

Air 분위기로 제작한 Ti:LiNbO₃ 도파로 특성 및 폴리싱 방법제안

10-7-6

Properties of Ti:LiNbO₃ Optical Waveguide by Diffusion in Air Atmosphere and Proposal of a Polishing Method

김성구*, 윤형도*, 윤대원*, 한상필*, 박계춘**, 유용택***

(Seong -Ku Kim, Hyung-Do Yoon, Dae-Won Yoon, Sang-Pill Han, Gye-Choon Park, Yong-Tek Yoo)

Abstract

We have investigated the guided optical properties of a Ti:LiNbO₃ optical waveguide which was fabricated by Ti-diffusion in an air atmosphere and proposed an effective polishing method of waveguide endfaces. And the results of guided optical mode and fabrication conditions were obtained as follows ;

- ① propagation loss : 0.53 dB/cm
- ② mode size : horizontal/vertical=12.5 μ m/11.2 μ m
- ③ mode mismatch : 1.7 dB
- ④ diffusion temperature : 1050 $^{\circ}$ C, time : 8 hours
- ⑤ atmosphere : air

Keywords(중요용어): Ti:LiNbO₃ optical waveguide(티타늄확산 광도파로), Propagation loss(전송손실), Polishing method(폴리싱 방법), Mode mismatch(모드불일치), Mode size(모드크기), Waveguide endfaces(도파로 끝면).

I. 서 론

1974년 Bell 연구소에서 LiNbO₃에 Ti을 확산시켜 양호한 광도파로를 형성하는 방법이 보고됨으로서 이 기술을 응용한 planar 광기능소자를 제작할 수 있게 되어 초창기 광도파로소자 연구 붐을 조성하였다. 1980년대는 도파로 제작기술이 일반화되었고 각종 기능성소자 제작이 가능하게 되었으며, 1990년대 초 이미 다가올 21세기를 화려한 초고속, 대용량 광통신시대로 규정하고 이를 구현할 각종 모듈개발에 박차를 가하여 왔다. 현재 이런 저변기술이 집약되어 집적화 단계로 이어지고 있으며 도파로를 제작하는 방법도 다양하게 보고되고 있다. LiNbO₃ 도파로 기술 이외에 planar lightwave circuit(PLC)등이 중

요시되고 있으며 또한 폴리머 광도파로도 상용화 가능성을 보이고 있는 시점이다¹⁾.

Ti 내부확산으로 제작된 광도파로는 다른방식으로 제작된 광도파로와 비교해볼 때 더 좋은 특성을 나타낸다고 알려져 있으며²⁾ 제작된 도파로의 광특성, x-ray 결정분석 및 도파로 저손실화를 위한 노력이 광범위하게 진행되어 왔다. 이러한 연구결과로 각종 기능을 수행하는 광부품이 제작되어 상품화되었으며 PLC(planar lightwave circuit) 기술등과 결합시켜 고기능 하이브리드소자로 이어지는 추세에 있다^{3,4)}.

본 연구에서는 광소자로 광범위한 응용이 이뤄지고 있는 Ti 확산 광도파로를 z-cut LiNbO₃에 제작하고 특성을 분석하였으며, 재현성 있는 도파로 폴리싱 방법을 제시하고자 한다.

II. 실험 및 방법

본 연구에서는 3인치 Z-cut LiNbO₃ 기판을 사용하였고, 그 위에 형성될 Ti 도파로를 그림1(b)와 같이 설계하여 패턴화하였다. 세부 도파로 폭은 7과 8

* : 전자부품종합기술연구소

** : 목포대학교 전기공학과

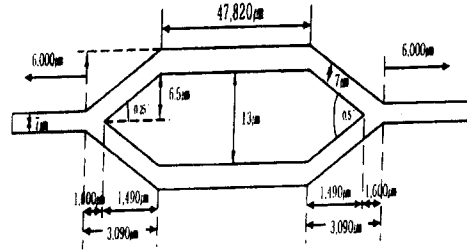
*** : 전남대학교 전자공학과

접수일자 : 1997년 6월 2일

심사완료 : 1997년 8월 16일

μm 를 채용하였고 Y-분기 각도는 0.5° 로 하였다. 전체 평행 ARM 길이는 $47,820\mu\text{m}$, 도파로 간격은 10, 13, $15\mu\text{m}$ 로 분리, 설계하였다. 그리고 포토마스크에 마크젠더 간섭형 및 단일채널 도파로를 각각 설계하여 광과장 $1.55\mu\text{m}$ 에서 단일 모드조건을 실험하였다. 패턴 형성 작업은 전자빔 증착기로 $800\text{--}1000\text{\AA}$ 로 증착하여 두께 측정기로 측정 후 공정에 사용하였다.

일반적으로 Ti 선폭 증가는 횡방향 마스크기를 증대시키며 광파이버와 삽입손실 증대, 다모드화로 진행할 수 있다. 지금까지 발표결과를 검토해보면 도파로 선폭 7 및 $8\mu\text{m}$ 일 때 단일모드특성이 좋으며 광파이버와 접속을 양호하게 지지하는 것으로 나타나고 있다. 또한 Ti 두께 증가에 따라 확산깊이 증가 및 종모드크기 증가가 이뤄지며 구동전압 증대를 낳기 때문에 최적 공정 제어가 필수적이다. 그리고 전자빔 증착기로 증착되는 Ti 패턴과 스퍼터링 제작 패턴사이엔 Ti 밀도차가 존재함으로 실험조건 설정에 주의해야한다⁵⁾.

