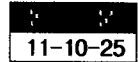


Wet Oxygen 분위기로 제작한 z-cut Ti:LiNbO₃ 도파로 광특성 및 두께에 따른 삽입 손실



z-cut Ti:LiNbO₃ Waveguide Optical Properties and Insertion Loss As a Function of Ti thickness Fabricated by Wet Oxygen Atmosphere

김성구*, 윤형도*, 윤대원*, 박계춘**, 정해덕**, 이진**

(Seong-Ku Kim, Hyung-Do Yoon, Dae-Woon Yoon, Gye-Chun Park, Hae-Duk Jung, Jin Lee)

Abstract

Ti:LiNbO₃ optical waveguides have been fabricated by Ti-diffusion in wet oxygen atmosphere. The fabrication conditions of furnace temperature, diffusion time and bubbler temperature were 1050°C, 8 hours and 90°C, respectively and Ti thickness was varied from 700Å to 1500Å. In this paper, the nearfield patterns, mode sizes(horizantal/vertical) and insertion loss of waveguides were discussed at wavelength 1550 nm as a function of Ti thickness. With the planar waveguide, the effective index change and diffusion depth were calculated at 632.8nm using the prism coupling method. From these results, the best Ti thickness in our conditions seems like to be 1200Å ~1300Å.

Key Words(중요용어) : Ti:LiNbO₃ optical waveguide(티타늄 확산광도파로), Nearfield pattern(근거리 패턴), Effective index change(유효굴절율변화), Diffusion depth(확산 깊이), Prism coupling method(프리즘 결합법), Insertion Loss(삽입손실)

1. 서론

향후 전개될 미래 사회가 정보화 시대로서 고화질 텔레비전, 영상 회의, 동영상 등과 같은 고속 대용량 전송 서비스에 대한 수요가 급격히 증가될 것으로 예상되며, 이러한 요구에 효과적으로 대응할 시스템이 곧 광통신이다. 현재 광 CATV(cable TV) 서비스를 필두로 한 향후 국내 B-ISDN 구성

을 위한 광통신망이 궁극적으로 FTTH(fiber to the home)를 겨냥함에 따라 다양한 기능성 소자가 요구되고 그 수요가 증가되고 있다¹⁾.

전송 속도 10Gbps 이상 WDM(파장 분할 전송망) 구성 기술에 있어서, 광변조기, 광필터, 광커플러 및 광스위치 등의 광통신 소자 기술은 차세대 정보통신 시스템인 광대역 종합 정보 통신망(B-ISDN) 구성에 필수불가결한 핵심부품이다. 또한 대용량 초고속 광기능 소자들이 기술적으로 도파로형 구조를 채택함으로써 주변 광부품과의 집적화를 가능케 하고, 소자의 경량화 및 소형화에 기여할 수 있다^{2,3,4)}

본 연구에서는 전기 광학 및 음향 광학 효과가 우수한 LiNbO₃ 기판에 티타늄 내부 확산 방식으로 확산 온도 1050°C, 확산 시간 8시간, wet O₂ 분위기로 확산하여, 제작된 광도파로의 근거리 패턴, 모

* : 전자부품종합기술연구소 통신부품연구센터
(경기도 평택시 진위면 마산리 455-6, Fax: 0333-610-4126
E-mail : kimking@iccnet.co.kr)
** : 목포대학교 공과대학 정보통신공학부
1998년 5월 30일 접수, 1998년 8월 31일 심사완료

드 크기, 삽입 손실 및 유효 굴절율, 확산 깊이등의 광도파로 특성을 분석하였다.

단일모드 시스템에서 가장 중요한 것은 커플링 손실(coupling loss, coupling tolerance) 인데⁶⁾. Fiber-waveguide-fiber 전체 삽입 손실은 fiber와 waveguide mode 사이에 mismatch에 의한 커플링 손실을 최소화하기 위한 확산 조건을 조사하기 위해서 확산전 Ti 두께를 변화시켰으며 또한 Fresnel reflection을 감소시키기 위해서 index matching fluid를 사용하였다. 여기서는 파장 1550nm에서 LiNbO₃ 마크젠다(Mach-Zehnder) 광도파로에 대한 도파로의 제반 특성과 fiber-waveguide-fiber 전체 삽입 손실에 관하여 조사하였다.

