확산 공정

양자교환에 필요한 앰플을 제작하기 위하여 내경이 10[mm]인 파이렉스 튜브를 토오치로 가공하여 LiNbO₃시편과 벤젠산(C₆H₅COOH)을 넣어서 아래 그림4와 같이 가공한다. 앰플을 150[°C] 전기로 속에 넣어서 수십분 정도 기다리면 아랫쪽의 벤젠산이 녹아서 액체 상태가 된다. 이때 앰플을 뒤집어서 40~60분 정도 넣어두면 기판표면에서 양자교환⁶⁾이 일어난다. 그 다음 앰플을 식힌후 LiNbO₃시편을 꺼내어 입,출력단의 단면을 사포(#1500)로 갈아낸후 약 0.3[μm] 입자 굵기를 갖는 polishing

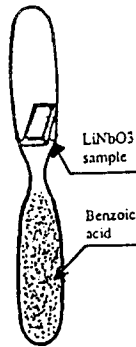


그림 4. 제작된 앰플
Fig. 4. Fabricated of Ampoule.

pad에 갈아서 처리한다. 표면에 밀집 되어있는 양자(H⁺)들을 깊이 방향으로 확산하기 위하여 열처리 한후, 형성된 광 도파로의 굴절률 분포를 결정하게 된다.

양자교환 및 양자확산을 하기 위하여 이용된 Al패턴을 직접전극으로 이용하므로 전극을 형성하기

위한 얼라인 과정이 요구되지 않는다. 기존의 전극형성의 단점은 도파로의 가장자리와 전극의 가장자리 부분이 정확히 얼라인 되지 않으므로 전체효율이 아주 적게 나타났다⁷⁾. 본 실험에서는 이러한 얼라인 과정이 요구되지 않으므로 전극으로 이용되는 Al이 광 도파로와 최대한 밀착되므로 전체의 효율을 높이는데 매우 적절한 방식이다. 자기정렬 방식으로 제작된 시편은 크기가 작기때문에 취급하기가 매우 어려우며 충격에 깨어지기 쉬우므로 에폭시기판에 부가적인 전극패드를 제작하여 패드위에 시편을 고정하였으며, 시편과 에폭시패드의 본딩을 하기위하여 (ZEBEX,MODEL ZB-202-L)을 이용하여 Photo.1 와 같은 형태로 전극을 조음과 본딩 하였다.

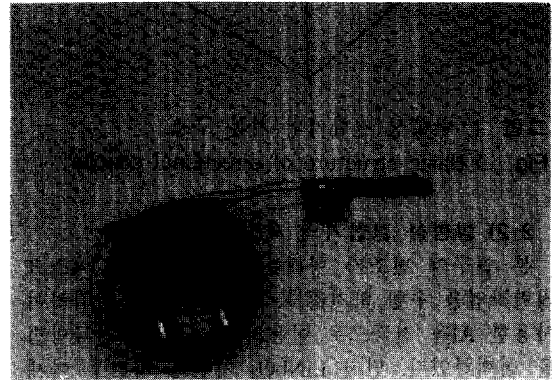


사진 1. 제작된 소자의 외형
Photo.1. Aspect of fabricated devices

3. 결과 및 고찰

3-1) 방향성 결합기의 특성

방향성 결합기의 동작 가능성과 도파모드가 커지면서 결합현상이 증가하는가를 살펴보기 위해 LiNbO₃ 시편위에 전극을 증착한 상태로 제작하였다. 인접한 두개의 광 도파로는 직선 광 도파로로서 결합 영역의 길 4[mm]를 갖는 방향성 결합기를 만들어서 결합이 일어나는 정도의 변화를 살펴 보았다. 여기서 두개의 광 도파로에서 나온 출력이 매우 가깝게 인접해 있으므로 측정에 주의하여야 한다. 그림 5는 LiNbO₃시편위에 결합영역의 길이 차이가 4[mm]인 방향성 결합기를 나타냈다. 방향성 결합기가 결합 영역의 길이 차이를 제외하고, 나머지 부분이 동일한 구조를 갖는다면

$$\frac{P_t}{P_0} = \sin^2(KL) \tag{1}$$

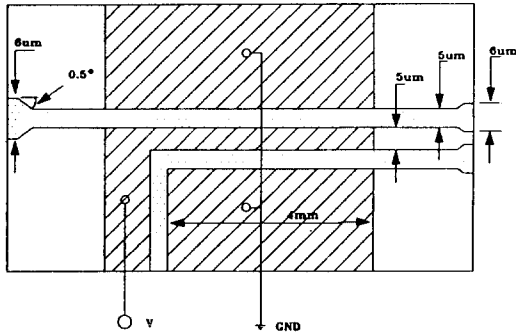


그림 5. 방향성 결합기의 구조
Fig. 5. The structure of directional coupler.