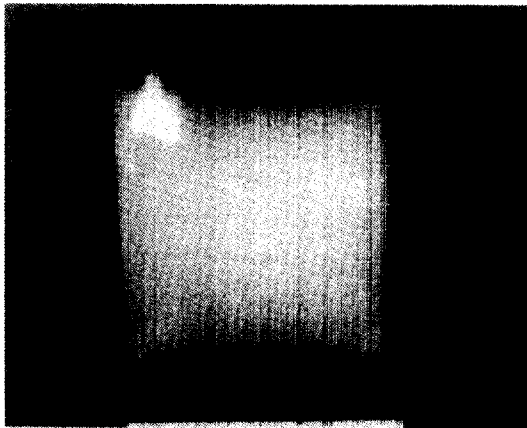


(c) 설계치수

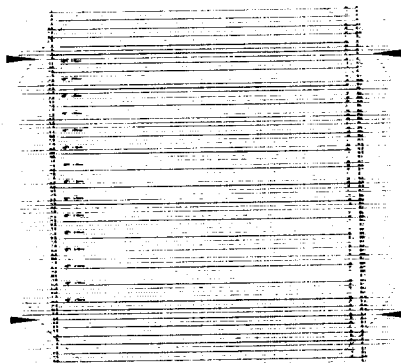
그림 1. 광도파로 마스크 및 설계치수
Fig. 1. Design mask and dimensions

확산온도 및 시간에 따른 도파모드크기가 증가 됨으로 장시간확산은 다중모드생성으로 이어질 수 있다. 일반적으로 알려진 단일도파로 생성조건은 스퍼터링으로 제작하는 경우 두께 800\AA 정도에서 약 10시간 수증기를 머금은 산소분위기로 제작되는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 본 연구에서도 공기분위기 및 수증기가 함유된 산소분위기로 반복 실험을 거쳤으며 여기서는 공기분위기로 제작한 광도파로 특성에 관한 내용을 수록하였고, 특히 내부확산 중에 발생하는 Li 외확산을 억제할 수 있는 확산방법을 제시하였다.

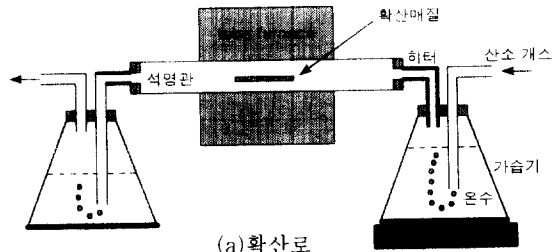
그림 2는 확산에 이용한 구경 6인치 튜브확산로 및 확산 온도구배를 나타내었고, 그림 3에 Li 외부확산을 억제시키기 위한 확산모형을 제시하였다. 그림 3에서 보는바와 같이 3인치 기판 바로위 수 μm 위치



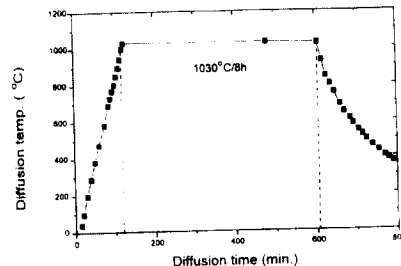
(a) 3-인치 웨이퍼



(b) 마스크 설계



(a) 확산로



(b) 온도변화

그림 2. 확산로 구조 및 온도변화
Fig. 2. Tube furnace and temperature variation

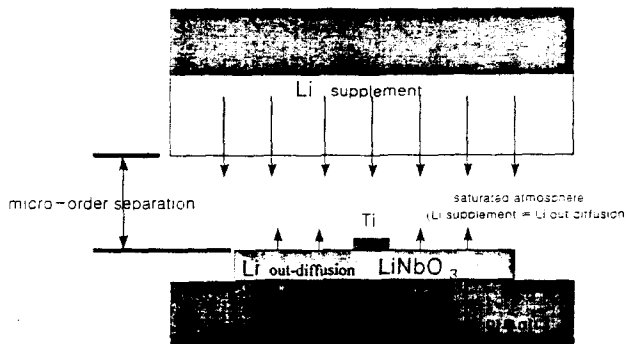


그림 3. Li 외확산 억제방법 제시
Fig. 3. Suppression model of Li out-diffusion

에 전면적에 걸쳐 Li 을 공급하는 형태로 Li 의부확산을 효과적으로 저지할 수 있다.

표 1에는 시편번호 P0과 P1의 제작조건을 나타내었다. 두 시편모두 공기중에서 확산하였으나, 다른 점은 P1이 Li 외확산을 억제할 것으로 기대되는 그림 3 방법으로 확산한 점이 다르다.

표 1. LiNbO₃ 광도파로 제작조건

Table 1. Process parameter of LiNbO₃ waveguide

기판이름(cut/두께)	P0(Z/O5)	P1(Z/O)
확산재 Ti 두께(확산후두께), Å	729(534)	951(580)
도파로 폭, μm	7, 8	7, 8
도파로 길이, cm	6	6
확산온도, °C	1050	1050
확산시간, hour	7	8
분위기	공기중 확산	공기중 확산, Li 외확산 억제

표 2. 폴리싱단계

Table 2. Steps of polishing

단계	SIC-PAPER, GRAIN SIZE	다이어본드-PASTE
1	300번(27μm이상/500번(22-27μm))	
2	1000번(8-11μm), 20분	
3	2000번(5-8μm), 20분	
4	2400번(5-7μm), 20분	
5		1μm, 20분
6		1/4μm, 20분

표 2에 확산 후 단면 폴리싱방법에 관하여 요약하

였으며 그림4에 이미 잘알려진 연마방법을 나타내었다. 먼저 도파로 기판에 먼저 준비한 LiNbO₃ DUMMY 블록을 덧붙이고 UV-에폭시로 경화시킨 다음 미세절단기로 자른다. 그리고 그 파단면을 표 2에서 제시한 방법으로 폴리싱하여 시편준비를 완료하고 그 연마단면을 그림 5에 나타내었다. 대부분 시편들의 단면은 거칠었고 도파광의 산란을 일으켰으며 무엇보다도 재현성이 부족하였다.