2. 실험 및 방법

그림 1은 z-cut LiNbO₃ 기판에 티타늄 광도파로를 형성한 시편의 사진과 포토마스크의 설계도이다. 포토마스크 설계도에는 단일 채널 및 마크젠다 간섭형 도파로 2종류가 배열되어 있으며, 각각 도파로는 7 μ m와 8 μ m 로 구분되어 있다. 마크젠다 간섭형 광도파로는 도파로폭/간격 비율이 7/16, 8/15, 7/13 및 8/12 이 각각 설계되어 있으며, 이 중에서 본 연구에서는 도파로폭/간격 비율이 7/16인 마크젠다 간섭형 광도파로를 분석하였다.

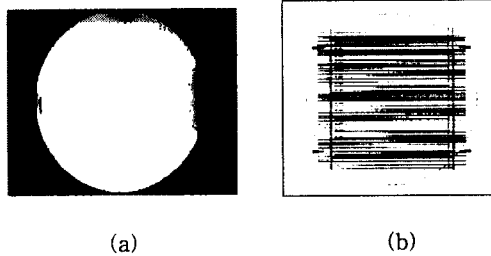


그림 1. 웨이퍼 사진 및 설계도(실측사진).
 (a) 웨이퍼 사진 (b) 포토마스크 설계도
 Fig. 1. Photographs of a wafer and a photomask design.
 (a) optical waveguide wafer (b) photomask design.

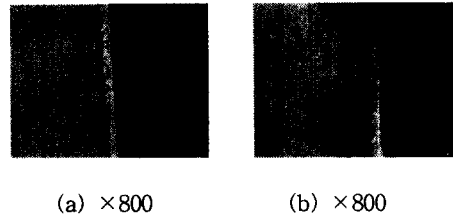


그림 2. 폴리싱 후 단면 사진(a), (b).
 Fig. 2. Photographs of enface polishing(a), (b).

그림 2는 도파로 단면을 폴리싱한 후 도파로 단면 사진을 나타낸 것으로 매우 훌륭하게 연마되어 있음을 알 수 있다. 연마는 고운 사포로 굵은 입자를 제거한 후 다이아몬드 페이스트를 사용하여 1/4 μ m 입자까지 연마하였다.

그림 3에 도파 모드 및 삽입 손실 등을 측정하기 위한 구성도를 나타내었다. 도파로 출력단에는 40배율 렌즈로 확대시킨 후 CCD 카메라를 모니터에 연결하여 모드패턴을 기록하였다. 도파로측 파이버 끝단은 미소 마이크로캐필러리 또는 지르코니아 페룰을 연마하고 파이버 단면 panda 배열 형상을 파이버 단면 측정 시스템(ACCIS NC-3000, NORLAND PRODUCTS社)의 카메라 이미지로 확인 후 광입사 축을 선택하였다. 삽입 손실은 단일 모드 파이버로 길이를 달리한 도파로에 광을 입력시킨 후 도파된 광강도를 비교하여 측정하였다. 본 연구에서 사용한 단일 모드 광파이버는 8-10 μ m 직경 코아로서 굴절율차($\Delta=0.3$)이다.

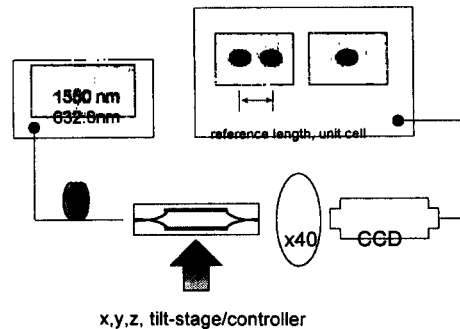
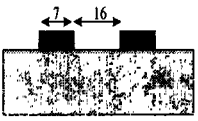


그림 3. 측정 구성도.
 Fig. 3. Measurement diagram.

표 1은 티타늄 패턴화된 웨이퍼를 튜브 확산로 확산 zone에 위치시킨 후, 확산할 조건에 관하여 기록하였고 또한 본 논문에서 분석될 마크젠다 간섭형 광도파로 제원에 관하여 기록하였다. 확산 온도는 1050℃, 확산 시간은 8시간을 채택하였다.