여기서 두개의 광 도파로에서 P₀는 입력초기의 입력광 파워를 나타낸다. 한편 두 광도파로가 서로 달라서 전파모드간에 위상부정합이 생기게되면 위상차가 커지게 되어 완전한 광 파워의 천이가 일어나는 지점이 존재 하지 않게 되고 위상차가 결합계수(k)보다 커지게 되면 반반씩의 광 파워 분할은 불가능하게 된다. 따라서 (1)의 관계식에 비례하는 결과를 얻을수 있다. 그러나 공정상에서 이처럼 균일한 구조로 얻기가 불가능 하므로 결합이 일어나는 정도에 큰 차이를 보이고, 결국 위의 식에 비례하는 이상적인 결과는 얻을수 없었다. 그러므로 각각의 방향성 결합기에 대하여 열처리 시간에 의한 변화로 살펴 보는것이 바람직하다.

그림 6.에서는 실험에 이용한 측정장비의 개략적인 그림으로, 스위칭특성의 실험적 관측을 용이하게 하기 위하여 가시적 효과를 갖는 TE 편광된 He-Ne 레이저($\lambda=0.6328[\mu\text{m}]$)빔을 광원으로 사용하였다. 레이저광의 입력 광을 대물렌즈로 집속시켜 도파로 단면에 직접 레이저광을 결합시키는 직접

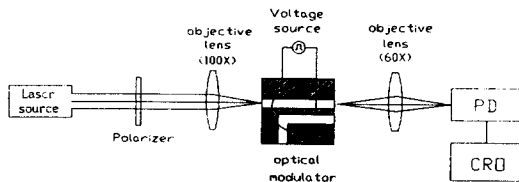


그림 6. 측정 장치
Fig. 6. Measurement system.

결합(end fire coupling) 방법을 사용하였다. 레이저 광 집속배율은 입력단에서 100 x 출력단에서

60 x 인 대물렌즈를 이용하였다. 여기서 He-Ne 레이저를 사용함으로써 다중모드 전파가 전송되므로 변조효과의 감소와 출력특성의 열화가 다소 예상된다.

3-2) 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 W₁ 으로 변조된 출력전압을 그림 6.의 측정장치를 이용하여 표1.에 작성하였다. 그림 7.에서는 열처리를 수행함으로써 시간에 따라서 출력이 증가하다 떨어지는 것을 볼수 있다. 출력이 증가 하다가 감소하는 현상을 볼수 있는데, 이것은 아닐링 처리시간에 의하여 양자 밀도 변화에 따른 도파로 굴절률 변화와 광 도파로 폭의 변화로 인한 위상 부정합(phase mismatch)에 기인된 때문이다.

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

시편(1) PE:150[°C],60[min]. AT:400[°C]

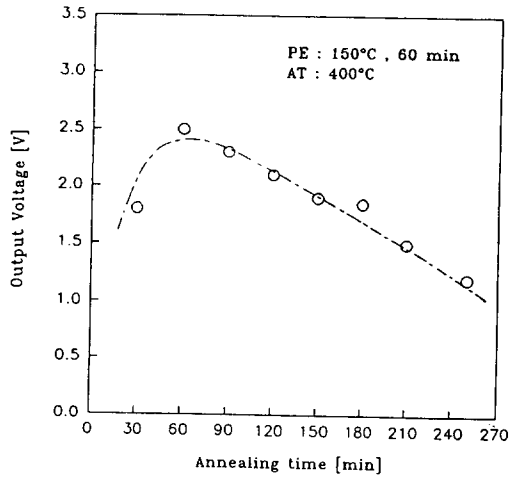
Annealing time [min]	30	60	90	120	150	180	210	250
Output voltage [V]	1.8	2.5	2.3	2.1	1.9	1.85	1.5	1.2