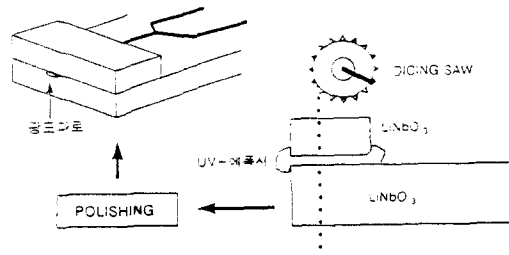
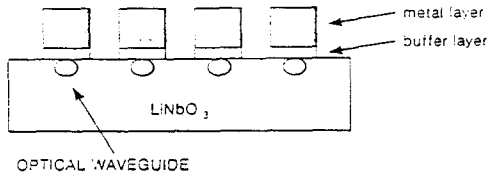


그림 4. 기판절단 및 연마
Fig. 4. Dicing and polishing

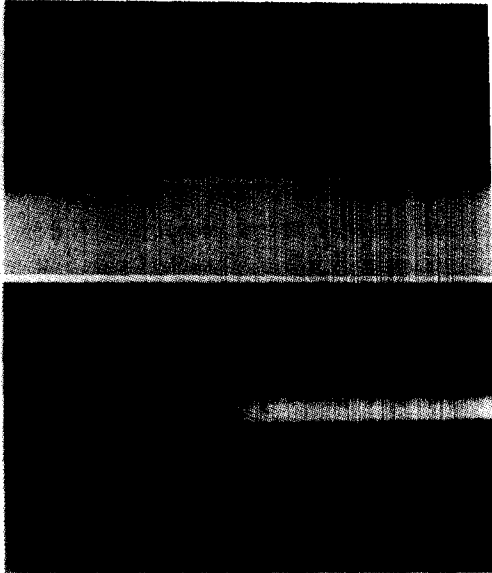


그림 5. 그림 4로 폴리싱한 단면사진(× 800)
Fig. 5. Polishing photograph of waveguide cross-section(×800)

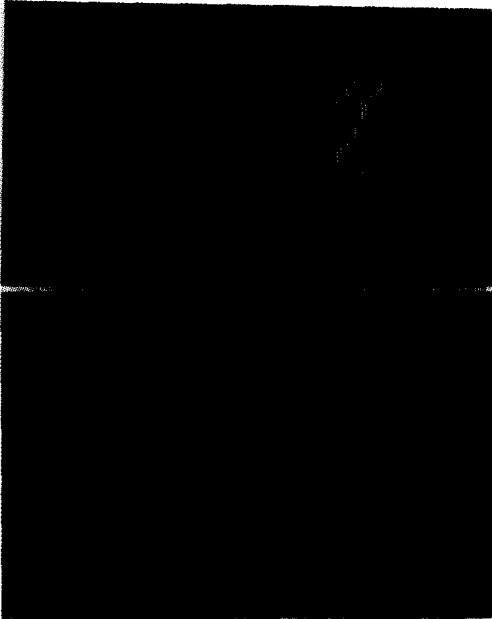
본 연구에서는 재현성있는 폴리싱방법을 연구하였으며 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 먼저 도파로와 금속박막에 의한 광파손을 차단하기 위해서 비퍼층을 수μm로 증착하고 그 위에 두꺼운 금속막을 다시 형성하여 패턴화하였다. 그리고 이 끝을 그림 6(c)에 나타낸 지그에 얹고 고정하여 폴리싱하였다. 이 기법으로 한꺼번에 변조기용 도파로 내부칩을 모두 균일하게 연마할 수 있었다. 그림 6(b)는 연마후 금속패턴 부근을 현미경사진으로 ×800 배 확대한 것이며, 금속박막이 있는 곳은 매우 균일하게 연마되지만 그외 부분은 거칠기가 매우 심하게 나타났



(a) 본 연구에서 제안한 폴리싱 방법

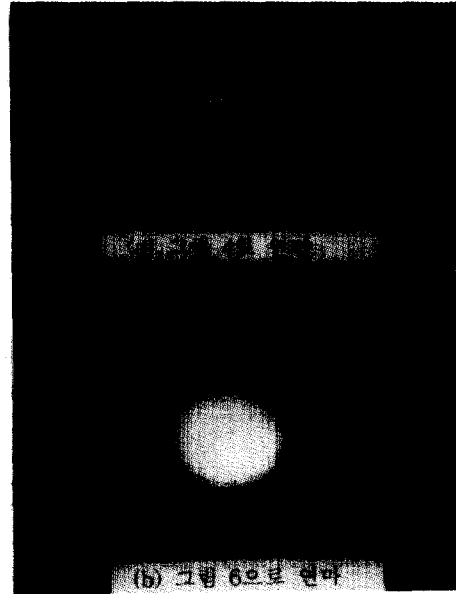


(b) 폴리싱 후 단면사진(×800)