표 1. 제작 조건

Table 1. Process conditions

확산 전/후 Ti 두께, Å	964 Å/700 Å
도파로 폭/간격 μm	
전체/ 평행 arm 길이 - Y-분지 길이/각도	5.65 cm/ 57820 μm 3090 μm / 0.5°
확산 온도/시간, °C/hours	1050°C/8H
분위기/버블러 온도	wet Oxygen/90°C

3. 결과 및 고찰

그림 4는 LiNbO₃ 광도파로에 확산전 Ti strip과 확산후 형성되는 광도파로 형태를 보여주고 있다. 확산전 strip width는 2w, Ti 두께는 t이다. 기판의 굴절율 n_s는 입사광 파장 및 편광 모드(TE/TM)에 의해서 결정되는데, 실온에서 z-cut y-propagation인 경우, 파장 632.8nm에서 TM 모드 기판의 굴절율(n_s)은 n_{se}=2.2028이며 TE 모드 기판의 굴절율(n_s)은 n_{eo}=2.2868 이다. 파장 1550nm인 경우는 z-cut y-propagation 일때 TM 모드 기판의 굴절율(n_s)는 n_{se}=2.1507, TE 모드 기판의 굴절율(n_s)는 n_{so}=2.218이 된다(그림 5 및 6 참조).

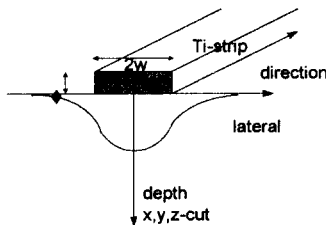


그림 4. Ti:LiNbO₃ 광도파로.

Fig. 4. Ti:LiNbO₃ optical waveguide.

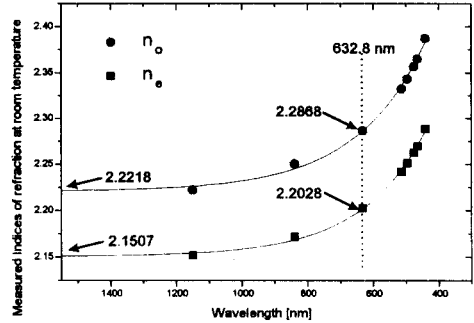


그림 5. 굴절율.

Fig. 5. Refractive Index.

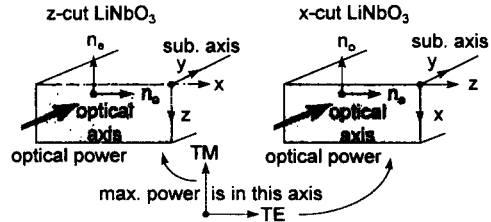


그림 6. 기판 및 광 축.

Fig. 6. Substrate and optical axis.

Ti이 기판 내부로 확산해 가는 확산 길이는 z-cut을 기준으로 하는 경우, 도파로 깊이 $d_z=2\sqrt{(D_z t)}$ 이고 측면으로 확산 길이는 $d_y=2\sqrt{(D_y t)}$ 이다. 여기서 t는 확산 시간이며 $D_{z,y}$ 는 bulk 및 surface 확산계수(diffusion constant) 이다⁷⁾. 그리고 깊이 방향 확산 정도는 프리즘 결합기(prism coupler)를 사용하여 Ti:LiNbO₃ 굴절율을 측정함으로써 d_z 를 얻을 수 있다. z-cut인 경우 수평 방향 및 깊이 방향의 확산 깊이 및 길이는 $d_{z,x}$ 는 거의 유사한 값을 갖으나 x,y-cut 경우, 수평 방향 d_x 는 깊이 방향 $d_{x,y}$ 에 비하여 4배 정도 큰 값을 갖는다⁶⁾(그림 8 참조). 깊이 방향/수평 방향 $d_z/d_{x,y}$ (z-cut) 및 $d_{x,y}/d_x$ (x,y-cut)는 SIMS(secondary ion mass spectroscopy) 또는 EPMA(electron probe micro-analysis) 장비로 도파로 표면 및 측면에 대한 Ti 농도분포를 측정하여 길이를 측정할 수 있다.

