

결합형 광 스위치 제작 및 특성 연구

A study on fabrication and characterization of coupling optical switch

° 강 기 성 * 소 대 화 **

* 상지전문대학 전 자 과

** 명지대학교 전자공학과

° KI SUNG KANG*, DAE WHA SOH**

* Dept. of Electronics, Sang Ji Col.

** Dept. of Electronics, Myong Ji Univ.

ABSTRACT

A optical switch which on the LiNbO₃ substrate is fabricated by using proton exchange method and self-aligned method. The annealing at 400[°C] was carried out to control waveguide width and depth.

A self-aligned method, which doesn't need the additional mask processes, was applied to simplify the fabrication processes and to maximize efficiency of electric field application. The depths of the two annealed optical waveguides, which were measured by using α -step, were 1.435[KÅ] and 1.380[KÅ]. Using α -step facility, we examined that the width of waveguides is increased from 5[μ m] to 6.45[μ m] and 6.3[μ m] due to the annealing effects. The process of proton exchange was done at 200[°C] for 60[min] and annealing process was done at 400[°C] for 60[min]. The high speed optical modulator has very good figures of merits: the measured voltage of the input waveguide power is 3.5[V], the voltage of the coupling waveguide power is 3.9[mV], and -29.5[dB] crosstalk and 8[V] switching voltage were achieved.

제 1 장 서론

1970년대초에 여러종류의 결정체가 집적광학의 재료로 검토되었으며, 그 중 SiO₂, KH₂PO₄, LiNbO₃, LiTaO₃, GaAs 등이 집적광학 재료로 많이 이용되고 있다¹⁾. 그 후 수[μ m]단위를 갖는 광 소자들이 현재까지 연구되어 지고 있다. 이에따라 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 기능 소자로 광 결합기, 광분파기, 광 변조기, 렌즈, 프리즘 등이 요구되고 있다^{2,3)}.

이러한 수동 및 능동 소자들을 정밀하게 배열하여 단일칩상에 광 소자들을 박막형태로 집적화하여 효율적인 광통신을 운영하는데 필수요소가 되어지고 있다. 광 스위치는 광도파로의 형태에 따라서 단일 광도파로(optical single-waveguide), 가지형도파로(branching-waveguide), 마하젠더간섭계형(Mach-Zehnder interferometer), 방향성결합기(directional coupler), X-스위치(intersecting waveguide)등의 기본적인 몇가지 유형으로 분류된다. 본 연구에서는 여러개의 입, 출력을 갖는 광 스위치를 만들기 위해서 필수적이라 할 수 있는 1X2 결합형 광 스위치를 제작하였다^{4,5)}. 광 스위치는 두개의 인접한 광 도파로 간에 광파워를 주고받으면서 나아가는 결합현상을 이용한다^{6,7)}. 결합형 광 스위치는 스위칭 하기위한 인가전압이 적고 Crosstalk이 다른 광 스위치에 비하여 작게 될 수 있다는 유리한점을 갖고있다^{8,9,10)}. 본 연구에서는 양자교환 공정을 이용하여 광 도파로를 제작하였으며 최종적으로 결합형 광 스위치를 제작한후 광의 집속 및 출력을 원할하게하기 위하여 입,출력 광 도파로의 폭을 6[μ m]로 확장하여 제작하였다. 본 연구에서는 입력단에 입력광을 넣을 때 Crosstalk과 스위칭전압을 측정하였으며 결합형 광 스위치의 성능효과 및 특성을 분석하였다.

제 2 장 실험 방법

1. 결합형 광 스위치의 제작과정

양자교환을 하기위하여 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 양자원울 좌,우 방향과 깊이방향으로 확산시키기 위하여 400[°C]에서 30~250분 양자확산 한 다음 자연냉각시킨

후 광인이 입사될 도파로 단면의 직접결합(end fire coupling)을 위하여 폴리싱 처리 하였다. 광 스위치의 제작과정을 그림1. 와 같이 나타 내었다.

