

Total Fiber-to-fiber Insertion Loss가 <6dB인 Ti:LiNbO₃ 광도파로 Pigtailling 및 손실분석

11-7-10

The Pigtailling and The Loss Analysis of low loss LiNbO₃ Optical Waveguide with Fiber-to-fiber Insetion Loss <6dB

김성구*, 박계춘**, 조재철***
(Sung-Ku Kim, Gye-Choon Park, Jae Chul Jo)

Abstract

A low loss x-cut LiNbO₃ optical waveguide was fabricated by Ti in-diffusion, and the properties of guided-mode and the total insertion loss of the pigtailed waveguide with polarization maintaining fiber(PMF) were measured at optical wavelength 1550nm. For forming the waveguides, the parameters of diffusion, Ti thickness, waveguide line-width, length, diffusion temperature, time and atmosphere were set 1400Å, 8μm, 3.3cm, 1050°C, 8 hours and wet bubbled oxygen, respectively. And then after the polishing and pigtailling, it showed that the total insertion loss was -4.1dB for TM mode, -5.5dB for TE mode, and mode size, that is, the horizontal/vertical size were 13.8μm/18μm for TM mode, 9.6μm/6.5μm for TE mode.

Key Words(중요용어) : Ti:LiNbO₃ waveguide(티타늄 확산 광도파로), Pigtailling(피그테일링), Insertion loss(삽입 손실), Mode size(모드크기)

1. 서 론

최근 PLC 및 LiNbO₃ 광도파로 제작기술 발달로 저전압구동 광변조기, 광스위치, 다분기기, 멀티플렉서 및 도파로형 광필터 등의 제작이 가능하게 되어 집적광학소자 개발이 진일보하였고 광통신에 대한 연구를 더욱 촉발시켰다¹⁾.

향후 전개될 미래 사회가 고화질 텔레비전 및 영상회의등 고속이면서 대량의 정보를 주고 받는 멀티

미디어시대로 접어들면서 이를 효과적으로 구현하기 위한 수단이 필요하게 되었는데, 현재까지 개발된 저손실 광섬유는 광대역성을 나타내고 값싸며 무한정 공급할 수 있어 이를 활용한 광통신기술이 확고한 우위를 차지하게 되었다^{2,3,4)}. 광통신기술을 받쳐주는 중요 소자기술 중에서는 광도파로 및 광 fiber 를 활용한 다양한 소자류가 있으며 여기서는 1.5μm 파장대역에서 손실이 작고 단일모드를 갖는 저손실 LiNbO₃ 광도파로 제작과 피그테일링에 관한 연구를 소개하였다^{5,6,7,8)}. 일반적으로 집적광학소자용 LiNbO₃ 도파로를 제작하는 방법은 Ti 내부확산과 양자교환이 있으며, 내부확산방법은 LiNbO₃ 기판에 Ti 박막을 입힌 후 약 1000°C로 Ti을 고온 확산시켜 광도파로를 만드는 방법으로 고온 확산이라는 단점에도 불구하고 입력광의 편광에 관계없이 TM, TE 모드를 전부 도파시킬 수 있으며 굴절율 증가

* : 전자부품종합기술연구소
(경기도 평택시 진위면 마산리 455-6, Fax: 0333-610-4126)
** : 목포대학교 공과대학 전기공학과
*** : 초당대학교 공과대학 전자공학과
1997년 10월 27일 접수, 1998년 5월 14일 심사완료

는 ~ 0.01 정도이다.

본 연구에서는 x-cut LiNbO₃(Casix 社, China)에 Ti을 확산하여 저손실 광도파로의 제작법을 확립하고 도파모드 특성을 연구하였으며 편파보존 파이버와 pigtailing하여 전체 삽입손실을 측정하였다. 그리고 실험적으로 얻어진 도파모드특성을 이용하여 광도파로와 광 fiber와 결합시 발생하는 모드부정합손실을 검토하였다.

2. 실험 및 측정

그림 1과 같은 3-inch x-cut LiNbO₃ 기판을 DECONEX를 사용하여 초음파로 깨끗이 세척한 다음 Ti을 그림 2의 E-beam 증착법으로 1400Å 증착하고 두께 측정기(Surface Profiler, DEKTAK)로 정확히 그 두께를 측정한다. 그리고 그림 3, 4의 사진식각공정과 불산(10:1)을 사용하여 Ti 패턴을 에칭한 다음 깨끗이 세척하고 4인치 튜브확산로의 확산영역에 위치시켜 1050℃로 확산을 진행한다^[10]. 확산 중 확산로에 유입되는 산소는 버블러를 통과하는데 이때 버블러온도는 95℃정도로 맞추고 출구쪽은 증류수를 매개로하여 버블링시킨다. 유입되는 산소량이 수증기량을 결정함으로 적당한 양이 되도록 조절한다. 확산 정상온도에 이르는 시간은 2시간으로 하고 확산종료 후 냉각은 강제방식이 아닌 자연냉각으로 식힌다. 이때 계속해서 산소를 공급해주며 버블러 온도는 실온까지 떨어뜨린다. 확산시간은 8시간이며 확산온도 오차는 ±3~7℃이다. 확산종료 시점에서 유입되는 산소량보다도 더욱 많은 분위기량이 요구됨으로 확산로 출구를 개방하든지 확산로에 유입되는 산소량을 늘려주든지 조정이 필요하며, 그렇지 않는 경우 확산로 출구로 증류수가 유입하게 된다. 그리고 확산로의 내부는 확산이 반복되면서 리튬(Li)원자가 벽면에 달라붙어 둥근고리를 형성하는데 확산로가 안정상태로 될 때까지 계속반복되며, 확산로가 안정되기 前에는 재현성 있는 광도파로 제작이 어렵다. 제작한 광도파로는 적절한 크기로 절단을 한 후 dummy block을 붙이고 연마과정을 거쳐서 도파실험 준비를 하게된다. 도파실험은 미세정렬기위에 광도파로를 부착시키고 입력쪽에 0.6328μm 헬륨네온레이저로 입사시켜 광도파로 위치를 확인한 후에 1550nm 광원으로 교체한다. 도파로 출력쪽은 40배율렌즈로 빔을 통과시켜 CCD 카메라