그림 7은 SIMS 장비로 Ti 잔류 농도를 측정한다

것이다. 여기서 (a), (b)는 도파로 확산전 폭이 8 μ m, 확산 시간이 5시간이고⁶⁾, (c), (d)는 8 μ m, 10시간이며 본 연구에서 측정된 시편이다. 확산 시간이 5시간에서 10시간으로 증가하면 표면에서 측정되는 Ti 이온양은 급격히 줄어들고 있는 것으로 나타났고 측면방향으로는 증대하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 응용한 깊이 및 수평방향 확산계수는 다음 표 2에 정리하였다⁶⁾.

표 2. y-cut(x-cut) 및 z-cut Ti:LiNbO₃ 확산계수
Table 2. Diffusion constant of y-cut(x-cut) and z-cut Ti:LiNbO₃

	x-cut(y-cut)		z-cut	
	B	S	B	S
D ₀ (cm ² /sec)	3.47×10 ⁻²²	2.50×10 ⁻²³	3.78×10 ⁻¹⁴	7.37×10 ⁻¹⁷
Q (eV)	2.46	1.54	2.95	1.48

☞ B : 깊이방향, S : 수평방향

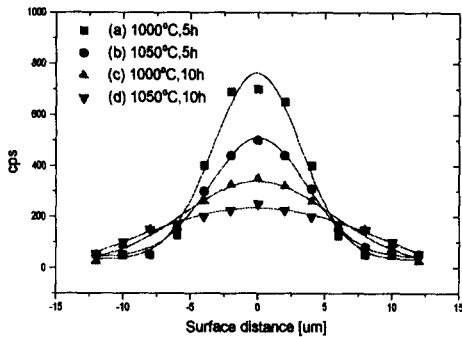


그림 7. z-LiNbO₃ y-방향 도파로의 Ti 이온 농도분포.
Fig. 7. Ti-ion distribution along the y-direction for 8 μ m wide strip waveguide fabricated in z-plate LiNbO₃.

☞ 8 μ m wide strip line waveguide,
(a), (b) : Masaharu et al.[6]
(c), (d) : in this paper

여기서 B는 깊이 방향, S는 수평 방향을 말하며 D₀, Q는 확산 인자이다. 온도와 확산 계수 관계는 다음식으로 근사시킬 수 있다⁸⁾. 그리고 Ti 확산깊이 d 와 도파로 모드 깊이(mode depth)는 온도 T와 시간 t에 의존($d \propto \sqrt{\text{texp}(-T_0/T)}$)하는 반면에 최대 도파로-기판 굴절율차 Δn 은 T, t 뿐만 아니라 급

속 strip 두께 τ 에도 의존한다. 또한 측면확산(lateral diffusion)때문에 d와 Δn 은 급속 strip 폭, 2w에도 다소 의존한다고 볼 수 있다. 따라서 fiber mode dimension과 같은 크기의 도파로 모드를 제작하도록 T, t, τ 및 2w를 선택하도록 해야한다.

$$D_B = D_{B0} \exp\left(-\frac{Q_B}{kT}\right) \quad (1)$$

$$D_S = D_{S0} \exp\left(-\frac{Q_S}{kT}\right) \quad (2)$$

kT에서 Boltzmann constant k는 1.3807×10⁻²³J/K 이고, T는 절대 온도이다. 1025°C에서 kT은 0.1119 eV이며 1050°C에서 kT는 0.1140eV 이다.

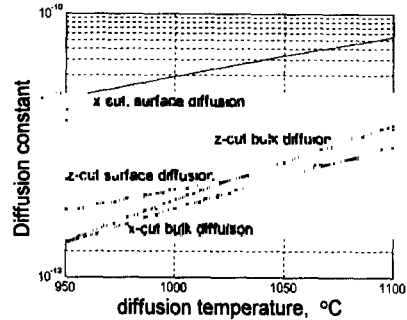


그림 8. 확산 온도 및 확산 계수.
Fig. 8. Diffusion temperature and coefficients.