(c) 제작한 폴리싱 지그

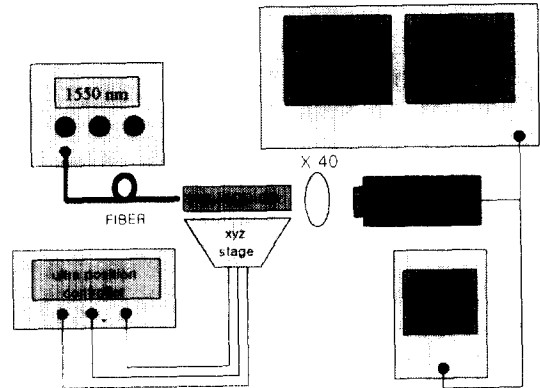
그림 6. 폴리싱방법제안 및 8° 폴리싱지그 사진
Fig. 6. Suggestion of a polishing method, photographs of its polishing section and zigs.



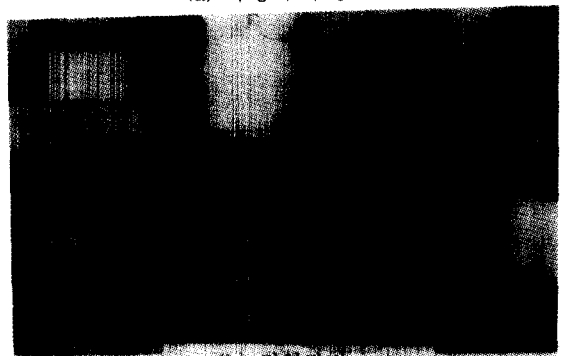
(b) 그림 6으로 연마

그림 7. 폴리싱 시편 모드비교

Fig. 7. Modes of polishing sample by fig.4 and fig. 6



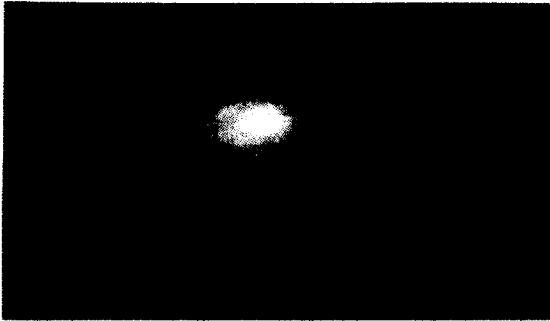
(a) 측정기 구성도



(b) 정렬장비

그림 8. 광도파로 모드, 삽입손실 측정방법 및 장비
Fig. 8. Measurement set of optical mode, insertion loss.

그림 7은 똑같은 시편을 그림 4와 6으로 연마했을 때 도파광 형태를 나타낸 것이다. 그림 4로 연마시 모두 거친 것은 아니지만 측면평활도는 그림 6의 경우와 비교가 되지 않았다. 그림 8은 도파광모드를 측정하기 위한 장비세트를 나타내고 있다. 측정방법은 PM 파이버를 레이저출력단자와 도파로 입력단자에 밀착시켜 연결하고 도파로 출력단자에서 출사되는 광원을 40배 렌즈로 확대한 다음 CCD 카메라를 부착한 컴퓨터로 모드 및 크기를 측정하였다. 삽입



Mode profile of waveguide (wx=12.67 wy=14.12)

손실을 측정할 때 도파로와 파이버 사이에 굴절율정합매칭 오일을 사용하면 그렇지 않은 경우에 비해서 약 25% 이상 광삽입손실이 줄어든다. 그러나 본 연구에서는 매칭용오일을 사용하지 않고 측정치를 기록하였다.

III. 결과 및 고찰

그림 9는 연마상태가 고르지 못한 단일채널도파로의 모드 profile 이며, 출력단에서 모드사진과 수평측면방향, 깊이방향 강도분포 및 수직투사도를 나타내었다. 여기서 얻어진 측면 및 깊이방향 데이터를 분석하여 광강도가 $1/e^2$ 되는 (W_x, W_y)를 구하고 모드 MISMATCH 계산에 사용하였다. 사용한 레이저는 1550nm를 공급하는 Tunable Laser Source 이다. 모드수평방향은 가우시안형태를 취하고 있으며 수직방향은 헬릿가우시안 형태를 보여주고 있다.

그림 10은 마크젠다 간섭기형 광도파로 중앙부를 절단하고 그 모드형태를 알아보고자 도파광을 입사시켰다. 시편 P0, P1 모두 단일모드 형태를 나타냈고 마크젠다 간섭기형 두 평행 arm 에서도 단일모