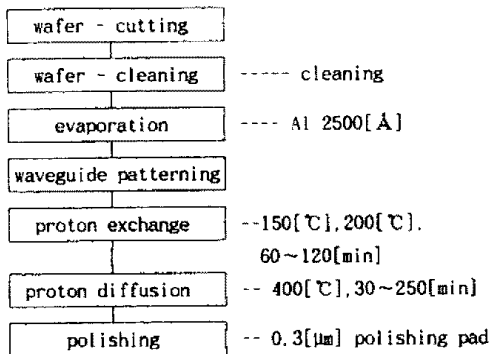


그림 1. 결합형 광 스위치의 제작과정

2. 자기 정렬방식을 이용한 광도파로 및 전극 형성

결합형 광 스위치의 시편을 10x6[mm] 정도 되게 자른 후 시편의 표면 및 단면의 불순물을 제거하기 위하여 세척액인 Methanol에 순차적으로 담귀서 끓인후 표면 및 단면을 처리하였다. 그리고 증착기를 이용하여 2500[Å] 정도의 Al을 증착 한후 양자교환이 이루어질 도파로를 형성 하기위하여, PR 작업을 거친후 포토리소그래픽 방식으로 도파로부분의 PR을 제거한 후 광 도파로를 그림2. 와 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 방식은¹¹⁾ 이러한 align 과정이 요구되지 않으므로 전극으로 이용되는 Al이 광도파로와 최대한 밀착되므로 전체의 효율을 높인데 매우 적절한 방법이다. 그림3.에서는 자기정렬방식을 이용한 광 스위치의 전극구조를 나타내었다.

3. 결합형 광 스위치 제작을 위한 양자교환 및 양자확산 공정

양자교환에 필요한 앰플을 제작하기 위하여 내경이 10[mm]인 파이렉스 튜브를 토오치로 가공하여 LiNbO₃ 시편과 벤젠산(C₆H₅COOH)을 넣어서 아래 사진 1. 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 양자교환¹²⁾이 일어난다. 그 다음 앰플을 식힌후 LiNbO₃ 시편을 꺼내어 임.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 확산하기 위하여 열처리 한후, 형성된 광 도파로의 굴절을 분포를 결정하게 된다. 양자교환 및 양자확산을 하기 위하여 이용된 Al 패턴을 직접전극으로 이용하므로 전극을 형성하기 위한 얼라인 과정이 요구되지 않는다¹³⁾. 기존의 전극형성의 단점은 도파로의 가장자리와 전극의 가장자리 부분이 정확히 얼라인 되지 않

므로 전체효율이 아주 적게 나타났다. 본 실험에서는 이러한 얼라인 과정이 요구되지 않으므로 전극으로 이용되는 Al이 광 도파로와 최대한 밀착되므로 전체의 효율을 높인데 매우 적절한 방식이다^{14, 15)}. 자기 정렬방식으로 제작된 시편은 크기가 작기때문에 취급하기가 매우 어려우며 충격에 깨어지기 쉬우므로 에폭시 기판에 부가적인 전극패드를 제작하여 패드위에 시편을 고정하였으며, 시편과 에폭시 패드와 의 본딩을 하기위하여(ZEBEX, MODEL ZB-202-L)을 이용하였다.