식 (1)과 식 (2) 및 표 2을 이용하여 확산 계수와 온도 관계를 그림 8와 같이 나타낼 수 있다. z-cut 인 경우 확산 계수는 깊이 방향과 표면(즉, 측면)방향 확산 계수가 전체온도에 관계없이 비교적 차이가 없으나, 1050°C에서 x-cut 인 경우 표면 방향이 깊이 방향에 비해서 약 5배 정도 크게 나타났다. 표 3에 이를 바탕으로 계산한 확산 정수 값을 채널형 도파로를 해석할 때 확산 온도에 따른 계수값으로 활용하였다

평면형 도파로를 사용하여 프리즘 결합방법으로 TM 및 TE 모드 굴절율(effective refractive index) 및 확산 깊이를 측정하였다. 유효 굴절율은 각 도파로 전파 상수 β 를 자유 공간에서의 파동 벡터 k로 나눈값이다. 이때 유효 굴절율은 다음과 같다⁹⁾.

$$N = n_p \sin\{\alpha + \sin^{-1}[\frac{\sin \theta}{n_p}]\} \quad (3)$$

여기서 θ 는 입사각, α 는 프리즘 사이각, n_p 는 프리즘 굴절율이다. 본 연구에서는 프리즘 커플러(METRON 社, MODEL 2010) 장비를 이용하여 굴절을 분포를 계산하였으며 그림 9는 기관 위에 프리즘을 올려 놓고 프리즘과 도파로 사이의 간격을 일정하게 유지하기 위하여, 도파로 밑면과 윗면에 기계적인 압력을 가하는 커플링 헤드로 구성된 프리즘 커플링 구조 및 내부 사진을 나타내었다.

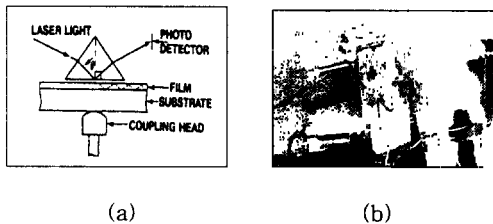


그림 9. 프리즘 커플러 구성.

(a) principal component (b) 사진

Fig. 9. Components of prism coupler

(a) principal component (b) photograph

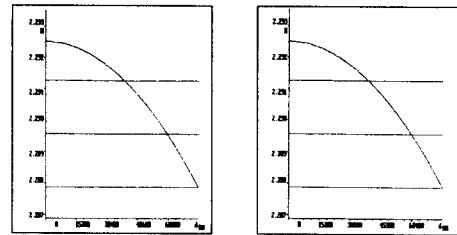
도파된 빛은 내부 벽면에 비춰 밝은 모드를 관찰할 수 있게 설계되었고 프리즘 경사면과 입사각을 측정, 각각에 대한 모드 굴절율을 구할 수 있다. 광원은 0.6328 μ m 헬륨네온 레이저를 사용하고 편광기를 거쳐 TE/TM 을 여기할 수 있다. 0.6328 μ m 파장에서 LiNbO₃ 굴절율 n_e 는 2.2024, n_o 는 2.2861이고 루타일 프리즘 굴절율 n_e 는 2.8654, n_o 는 2.5842, 프리즘 각도는 45° 이다. 그리고 Graded index를 갖는 도파로 표면에서 경계 조건을 만족하는 고유방정식은

$$2k_o \int_0^{y_1} \sqrt{n(y)^2 - N^2} dy = \pi(2m + \frac{3}{2}) \quad (4)$$

이고 k_o 은 전파 상수, y_1 는 $n(y_1)=N$ 로 주어지는 도파로 내부에서 빛이 표면으로 되돌아오는 turning point를 나타낸다. 각 모드에 대해 산출한 유효굴절율은 $n(y)$ 에 대입하여 최소 자승법으로 Δn 과 d 를 계산하여 도파로 굴절율 분포를 구한다.

그림10에 TM 및 TE 모드에 대한 굴절율 분포를 나타내었으며 표 3에 측정된 데이터를 정리하였다.

결과로부터 생성된 모드 갯수는 3개이고 확산 깊이는 약 7.5 μ m 정도까지 확장된 것으로 판명되었다.



(a) TM

(b) TE

그림 10. 굴절율 변화. (a) TM (b) TE

Fig. 10. Refractive index distribution.

(a) TM (b) TE

표 3. 측정된 굴절율 분포.