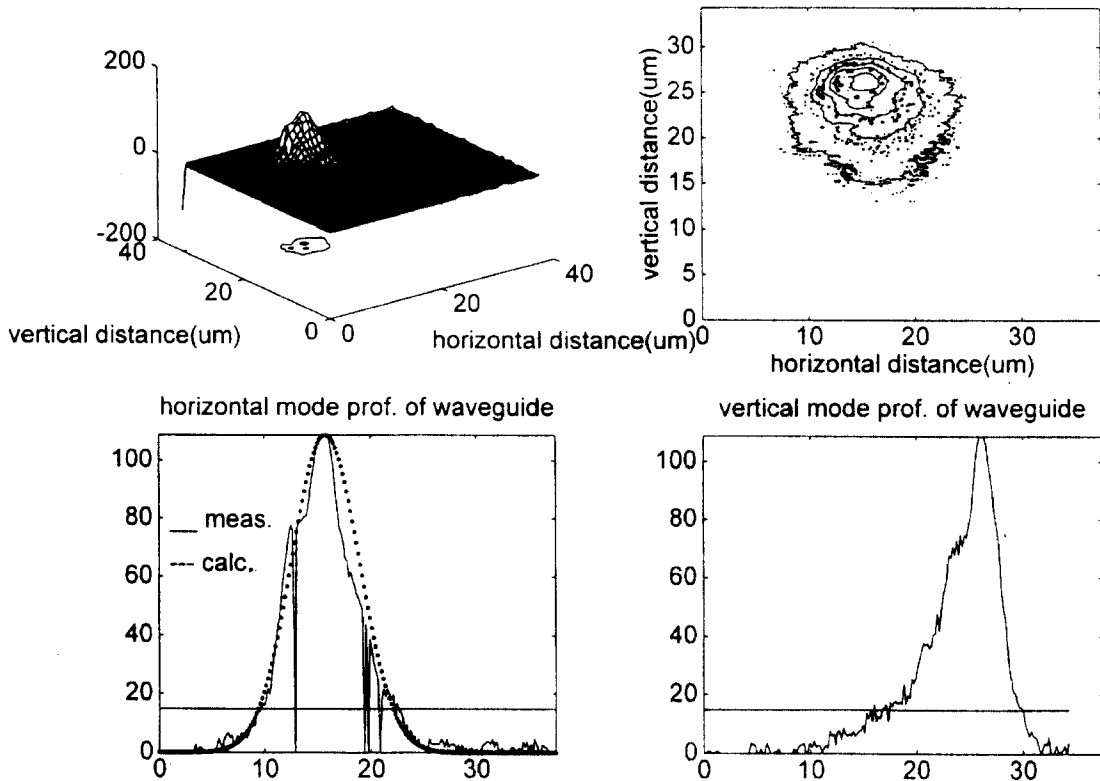
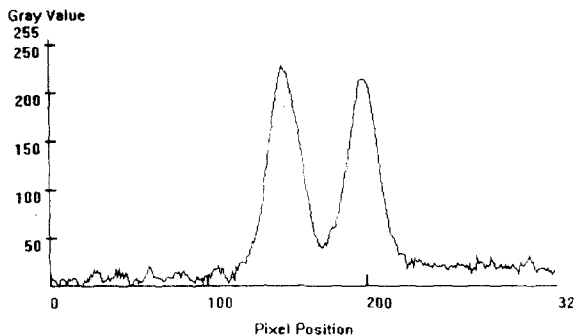
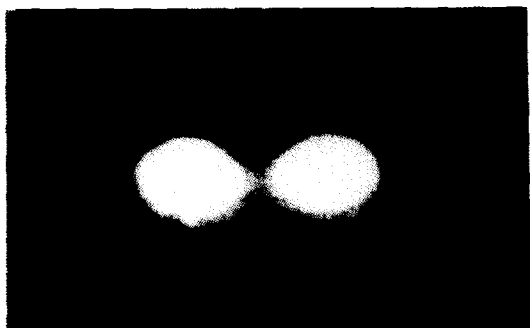


그림 9. 연마불량인 경우 도파모드 및 profile.

Fig. 9. Waveguide mode and profiles of a sample with poor polishing.



Mode profile of Y-branch waveguide

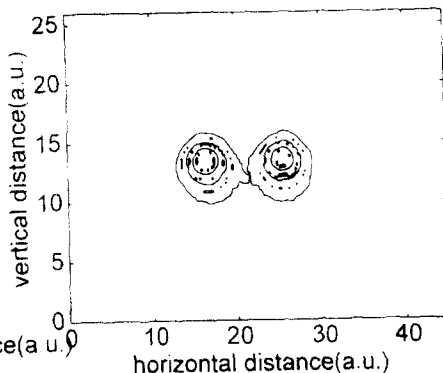
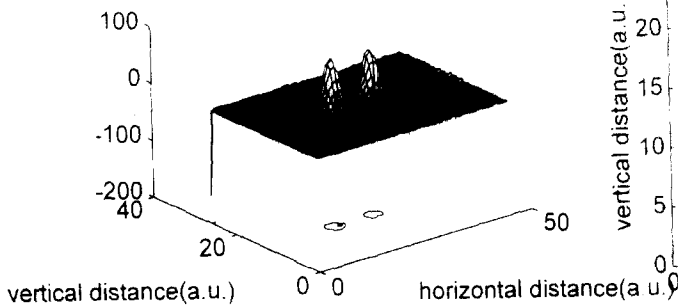


그림 10. 마크젠다 Y-분지 도파모드 및 profile.
 Fig. 10. Waveguide mode and profiles of mach zehnder Y-branch.

도도파를 확인하였다. 그러나 마크젠다 간섭기의 평행 arm 에서 두 채널사이 에 약간씩 커플링이 발생하는 것으로 보이며 따라서 확산시간과 온도를 조절해야 할 것으로 판단되었다.

본 연구에서 사용한 Tunable Laser는 출사되는 광원이 TE 모드가 강한 무편광으로 출사됨으로 도파로 입력단에서는 그 모드를 TM 으로 변환후 입사시켰으며 도파로 출력단에서는 편광자를 사용하여 TM/TE 모드를 편광시킨다음 CCD 카메라에 입사시켰다. 손실측정은 TM 모드 기준으로 삼입손실, 모드 불일치를 측정하였다. 입사광원이 TE 모드일때도 도파로는 단일모드를 명확히 나타내었으나, 횡방향과 종방향 크기는 TM 모드보다도 작았다. 그리고 도파로 입력측에 접속되는 PM 파이버의 위치에 따라 마크젠다간섭기의 두 arm을 지나는 광세기가 차이나게된다. 이 점은 마크젠다간섭기 위에 전극을 제작하고 변조를 행하는 광소자인 경우 두 arm을 지나가는 광세기 불균일로 오동작을 일으킬 확률이 높

다. 이를 개선하기 위해서 도파로 치수, Y-분기 및 연마각도 등에 대한 고찰이 필요하며 파이버접속시 광소자의 소광비가 최대가 되는 위치를 찾아야 한다.