시편(2) PE:200[°C],60[min]. AT:400[°C]

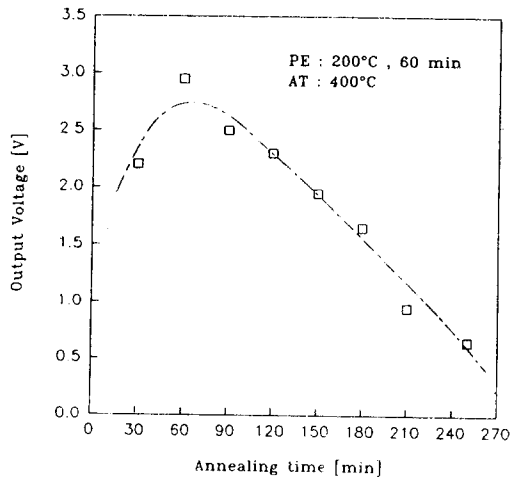
Annealing time [min]	30	60	90	120	150	180	210	250
Output voltage [V]	2.2	2.95	2.5	2.3	1.95	1.65	0.95	0.65

3-3) 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



a) 양자교환 : 150[°C],60분



b) 양자교환 : 200[°C],60분

그림 7. 열처리시간 과 출력전압 관계
Fig. 7. Relation of annealing time V.S.output voltage.

이로인해 전계의 효율도 감소한다. 본 실험에서 사용한 자기정렬 전극은 이러한 열라이너 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 중요하다. 크로스토크를 줄이기 위한 방법으로는 reversed $\Delta\beta$ 전극 형태가 좋으나 소자가 커지고 인가전압이 증가하며, 전극이 복잡해 지는 단점이 있다. 실험에서 이용한 방법은 열처리를 해 나가면

서 천이된 광 출력이 최대가 되는 지점에서 전계를 가하여 위상 부정합으로 인한 스위칭을 시키는 것이다. 이 경우 공정상에서 정확한 천이길어로 맞출 필요가 있으며, 단순한 전극만으로도 크로스토크를 줄일 수 있다. 사진2.는 150[°C],60분 양자교환하고 400 [°C],60분 열처리한 조건이며, 사진3.는 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 남은 쪽의 출력(remained output port) 이 서로 상반되게 접멸하는 것을 볼 수 있다. 따라서 아래의 표 2 와 3은 Volt/div 값과 time base값의 관계를 나타냈으며, 각파형의 peak-to-peak전압을 표시하였다.

표 2. 양자교환 150[°C],60분 열처리 40[°C],60분

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

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

	Volt/div	Time base
A	5.0[V]	500[μ s]
B	2.0[V]	
C	5.9[mV]	

V_{p-p} (input)	8[V]
V_{p-p} (W1)	2.5[V]
V_{p-p} (W2)	4.5[mV]

표 3. 양자교환 200[°C],60분, 열처리 400[°C],60분

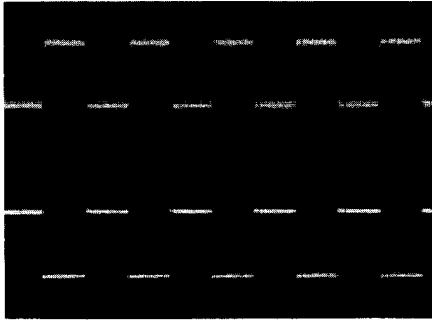
Table 3. PE:200[°C],60[min], AT:400 [°C],60[min].

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

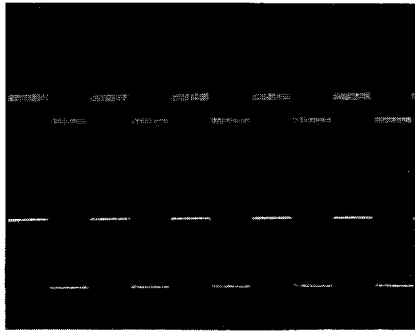
	Volt/div	Time base
A	5.0[V]	500[μ s]
B	2.0[V]	
C	5.9[mV]	

V_{p-p} (input)	8[V]
V_{p-p} (W1)	3.5[V]
V_{p-p} (W2)	3.9[mV]