Table 3. Index gradient calculation.

m	TM		TE	
	β	depth [Å]	β	depth [Å]
	2.2925	0	2.2925	0
0	2.2913	39630	2.2913	39234
1	2.2896	60487	2.2896	60091
2	2.2879	75770	2.2879	75375

※ wavelength = 632.8 nm

$n_e=2.2024, n_o=2.2861$

index=2.2900, depth=56226 μ m for polarization TM

index=2.2900, depth=55830 μ m for polarization TE

polarization TE의 경우, 확산 깊이 $D=7.5375\mu$ m로부터 확산 계수는 $4.9 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ 를 나타내었고 측정된 굴절율 변화율 Δn 은 0.0925를 나타내었다.

z-cut인 경우 확산 온도 1050 $^{\circ}\text{C}$ 에서 확산 시간 8시간 경우 $D_B=2.1836 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$, $D_S=1.6953 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$ 그리고 깊이 방향 확산 깊이는 위 결과로부터 유효 확산 깊이는 5.6226 μ m(TM 모드 경우)로, 측면 방향 확산 길이는 그림 7로부터 $1/e^2$ 인점의 길이는 15~20 μ m로 추정되었으나 정확한 값은 분석중이다. 또한 이때 굴절율 $\Delta n=0.0876$ 으로 계산되었다.

그림 11은 Mach-Zehnder 간섭기형 Y-분기의 단면 근거리 패턴을 나타내고 있다. 두 평행도파로에 광파워 50:50 분기비로 도파되고 있음을 확인하였

다. 그림 12에 Mach-Zehnder 간섭기형 도파로를 지나온 광의 근거리 패턴을 나타내었다. 그림 12(a), (c)에서와 같이 도파된 광은 1550nm로서 단일모드를 나타내었고 그 형상도 원형에 가깝게 측정되었다. 본 연구에서 사용한 파장 가변 반도체 레이저 (SANTEC社, TSL-300-1550, semiconductor tunable laser)는 한쪽 모드가 강한 TE/TM 혼성모드로 출사됨으로 도파로를 통과한 도파광은 편광자를 사용하여 불필요한 편광을 제거한 후에 패턴을 데이터화 하였다. 그림 12(a)와 (c)는 입사 모드와 동일하게 편광자를 위치시켰을 때 패턴이고, 그림 12 (b)와 (d)는 제거해야 할 편광이 잔류하고 있는지 확인하기 위한 데이터로서, 'TE/TM' 경우 앞의 TE는 입력 편광, 뒤쪽 TM은 도파 후 출력측에 삽입시킨 편광자의 편광상태이다.

그림 13에는 TM 및 TE 모드를 도파로에 입사시켰을 때 출사되는 광원에 대한 횡 및 종축 크기를 나타내었다. 각각에 모드 크기 계산은 미리 알고 있는 pixel 당 크기에 측정한 모드크기를 곱함으로써 산정하였다. 그림에서 보는바와 같이 횡모드는 가우시안 분포를 나타내고 있고 종축은 헬릿-가우시안 분포를 보이고 있다. 모드 크기를 산정하는 점은 최대 크기의 $1/e^2$ 이 되는 점을 기준으로 선택하였다. 표 4에 측정한 광모드의 횡방향 및 종방향 모드 크기를 나타내었다. 약간의 오차를 고려한다면 약 11-10 μm 이내에 광모드 크기가 존재하는 것으로 생각된다. 광파이버 끝면과 광도파로와 피그테일링시 파이버 직경 8-10 μm 와 일치해야만 모드불일치 값을 낮춰 삽입 손실을 줄일 수 있다. 그림 14는 확산 전 Ti 두께에 대한 모드 크기 의존성을 나타내었다. 두께 1200-1300Å 각각 모드는 최소가 되었고 TM 모드가 TE 모드보다도 약간씩 크게 나타난 반면에 그 비율은 전 두께에 걸쳐서 일정하게 측정되었다.



그림 11. 마크젠다 간섭기 Y-분기 근거리 패턴.
Fig. 11. Near-field pattern of Mach-Zehnder interferometric waveguide Y-branch.

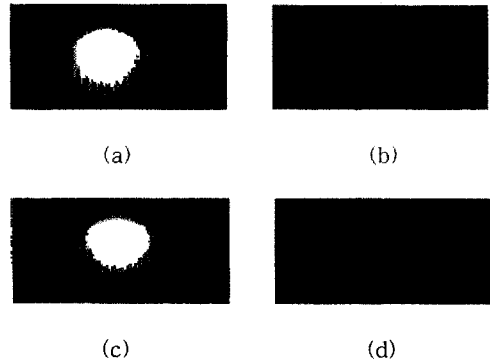


그림 12. 근거리 패턴.