에 그 도파모양을 받아 컴퓨터 스크린에 연결시킨다. 스크린에 투사된 모드는 TE 및 TM으로 분리하고 각각 모드에 대한 횡방향 및 종방향 크기를 구한다. 그리고 CCD 카메라를 제거하고 가시광선에서 적외선 1800nm 까지 검출가능한 비디콘으로 검출하여 그 광원의 세기를 측정, 광전송손실(propagation loss)를 산정하고, 전체삽입손실(insertion loss)은 도파로 입력 및 출력부에 편파보존 fiber 인 PM fiber를 모두 부착한 후 측정한다. 그림 5는 광도파로에 PM fiber를 접속하는 방법과 페룰 끝면을 간섭무늬(간섭계형 fiber 단면측정기, Norand products社)로 관찰한 회절사진을 나타내었다. 광도파로에 접속되는 광 fiber 편광을 따라 최대 광 power가 전달되도록 하였다. 그림 6은 Fiber polishing machine(SEIKO GIKEN社)으로 도파로 단면을 연마한 시편의 단면사진과 이 끝면에 부착할 광 fiber와 함께 연마된 ferrule을 나타내었다. 그림 7은 자체 제작한 지그를 사용하여 폴리싱한 시편의 단면사진과 지그 일부분 사진을 나타내었다. 폴리싱 하기전에 시편의 도파로 표면에 절연막과 금속박막을 수 μm 형성하고 지그에 장착하여 그림 7(b)에서 처럼 폴리싱하게 된다. Pigtailling은 도파로 입력을 PM 파이버로 정렬하고 굴절을 약 1.5인 매칭오일점 UV-Epoxy를 약간 문힌 후 다시 압착하면서 정렬하여 UV 광원으로 조사한 후 굳힌다. 그리고 출력측과 위치를 바꾸고 피그테일링된 PM fiber의 한쪽 끝에 연결된 FC 접속단자를 1550nm 검출기(EXFO, Fiber-optic tester)에 접속하여 도파광을 검출하도록 하고 도파로 출력측에 PM fiber를 연결하는 피그테일링 작업을 반복한다. 광도파 모드 크기 산정은 입력쪽에 PM fiber를 피그테일링하고 출력도파로쪽을 CCD로 관찰하여 산정하였다. 광파이버와 도파로 접속에 UV 에폭시(Electro-Lite 社, 미국)를 사용하였다.

그림 8은 도파로 측면 폴리싱면에 PMF를 부착한 사진이다. 에폭시에 더욱 견고한 구조를 형성하기 위해서 더미블럭을 추가로 붙였다. 페룰을 단면에 부착할 때 페룰과 단면과의 미세 간격이 존재하는데 본 실험에 의하면 페룰을 단면에 압착하기 보다는 어느 정도 간격을 유지하였을 때 최대 광 power가 전달되었다. 그림 8(b)는 미리 제작한 패키지에 피그테일링을 마친 시편을 장착한 상태이다.

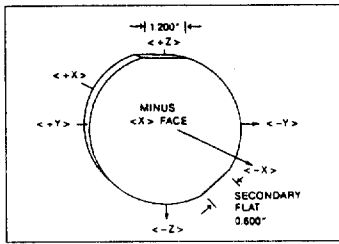


그림 1. x-cut LiNbO₃ 웨이퍼.
Fig. 1. x-cut LiNbO₃ wafer.