그림 11은 단일채널 도파로의 모드 profile을 나타내었다. 마크젠다 간섭기형 도파로의 양단모드는 약간 수평타원체인 반면에 단일채널도파로는 거의완전 구형에 가깝게 분포되었다. 그림 12는 모드크기 및 모드불일치 계산에 기준으로 사용한 PM 파이버 끝단에서 출사되는 광원을 분석한 그림이다. 단일모드 광파이버 코어는 8-10 μ m이며 이 값을 그림 12에서 얻어진 데이터에 FITTING 한 후, 1개 픽셀당 크기를 측정하고 계산에 활용하였다.

표 3에 제작된 도파로의 도파특성을 나타내었다. P0는 전송손실 1dB/cm를 나타내었고 시편 P1은 0.53 dB/cm를 나타내어 본 연구에서 제시한 Li 공급하면서 공기중 확산한 제작방법도 <1dB/cm 광도파로를 제작할 수 있음을 확인하였다. 여기서 전송손실을

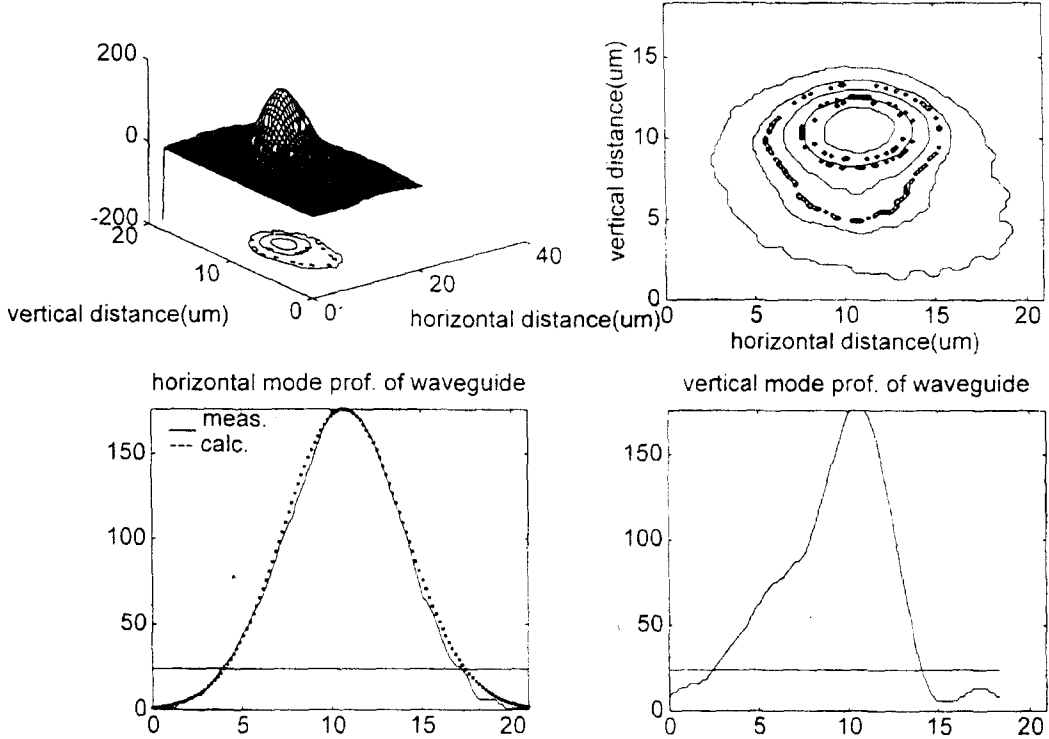
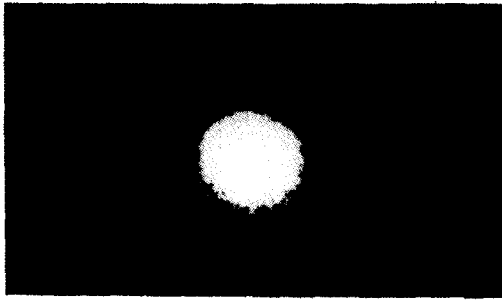


그림 11. 단일채널도파로 도파모드 및 profile
Fig. 11. Waveguide mode and profiles of single channel

표 3. 광도파로 특성분석
Table 3. Optical waveguide properties

특성	P0	P1
fiber to waveguide couple	5.5 dB (TM) / 3cm	-4.35 dB (TM) / 6 cm
mode size(W_x , W_y / W_x , W_y 중추)	12.67/14.12	12.5 / 11.2
mode mismatch	2.3	1.7 dB
propagation loss	1.0 dB/cm	0.5 dB/cm

☞ fiber : PMF, W_x, W_y : 1/e 광강도

계산할 때 프레넬손실(1550nm에서 1.3dB)을 제외하였다. 그리고 Li를 공급하지않는 시편보다도 Li를 공급하면서 제작한 시편이 훨씬 우수한 결과를 나타내었다.