wafer cutting / cleaning

Al evaporating

PR coating

UV

photolithography

Al etching

waveguide pattern

그림 2. 양자교환에 의한 결합형 광 스위치의 제작과정

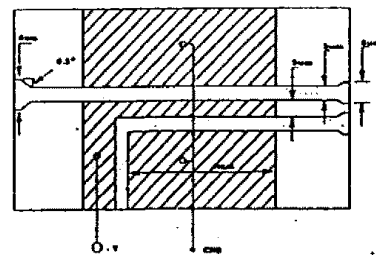


그림 3. 자기정렬방식을 이용한 결합형 광 스위치 구조

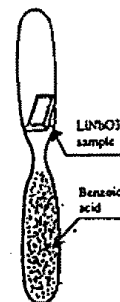


사진 1. 제작된 앰플

제 III 장 결과 및 고찰

1. 광 도파로의 X-선 회절분석

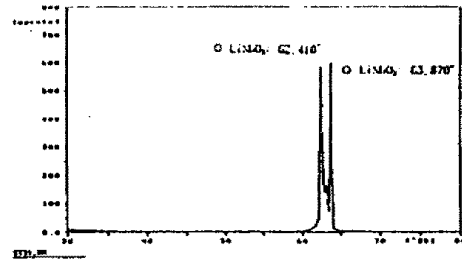
LiNbO₃기판을 이용한 광 스위치를 제작하기 위하여 양자교환후 양자확산된 광 도파로 부분에 대한 X-선 회절분석 실험을 하여 그 결과를 그림 5에 나타냈다. X-선 회절기는 PW 3710 Based 을 이용 하였으며, Cu 타겟을 사용하여 회절각도의 범위는 30° 에서 80°에 걸쳐서 측정 하였다. 그림4(a)에서는 LiNbO₃ 기판에 대한 X-선 회절분석 결과로 LiNbO₃ 결정분포가 62.410°와 63.870° 근처에서 피크를 형성하므로서 LiNbO₃ 기판이 균일한 결정구조를 갖고 있음을 확인할 수 있다. 그림 4(b)에서는 LiNbO₃ 기판에 광 도파로를 형성한 후 오일베스에서 150[℃] 로 120 분 양자교환된 기판을 X-선 회절분석한 결과로서 LiNbO₃결정분포가 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_{1-x}H_xNbO₃ 의 결정구조를 갖는 피크가 64.525° 에서 나타나므로 Li⁺ 이온과 H⁺ 이온이 치환된것을 확인할 수 있다. 그림 4(c)의 경우 150[℃] 120분 양자교환후 O₂ 분위기에서 400[℃]로 60분간 열처리하여 양자확산된 LiNbO₃의 X-선 회절결과로서 양자교환시의 62.760° 와 64.160° 와 64.525° 부근으로 다시 환원되어감을 확인할 수 있다.

여기서 Li⁺ 와 H⁺가 치환되는 양에 따라 피크의 밀도가 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(d)는 200[℃] 60분 양자교환된 기판으로 LiNbO₃ 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 나타났 다. 이러한 이유는 LiNbO₃ 기판을 양자교환에 적당한 시간과 온도에서 반응하여 양자교환이 이루어 졌음을 확인하여 주는 결과로서 양자교환 온도 및 시간에 따라 기판의 결정구조가 변하므로 굴절율에 의한 특성변화가 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 양자교환 온도가 높을수록 낮은 각도에서 양자교환이 빨리 이루어짐을 알 수 있다. 그림 4

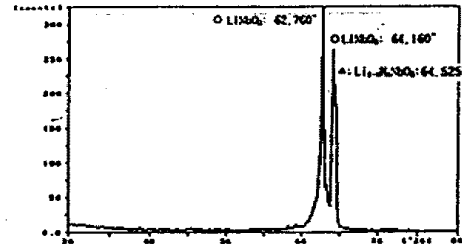
e)의 경우 200[℃] 60분 양자교환후 400[℃]로 60분간 열처리한 결과로서, 62.370° 와 63.395° 로 환원되어 감을 알 수 있고 치환된 피크의 밀도변화를 확인할 수 있다. 이러한 X-선 회절결과의 변화는 양자교환 후 적절한 온도에서 열처리함으로써 양자교환된 부분이 다시 안정된 결정구조로 형성되어 짐을 보여 주는 것으로, 그림 4(f)에서 양자교환 150[℃] 120 분, 200[℃] 60분 처리된 시편에 대한 결과를 비교하여 볼 수 있다.

그림 (b),(d)에서 양자교환 온도와 시간에 의해 치환된 양자의 편위각을 0.075° 의 편위된 각을 확인할 수 있다. 또한 (c),(e)의 경우 양자교환후 적절한 온도에서 열처리 하므로써 열처리를 하지않은 (b),(d)의 경우에 비해 결정성이 좋아지는 것을 볼 수 있다. 이와