그림 8.에서는 제작되어진 광 변조기의 도파로 형성과정과 확산 깊이를 확인하기 위하여 α -step으로 확인한 결과, 양자교환에 의한 양자확산 깊이를 측정 하였다. 이 그림에서는 방향성 결합기가 지니고 있는 확산된 깊이를 볼 수 있으며, 또한 도파로 폭이 5[μ m] 정도로 형성 된것을 확인할 수가 있다. 그리고 사진 4.에서는 양자확산된 광도파로의 도파로 폭 5[μ m] 인 사진으로 균일하게 도파로가



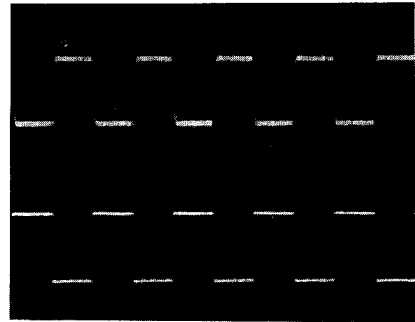
a) input waveguide(W₁)



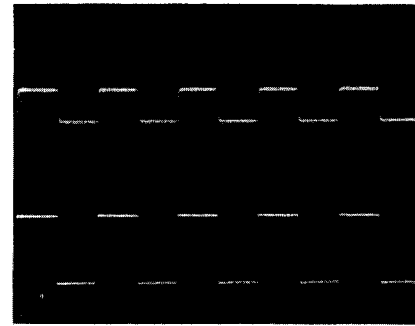
b) coupling waveguide(W₂)

사진 2. 구형과 전압을 가했을 때 광도파로의 출력특성 (양자교환:150[°C],60분.열처리 400[°C],60분)

Photo. 2. Output characteristics of optical waveguide applied square wave. PE:150[°C],60[min], AT:400[°C], 60 [min].



a) input waveguide (W₁)



b) coupling waveguide(W₂)

사진 3. 구형과 전압을 가했을 때 광도파로의 출력특성 (양자교환:200[°C],60분.열처리 400 [°C], 60분)

Photo. 3. Output characteristics of optical waveguide applied square wave. PE:200[°C],60[min], AT:400[°C], 60 [min].

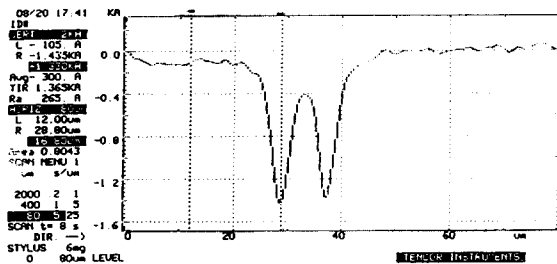


그림 8. α -step을 사용한 도파로깊이 측정
 Fig. 8. Waveguide depth profile using α -step.

형성된것을 볼 수 있다.열처리에 의한 도파로 폭 조절은 정확한 온도와 시간을 조절하는 것으로 이루어질 수 있는데, 전기로내에서 온도와 시간조절은 비교적 잘되지만 시편을 넣고 꺼내는 과정에서

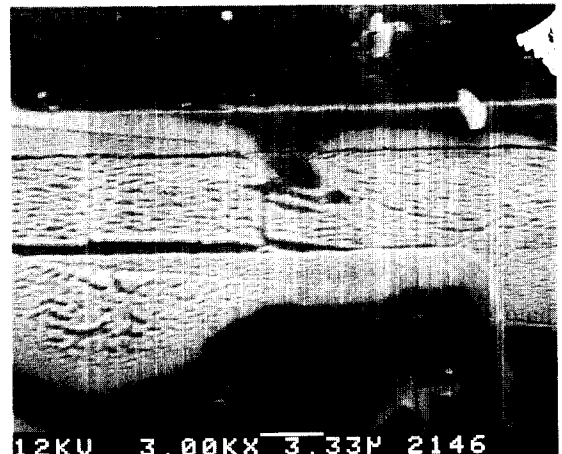
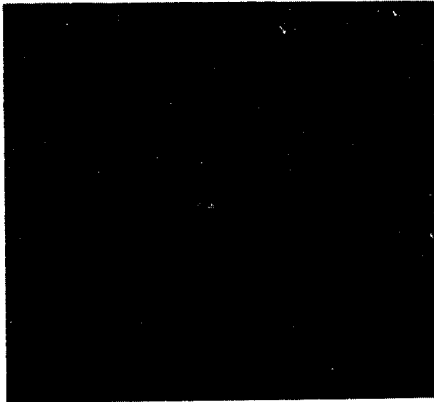


사진 4. 방향성 결합기의 도파로 표면사진
 Photo.4. Waveguide surface photograph of directional coupler.