(a) TM/TM (b) TM/TE (c) TE/TE (d) TE/TM
Fig. 12. Near field pattern.

(a) TM/TM (b) TM/TE (c) TE/TE (d) TE/TM

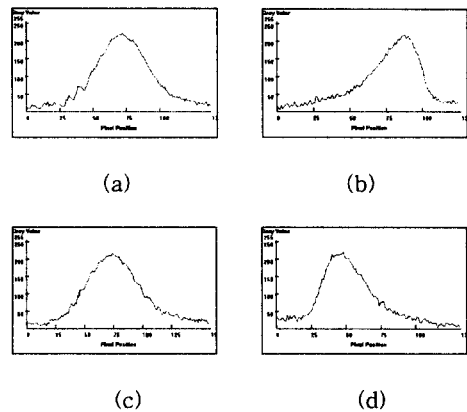


그림 13. 모드 형태. (a) TM 횡모드 (b) TM 종모드 (c) TE, 횡모드 (d) TE, 종모드

Fig. 13. Mode profiles. (a) TM, horizontal (b) TM, vertical (c) TE, horizontal (d) TE, vertical mode

표 4. 손실 및 모드 크기

Table 4. Loss and Mode size

삽입손실	TM	0.69 dB/cm	
	TE	0.69 dB/cm	
전송손실	TM	0.46 dB/cm	
	TE	0.47 dB/cm	
도파모드크기	TM	종방향	13.50 μm
		횡방향	11.82 μm
	TE	종방향	14.67 μm
		횡방향	11.02 μm

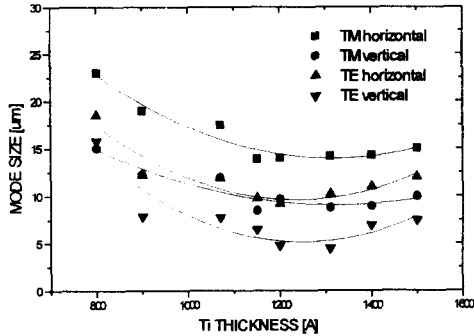


그림 14. 모드크기
Fig. 14. Mode size

전체 fiber-waveguide-fiber 삽입손실은 반사손실(reflection(Fresnel)), 커플링 손실 및 전파손실(propagation loss)를 포함하는 인자이다¹⁰⁾. 실험에서 예시한 것처럼 거의 완벽한 도파로 endface polishing과 정열 상태를 가정하였다. 이때 circularly symmetric fiber와 수직방향 symmetric waveguide mode간에 모드불일치(mode mismatch)는 커플링손실의 중요인자로 삽입손실에서 차지하는 비중도 크다.

실험온도 1050°C, 확산 시간 8h이고 스트립 두께를 변화시켰을 때 전체 삽입 손실을 비교하여 보았다(그림 15). 본래 확산시 주어진 환경에서 100% 내부확산(indiffusion)을 달성하려면, 금속 박막 두께는 충분히 얇아야 한다. 그렇지 않는 경우, 불충분한 확산은 매우 큰 surface scattering loss를 일으켜 특히 TM 모드에 대한 손실을 증가시키기 때문이다¹⁰⁾. 본 연구 자료가 의하면 Ti 두께 <1200~1300Å에는 TM 모드가 TE 모드보다도 크게 나타났고 그 이상에서는 역전되는 현상을 보였다. 그러나 두 모드 차이가 크지 않고 급격한 변동이 없는 것으로 보아 불충분한 확산에 의한 영향은 없는 것으로 결론을 내렸다. 가장 작은 삽입손실은 두께 1200-1300Å 근처에서 나타났고 도파로스트립 선포 7, 8μm에 크게 의존하지는 않았다. 특이한 것은 이점을 중심으로 각각 모드역전이 발생한다는 것인데 그 이유에 관해서는 분석 중이다.

그림 16에 Mach-Zehnder interferometric Y-분기의 index profile을 시뮬레이션하여 나타내었다. 간격 11.4μm일 때 두 도파로의 간섭이 최소화되고 간격 16μm일 때 두 평행도파로는 독립적인 진행하는 것으로 판단되었다.