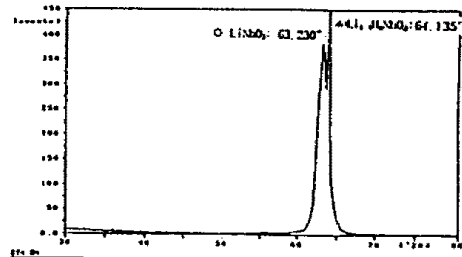
같은 결과는 H⁺ 이온이 치환되어도 LiNbO₃의 결정피크 이외의 다른 피크가 생성되는 것이 아니며, LiNbO₃ 일 정면의 피크가 성장하거나 또는 LiNbO₃ 의 결정피크들의 각도가 이동(shift) 되는 것으로 확인되어 진다. 따라서, 광 도파로의 굴절율 조절은 양자교환 온도와 시간 및 열처리에 의해 매우 큰 영향이 있음을 확인할 수 있다. 그러므로 양자교환 150[℃] 120분 때와 200[℃] 60분에서의 광 출력특성이 차이가 있는 것을 위의 결과에서 나타난 결과와 잘 일치되고 있음을 확인할 수 있다.



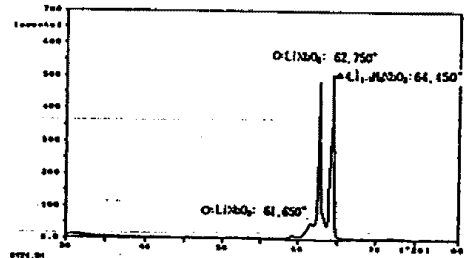
(a) 양자교환 전



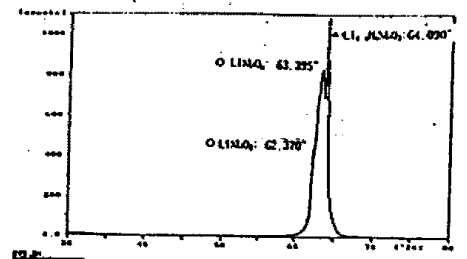
(b) 양자교환 후 (150[℃], 120[min]).



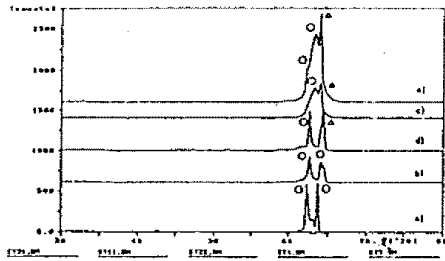
(c) 양자교환 후: 150[℃], 120[min]
양자확산: 400[℃], 60[min].



(d) 양자교환 후: 200[℃], 60[min].



(e) 양자교환 후: 200[℃], 60[min]
양자확산: 400[℃], 60[min].

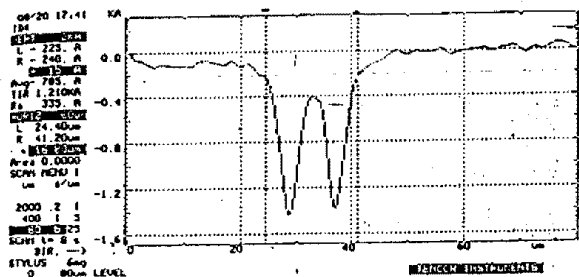


(f) 양자교환 전, 후 및 확산.