그림 13은 확산전후의 도파로 두께분포 및 표면사진을 나타내었다. 확산전 도파로는 뚜렷한 경계가 있으나, 확산 후 모양은 많은 변화를 하게된다. 측면 방향으로 Ti 선확장이 생기고 전체두께는 내려앉는다. 이와같이 확산메카니즘에 의해서 Ti는 깊이 및 측면으로 확산하게 되는데, 확산표면은 매끄럽고 삼각형모양의 기복이 발생하지 않는 것이 광도파로손실

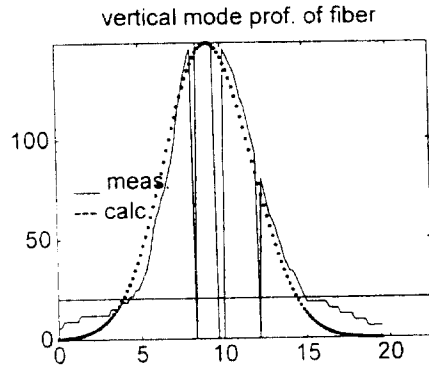
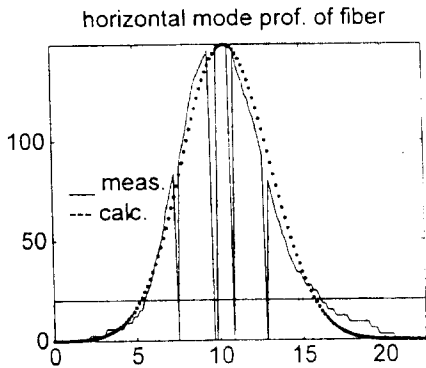
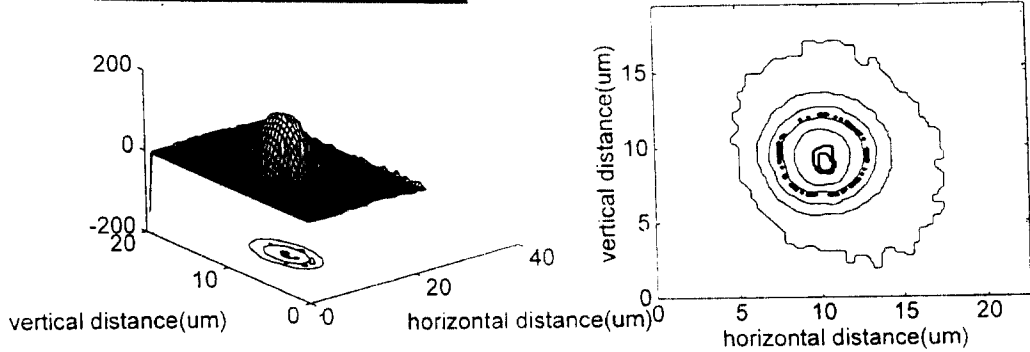
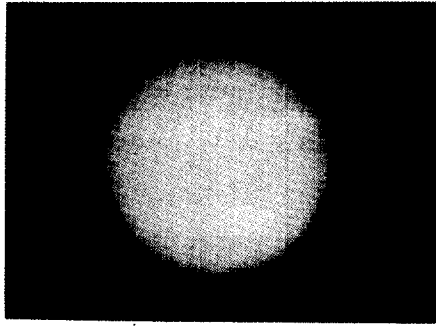
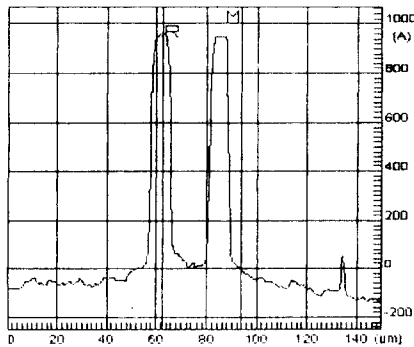
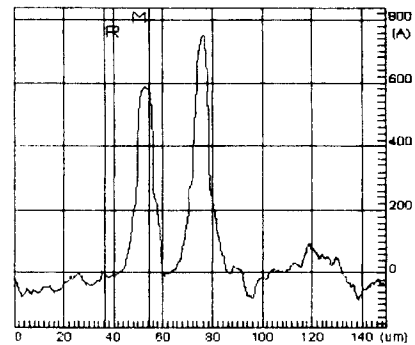


그림 12. 기준광원으로 사용한 광파이버 모드 및 profile
 Fig. 12. Reference mode and profiles of single mode fiber(PMF)