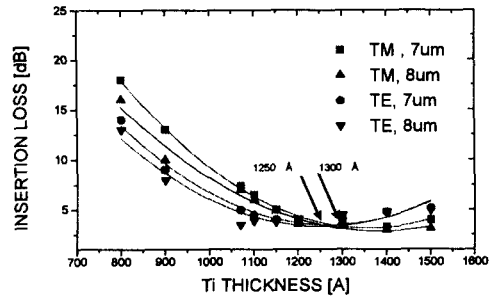


그림 15. 전체삽입손실.
Fig. 15. Total insertion loss.

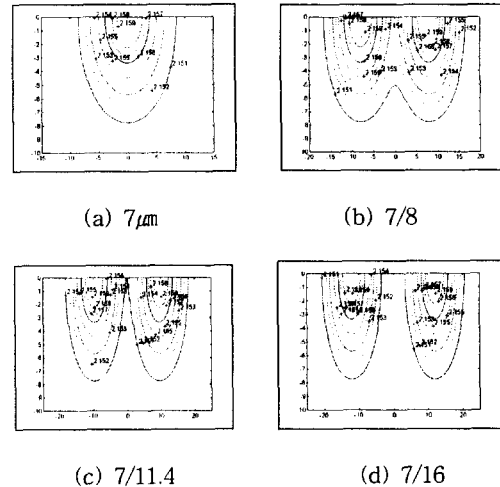


그림 16. z-cut Ti:LiNbO₃ 굴절율 분포(폭/간격).
(a) single channel region.
(b) Mach-Zehnder Taper region
(c) Mach-Zehnder Taper region
(d) Mach-Zehnder parallel region
Fig. 16. Refractive index distribution(width/gap).
(a) single channel region.
(b) Mach-Zehnder Taper region
(c) Mach-Zehnder Taper region
(d) Mach-Zehnder parallel region

결론

본 연구에서는 z-cut LiNbO₃에 Ti을 1050°C로 8시간 동안 wet oxygen 분위기로 확산시켜 광도파로를 제작하였다. 제작한 광도파로는 폴리싱한 후

1550nm에서 도파되는 근거리 패턴, 삽입 손실 등을 조사하였으며 같은 조건에서 확산된 평면 광도파로에 프리즘 커플링 방법으로 0.6328 μ m 레이저 광을 입사시켜 유효 굴절율, 확산 깊이, 확산 계수 및 굴절을 변화량을 구하였다. 또한 티타늄 두께에 대한 모드 크기 및 전체 삽입 손실을 산정하여 확산원이 삽입 손실에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 결과를 기본으로 하여 각종 도파로 소자를 제작하는 데 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 확산 온도에 대한 연구가 보강되어 좀더 정량적인 연구가 이어질 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 정홍식, "광통신용 LiNbO₃ 광집적소자의 기술발전 동향", 전자공학회지, 제21권, 제2호, 146, 1994.
2. H.ISHIO, M.SARUWATARI, "Future prospects of very high-speed lightwave communications technologies", NTT R&D, VOL. 42, NO. 5, PP.635-642, 1993.
3. Optronics, 波長 多重を用いた大容量光傳送技術, NO.5, PP.111-116, 1996.
4. Optronics, Ti:LiNbO₃ 道破路デバイスの實用化, NO. 7, PP.166-167, 1995.
5. H.NISHIHARA, Optical Integrated Circuits, McGraw-Hill, 1985.
6. Masaharu Fukuma and Juichi Noda, "Optical properties of Titanium-diffused LiNbO₃ strip waveguides and their coupling-to-a-fiber characteristics", Applied Optics, Vol. 19, No. 4, 1980.
7. Masaharu Fukuma, Juichi Noda and Hiroshi Iwasaki, "Optical properties in titanium-diffused LiNbO₃ strip waveguides", Applied Optics, Vol. 49, No. 7, 1978.
8. Juichi Noda, Masaharu Fukuma, and Shoichi Sato, "Effect of Mg diffusion on Ti-diffused LiNbO₃ waveguides", J. Appl. Phys. 49(6), pp.3150-3154, 1978.
9. J.Vollmer, J.P.Nisius, P.Hertel, and E. Kratzig, "Refractive index profiles of LiNbO₃:Ti waveguides", Appl. Phys. A.32, pp.125-127, 1983.
10. V.Ramaswamy, R.C.Alferness and M.Divio, "High efficiency single mode fibre to Ti:LiNbO₃ waveguide coupling", Vol. 18, No. 1, pp.30-31, 1982.