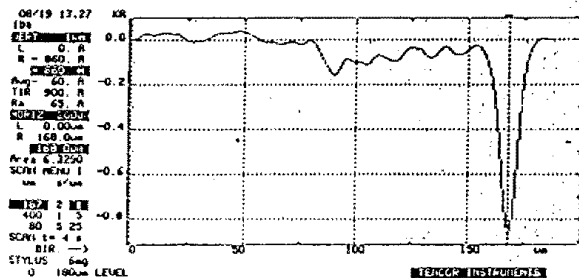
그림 4. LiNbO₃ 광 도파로의 X-선 회절분석

2. 광 도파로의 α-스텝과 SEM 관찰

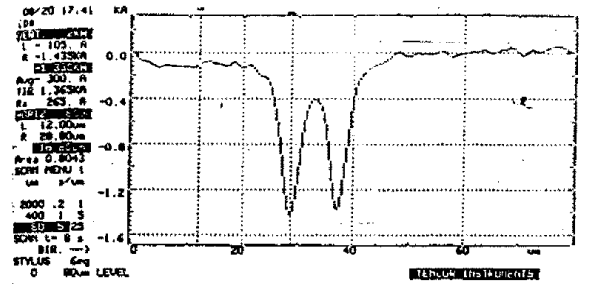
LiNbO₃기판에 양자교환에 의한 양자확산법을 이용하여 광도파로 폭이 5[μm]로 제작 되어진 도파로의 깊이와 도파로 폭을 측정하기 위하여 α-스텝을 사용하였다. 제작된 시편을 열처리함으로써 광 도파로의 폭과 도파로 깊이 조절 및 굴절율이 조정된다. 양자교환 200[°C], 60분 열처리 400[°C], 60분 동안 열처리한 결과 그림 5(a)에서는 광도파로 결합영역 범위에서의 W1과 W2의 폭이 5[μm] 설계조건에서 W1= 6.45[μm], W2=6.3[μm]로 다소 차이를 갖는 광 도파로폭과, 그림 5(c)에서는 도파로의 깊이는 W1이 1.435[KÅ]로 측정되었으며, 그림 5(d)에서는 W2가 1.380[KÅ]으로 약 0.055[KÅ]의 깊이 차이를 보였다. 따라서, 도파로 사이의 갭은 5[μm]에서 상대적으로 3.625[μm]의 값으로 적어지는 추이를 나타내고 있다. 그리고, 그림 5(b)는 입력단의 도파로 1을 나타낸 것으로 도파로 W1의 깊이가 860[Å]으로 나타난 α-스텝 그림이다. 입력측에 대한 도파로 깊이 측정값으로 결합영역에서 깊이 측정과 다른점은 공정과정의 적정온도 조건에 따른 차이로 추정된다.