(a) 확산 前 두께



(b) 확산 後 두께

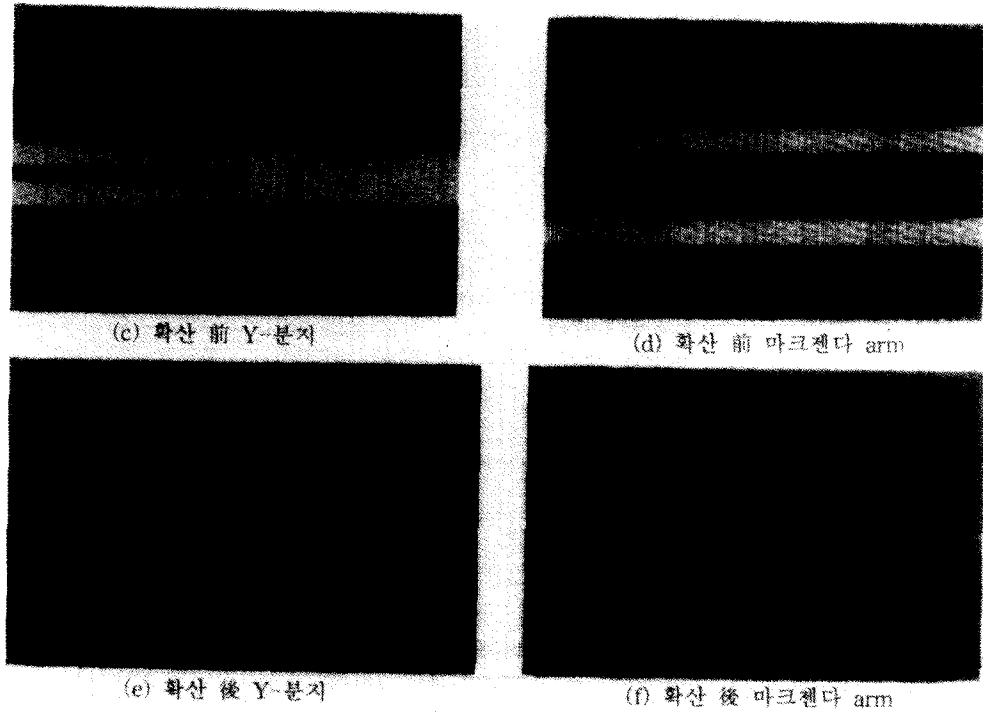


그림 13. 확산전 후 시편사진(P1)
Fig. 13. Photographs of sample(P1)

을 더욱 줄일 수 있어 조건분석이 필요하다. 확산 후 도파로부분은 잔류 Ti 량은 거의 없었다. 본 실험에서 제작한 시편을 Electron probe method로 측정했을 때 표면 Ti 량은 <<10 % 로서 측정이 되지 않았다. 따라서 확산 후 표면형상은 복잡한 확산메카니즘에 의한 Ti 스트립 흔적이라고 할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 z-cut LiNbO₃ 에 Ti을 1050℃에서 8시간동안 공기분위기로 열확산하여 광도파로를 제작하였으며 그 도파특성을 분석하였다. 그리고 광도파로의 단면을 효과적으로 연마하는 방법도 제안하였다. 본 논문에서 제작한 광도파로의 특성 및 제작조건을 요약하면 다음과 같다.

- ① 도파로 폭은 7 및 8 μ m 로서 단일채널 광도파로와 마크젠다 간섭기형 광도파로에 1550nm를 입사시켰을 때 단일모드 제작조건을 확인하였다.
- ② 도파로 제작시 우려되는 Li 외부확산을 억제하고 <1 dB/cm 로 제작하는 광도파로 제작방법을 제시하였다.

- ③ Ti 두께 900Å을 1050℃에서 8시간 확산했을 때 전송손실은 0.5 dB/cm, 모드크기는 횡축/종축=12.5/11.2 μ m, 모드불일치는 1.7 dB를 나타내었다.
- ④ 매우 우수한 폴리싱단면을 얻을 수 있는 광도파로 폴리싱방법을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. 김성구, 윤형도, 윤대원, 한상필, 허현, 유용택, "Mach-Zehnder LiNbO₃:Ti 광도파로 제작 및 특성", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회, OA-4, 1997.
2. Juichi Noda and Masaharu Fukuma, "Phase matching temperature variation of second-harmonic generation in Li out diffusion LiNbO₃ layers", J.Appl.Phys.51(3), pp.1379-1384, 1980.
3. 김성구, 윤형도, 윤대원 "LiNbO₃ 수동광부품기술", 월간 전자부품, 1997년 5월호, pp.26-40.
4. 김성구, 윤형도, 윤대원, "PLC 기술과 WDM 응용", 월간 전자부품, 1997년 7월호, pp. 109-119.
5. 전자부품종합기술연구소, "B-ISDN 공동연구개발

사업, 수동광부품개발 최종년도 보고서” KETI-RD-96091.

- 6. 김성구, 윤형도, 윤대원, “광소자용 Ti-내부 확산 광도파로 최적조건”, PHOTONICS CONFERENCE'95, pp.249-250

시사 소개



김성구

1966년 1월 10일생. 1996년 2월 전남대학교 전기공학과 박사학위취득. 1997년 8월 현재 전자부품종합기술연구소, 부품1팀 연구원. 주관심분야 : Integrated Optics 및 Passive Device



한상필

1964년 5월 9일생. 1997년 2월 서울시립대학교 전기공학과 박사과정 수료. 1997년 8월 현재 전자부품종합기술연구소, 부품1팀 연구원. 주관심분야 : Integrated Optics 및 Passive Device



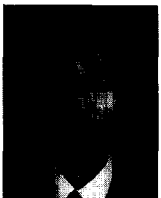
윤형도

1966년 5월 7일생. 1997년 3월 성균관대학교 전기공학과 박사과정 입학. 1997년 8월 현재 전자부품종합기술연구소, 부품1팀 연구원. 주관심분야 : Integrated Optics 및 Passive Device



박계준

1960년 8월 11일생. 1994년 8월 전남대학교 전기공학과 박사학위취득. 1997년 8월 현재 목포대학교 전기공학과 조교수. 주관심분야 : Integrated Optics, Photoelectric Materials and Device



윤대원

1949년 10월 14일생. 1988년 Texas A&M 대학교 전기공학과 박사학위취득. 1997년 8월 현재 전자부품종합기술연구소 부품연구 본부장. 주관심분야 : Integrated Optics 및 Passive Device



유용택

1933년 8월 19일생. 현재 전남대학교 공대 전자공학과 교수. 전기전자재료학회지 1996년 Vol.9, No.1, pp.51-58 참조