온도의 변화속도가 굴절율의 변화 및 도파로폭에 미치는 영향에 대해서는 조사하기 어려웠다.

광 도파로에서 열처리시간과 온도에 의한 광도파로의 폭이 변화되는 관계를 확인하기 위하여 광도파로에 광원을 인가하고 그 결과를 관찰한 결과 열처리전의 출력이 열처리에 따른 도파로폭의 변화에 의해 변화된다는 결과를 사진 5.에서와 같이 확인하였다.



(a) before annealing



(b) after annealing

사진 5. 열처리 전,후의 광 출력의 비교 (온도:400[°C],시간:4hrs)

Photo.5. Optical output of befor/after annealing(temp:400[°C], time:4hrs)

4. 결 론

X-cut LiNbO₃ 기판으로 양자교환 공정을 이용한 양자확산 방식을 적용하여 방향성 결합형 광 변조기를 제작하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열처리 효과와 결합길이 관계를 확인하기 위하여 열처리 시간에 의해 광 도파로 폭이 점차적으로 증가함에 따라 굴절율과 출력이 변화하는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상에 의해 단일 모드로부터 멀티모드로 변화되는 것을 확인하였다.
- 2) 진극에 의한 광 도파로내의 전계효율을 극대화하기 위하여 도파로 가장자리와 진극을 최대한 밀착시킬 수 있는 자기정렬방식을 적용함으로써 부수적으로 마스크의 제작회수를 최소화하여 공정 과정을 개선하였다.
- 3) 양자교환 수행후 확산과정에서 열처리 시간에 따른 양자밀도의 변화 및 도파로 굴절율 변화를 조절 할 수 있었다.
- 4) 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.
- 5) 열처리효과를 이용하여 초기 교차상태를 조절할 수 있으므로 8[V]의 구동전압으로 스위칭 현상을 확인하였다.

따라서 LiNbO₃ 기판을 이용하여 방향성 결합기, 마하젠더 간섭계형 변조기 및 X-switch형 광 변조기 등의 제작에 응용 하므로써, 공정 과정과 진극의 정렬 과정을 더욱 효율적이며, 간단하게 제작할 수 있을것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. L.McCaughan, "Low loss Polarization independent electrooptical switches at 1.3 micron," J. Lightwave Technol., Vol. LT-2, pp. 51-52, 1984
2. A.L.Dawar, S.M.A1-shukri, and R.M.De La Rue, "Guided-wave acoustooptic interaction in proton-exchanged Y-cut LiNbO₃," Appl. Phys.Lett., Vol.48, pp,1579-1581,1986
3. Lar Thylem, "Integrated optics in LiNbO₃:Recent developments in devices for telecommunications" J Light-wave Technol., Vol.6, pp,847-861,1988.
4. V.Ramaswamy, M, D. Divino, and R.D. standly, "Balanced bridge modulator switch using Ti-diffused LiNbO₃ strip waveguide," Appl.Phys.Lett., Vol, 32, pp, 664-646,1978.

5. 소대화, 강기성, 채기병, 장용용: "X-스위치 광 변조기의 설계 및 분석", 전기전자재료학회 논문지, Vol.4권3호, pp.249-258, 1991.

6. 강기성, 채기병, 소대화: "광 변조기 제작을 위한 양자확산 및 자기정렬 방식에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 논문지, Vol.6권1호, pp 8-14, 1993.

저자소개



강기성

1959년 11월 15일생 1986년 2월 명지대학교 전자공학과 졸업. 1988년 2월 명지대학교 대학원 졸업 (석사). 1994년 2월 명지대학교 대학원 졸업 (공학). 현재 상지전문대학 전자과 조교수.



소대화

1945년 2월 25일생 1972년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업. 1975년 2월 명지대학교 대학원 졸업 (석사). 1987년 2월 경희대학교 대학원 졸업(공학). 1994년 3월 중국 동북대학 전자공학과 연구 및 겸임교수. 현재 명지대학교 전자공학과 교수.