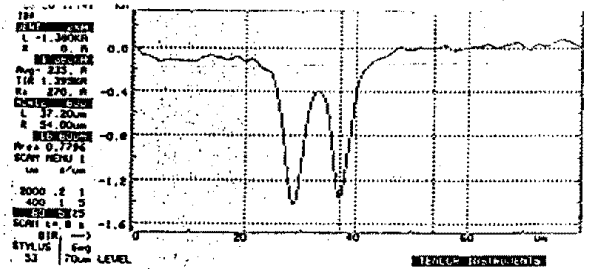
(a) 결합부분의 도파로폭



(b) 입력단 도파로 W1의 깊이



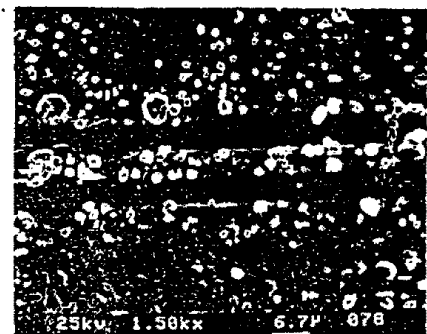
(c) 결합부분 도파로 W1의 깊이



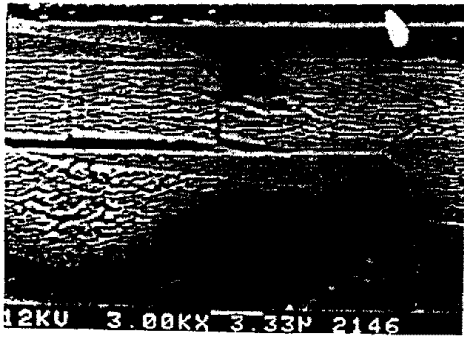
(d) 결합부분 도파로 W2의 깊이

그림 5. α-스텝을 이용한 도파로의 폭과 깊이

다음은, 제작된 광 스위치의 도파로를 확인하기 위한 시편의 표면사진으로 사진 2(a)는 양자교환된 시편의 광 도파로 표면사진으로 광 도파로의 폭이 설계 조건에서 5[μm]일 때 제작과정을 거친후 광 도파로를 확인하기 위하여 SEM (x1500)을 이용하였다. 사진 2(b)는 결합영역 길이에 전계을 가해주기 위해서 분리 갭이 형성된 부분으로 도파로의 폭과 분리 갭이 90°로 설계하여 입력 광의 손실을 최대한 줄여줄 수 있으며 결합길이 영역만전계를 인가하므로 전계효율을 극대화 할 수 있다. 또한 외부의 간섭에 의한 반사 파로 광 손실을 줄일 수 있다. 사진에서 나타난 도파로의 굴곡 상태는 광 스위치 공정처리 과정에서 도파로가 형성될 부분에 포토리소그래픽 방식에서 발생하는 오차와 알루미늄 에칭처리과정에서 습식 에칭처리함으로써 발생하는 오차로서, 이러한 도파로에 전송되는 광 신호는 전파손실을 갖게 되므로 추후 공정기술 및 장비여건에 따라 개선 될 수 있는 사항으로 본다. 시편위에 알루미늄이 산화된부분은 측정과정에서 전극의 표면이 노출되므로 전극이 점차적으로 산화되기 때문이다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 제작된 시편의 연결고정(package / pigtail) 작업이 요구된다. 제작된 광 스위치의 도파로폭 및 깊이가 일정치 않는 이유는 전기로내에서 온도와시간 조절은 비교적 잘 되지만, 시편을 넣고 꺼내는 과정에서 온도와 변화속도를 조절하기가 어려우므로 굴절율의 변화 및 도파로 폭과 깊이조절에 많은 영향이 있음을 알 수 있다.



(a) 결합부분 광 도파로의 표면



(b) 광 도파로 90° 분리 갭의 표면

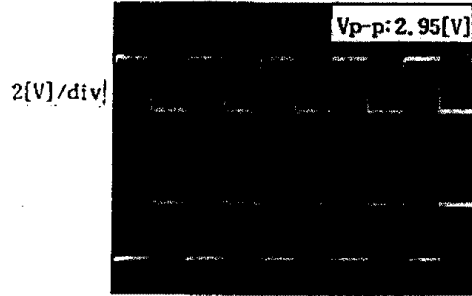
사진 2. 방향성 결합형 광 변조기의 표면사진

3. 결합형 광 스위치 특성 측정

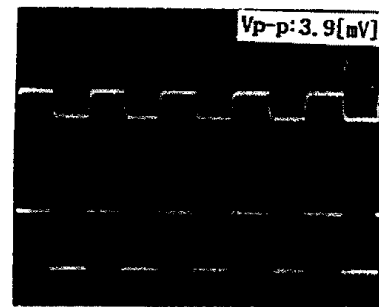
광 스위치는 결합영역에서의 좁은 간격 때문에 Z-cut LiNbO₃를 이용하여 수직 방향으로 전계를 가하는 형태가 일반적으로 대두 되고있다. 이때의 전극은 광 도파로를 완전히 만든 후에 전계의 효율을 고려하여 적절한 위치에 얼라인하여 만든다. 이러한 경우 수[μ m]의 폭과 수[mm]의 길이를 갖는 전극을 정확한 위치에 만들기가 어려우며 이로인해 전계의 효율도 감소한다. 본 실험에서 사용한 자기정렬 전극은 이러한 얼라이니 작업을 하지 않고 양자교환을 하기 위하여 마스크로 사용한 Si를 이용하였다. 전극이 광도파로와 최대한 밀착되므로 전계의 효율면에서 상당히 큰 효과를 갖게 된다. 따라서 이와같은 조건에서 제작된 광 스위치는 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 나가면서 천이된 광 출력이 최대가 되는 지점에서 전계를 가하여 위상 부정합으로 인한 스위칭을 시키는 것이다. 광 파워가 입력된 광 도파로 에서의 광 출력이 없어야 하지만 실험상에서 외부의 전계가 위상부정합을 상쇄하고 난 후에도 열처리를 이용하여 결합길이와 천이길이를 맞출 수 없기 때문에 남아있는 광 파워가 크로스토크로 작용한다. 사진3. 는 150[$^{\circ}$ C], 120분 양자교환하고, 400[$^{\circ}$ C], 60분 열처리한 조건이며, 사진4. 은 200[$^{\circ}$ C], 60분 양자교환 하고 400[$^{\circ}$ C], 60분 열처리 하였을때 각기 다른 시편에 대해서 구형파를 입력으로 가하였을때 on-off 하는 출력 광신호를 photo-diode로 잡은 파형을 나타낸 사진이다. 스위칭 전압 만큼의 Vp-p를 갖는 구형파가 주기적으로 가해짐에 따라 천이된 출력부 (transferred output port)와 입력장이 들어와서 천이되고 남은쪽의 출력(remained output port) 이 서로 상반되게 점멸하는것을 볼 수 있다. 따라서 아래의 표 1와 2은 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 스위칭이 일어나는 광 도파로의 전파손실이 다르기 때문이다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 입력단과 출력단의 두개의 즉 1X2 결합형 광 도파로가 같은 특성을 갖도록 제작상에 주의를 기울여야 할 것이다.

Table1. PE:150[$^{\circ}$ C], 120[$^{\circ}$ min], AT:400[$^{\circ}$ C], 60[$^{\circ}$ min].

	Vol/div	time base	V _{p-p} (input)	8[V]
A	5.0[V]	500[μ s]	V _{p-p} (W ₁)	2.95[V]
B	2.0[V]		V _{p-p} (W ₂)	3.9[mv]
C	5.0[mv]		Crosstalk	-28.8[dB]



a)입력 도파로(W₁)



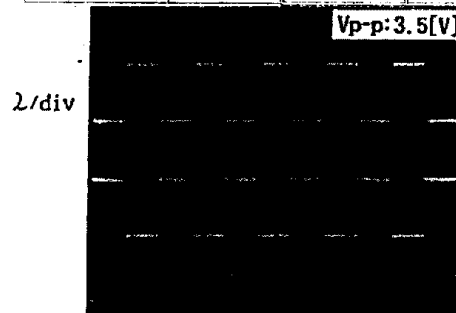
b)결합도파로(W₂)

사진 3. 구형파전압을 가했을때 광 도파로의 출력특성

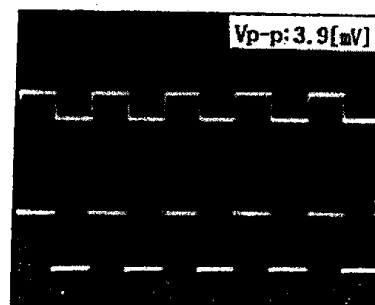
(PE: 150[$^{\circ}$ C], 120[$^{\circ}$ min], AT: 400[$^{\circ}$ C], 60[$^{\circ}$ min])

Table 2. PE:200[$^{\circ}$ C], 60[$^{\circ}$ min], AT:400[$^{\circ}$ C], 60[$^{\circ}$ min].

	Vol/div	time base	V _{p-p} (input)	8[V]
A	5.0[V]	500[μ s]	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)입력 도파로(W₁)



b)결합도파로(W₂)

사진 4. 구형파전압을 가했을 때 광 도파로의 출력특성
(PE: 200[°C], 60[min], AT: 400[°C], 60[min])

제 IV 장 결론

양자교환공정을 이용하여 전계효율을 최적화할 수 있는 자기정렬 전극구조를 갖는 결합형 광 스위치를 제작하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전계효율을 극대화하기 위하여 도파로 가장자리와 전극을 최대한 밀착시킬 수 있는 자기정렬방식을 적용함으로써, 부수적으로 마스크의 제작횟수를 최소화하여 공정과정을 개선하였다.
- 2) 광 도파로의 X-선 회절분석결과 62.410°와 63.870° 근처에서 결정분포가 형성되었으나, 양자교환조건 150[°C], 120[분], 처리된 기판은 62.760°와 64.160°로 결정분포 곡선이 형성되어 0.35° 및 0.29° 편위된 결과로 나타났다. 또한 양자교환을 하므로 $Li_{1-x}HxNbO_3$ 결정구조를 갖는 다른 분포곡선이 64.5625°에서 형성되므로 Li⁺이온과 H⁺이온이 치환되었음을 확인하였다.
- 3) 제작된 시편을 양자교환후 400[°C], 60[분] 조건에서 열처리한 결과 양자교환시의 편위각 범위로 환원되므로 광 도파로내의 양자분포 관계가 안정되어가고 Li⁺와 H⁺가 치환되는 양에 따라 도파로내의 밀도가 변화되어 가는 것을 확인하였다.
- 4) 양자교환조건 200[°C], 60[분]과 열처리조건 400[°C], 60[분] 으로 처리한 시편을 선택하여 광 도파로를 SEM과 α -스텝으로 관찰한 결과, 실제로 제작된 도파로 1과 2의 폭이 5[μ m]로부터 각각 6.45[μ m], 6.3[μ m]로 증가되었고, 도파로 깊이는 각각 1.435[k μ m] 및 1.380[k μ m]으로 측정되어 0.055[k μ m]의 차이가 발생됨을 확인하였다. 따라서 도파로 폭 및 깊이의 변화는 광출력의 변화를 초래하여 출력모드의 변화요인으로 작용하였다.
- 5) 시험제작한 결합형 광 스위치는 8[V]의 구동전압으로 스위칭현상이 발생됨을 확인하였으며, 그 출력특성은 Pr(W₁)과 Pt(W₂)에서 각각 3.5[V]와 3.9[mV]의 전압값으로 측정되었고 이때의 출력 크로스토크값은 -29.5[dB]임을 확인하였다.

참 고 문 헌

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. H. Yasaka, Y. Yoshikuni, M. Watanabe, "Measurement of Gain Saturation Coefficient of a DFB Laser Mode Control by Orthogonal Polarization Light," IEEE J. Quantum Electron., vol. 27, pp. 2248-2255, Oct. 1991
3. J. E. A. Whiteaway, B. Garrett, G. H. B. Thompson, A. J. Collar, C. J. Armistead, and M. J. Frice, "The Static and Dynamic Characteristics of Single and Multiple Phase-Shifted DFB Laser Structures," IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, pp. 1277-1293, May. 1992

4. L. McCaugham, "Low-loss Polarization-independent electrooptical switches at $\lambda=1.3$ micron," J. Lightwave Technol., Vol. LT-2, pp. 51-52, 1984
5. 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.
6. J. A. Fleck and M. D. Feit, "Beam propagation in uniaxial anisotropic media," J. Soc. Vol. 73, pp. 920-926, 1983.
7. R. C. Allferness, C. H. Joyner, L. Buhl, S. K. Korky, "High-speed Traveling Wave directional coupler switch/modulator for $\lambda=1.32 \mu$ m," IEEE J of Quantum electronics, Vol. 19, pp. 1339-1341, 1983.
8. 장용용, 채기병, 강기성, 소대화, "X-스위칭 광 변조기의 설계 및 분석," 한국전기전자재료학회 지 제 4권, 3호, pp. 249-258, 1991.
9. 소대화, 강기성, 채기병, 장용용, "BPM 알고리즘을 이용한 LiNbO₃ 광 스위치 전계분포와 굴절률 변화의 연구." 한국전기전자 재료학회 춘계발표회 논문집 pp. 38- 42, 1991.
10. L. Thylen, "Intergrated optics in LiNbO₃ Recent developments in devices for telecommunications," J. Lightwave Technol., vol. 6, pp. 847-861, 1988.
11. 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, china. PP. 489-497, 1994.
12. 김 창 민, "집적광학 기술의 발전동향," 한국통신학회지 제 10권, 제8호, pp. 51-53, 1993.
13. T. R. Ranganath, S. Wang, "Suppression of LiO₂ out-diffusion from Ti diffused LiNbO₃ optical waveguides," Applied Physics Lett., Vol. 30, No. 8 pp. 376-379, 1977.
14. A. Campari, C. Ferrari, G. Mazzi, C. Summonte, S. M. Al-shukri, A. Dawar, R. M. De La Rue, A. C. G. Nutt, "Strain and surface damage induced by exchange in Y-cut LiNbO₃," J. Soc, Vol. 58, No. 12 pp. 4521-4524, 1985.
15. A. L. Dawar, S. M. Shukri, and R. M. DeLaRue, "Guided-wave acoustooptic interaction in Proton exchanged Y-cut LiNbO₃," Appl. Phys. Lett., vol. 1, 48, pp. 1579-1581, 1986.