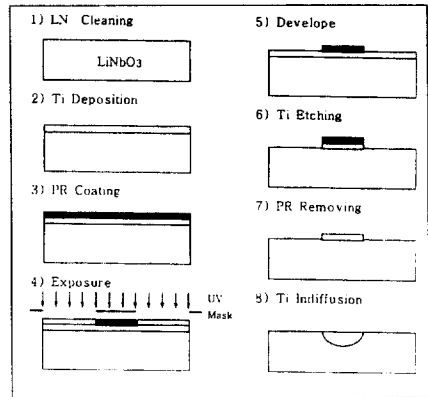


그림 4. 도파로 공정
Fig. 4. Waveguide process

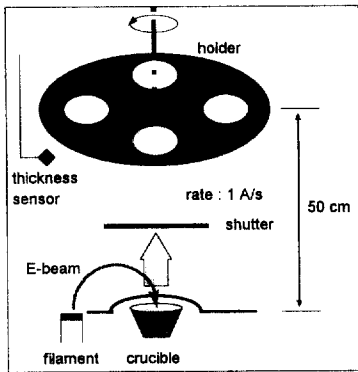


그림 2. E-beam 증착
Fig. 2. E-beam deposition.

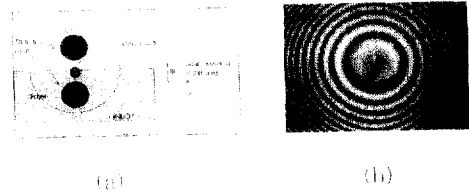


그림 5. PM 파이버 접속 및 panda 패턴. (a) 접속 (b) 패턴
Fig. 5. Pigtailling of PM fiber and panda pattern. (a) connection (b) pattern

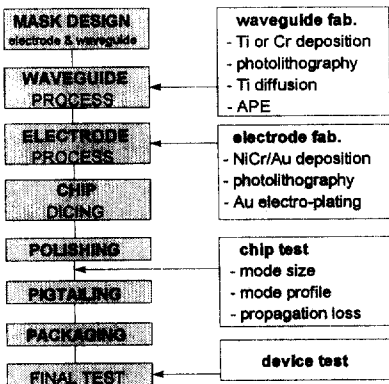


그림 3. 소자 제작공정.
Fig. 3. Device process.

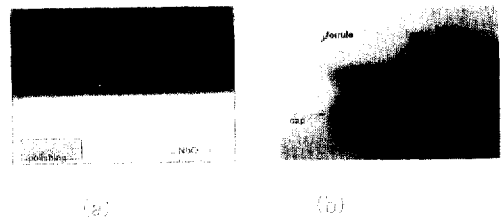


그림 6. 도파로 연마사진 및 페룰. (a) endface (b) ferrule
Fig. 6. Waveguide polishing. (a) endface (b) ferrule

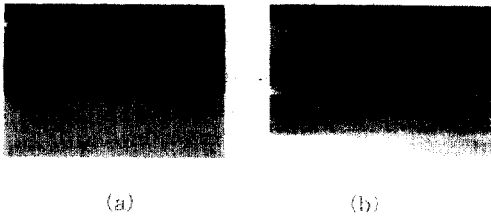


그림 7. 도파로 연마사진 및 지그. (a) endface (b) zig.
Fig. 7. Waveguide polishing. (a) endface (b) zig



그림 8. 피그테일링 및 패키지. (a) 피그테일링
(b)패키지.
Fig. 8. Pigtailing and package. (a) pigtailing (b) package.

3. 결과 및 고찰

그림 9는 Ti 확산 시간에 따른 스트립의 두께변화를 관찰한 것이다. 확산초기 두께는 1550Å로서 그림 9(a), (b)와 같다. 그림 9(c)를 확산최종온도인 1050°C까지 2시간으로 상승시켰을 때 두께 변화인데 초기 두께보다도 100-150Å 이상 부풀려져 있으며, 상승시간 2시간을 지나 2시간 더 확산시켰을 때 스트립 두께가 1300-1400Å로 감소하고 있었다. 이 사실로 미루어 볼 때 본격적인 확산이 발생하기 전에 스트립두께는 LiNbO₃, Ti, O₂ 등이 혼합된 혼합상태로 그 두께가 상승하다가 확산이 본격적으로 발생하는 온도에서는 그 두께가 서서히 감소하는 것으로 알 수 있으며, 이를 사진으로 그림 10에 다시 확인하였다. 그림 10(a)는 Ti 스트립 형태가 비교적 그대로 유지하고 있으나, 그림 10(b)는 스트립 중앙부분이 약간 아래로 내려앉고 폭방향으로 다소 팽창되어 있으며 스트립 윤곽이 명확하지 않다.

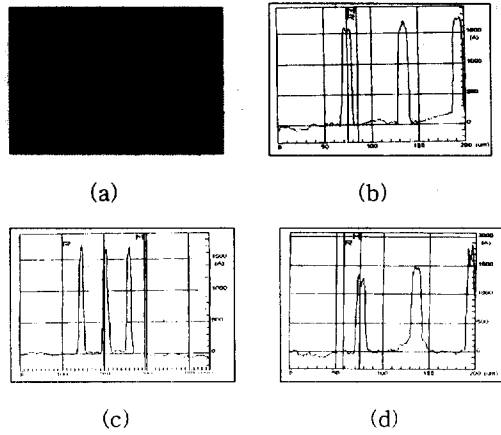


그림 9. 확산시간에 따른 Ti 두께변화.
(a) 스트립 (b) 1550Å
(c) 상승 2시간 (d) 상승 後 확산 2시간
Fig. 9. Ti thickness variations by diffusion time. (a) Ti stripe (b) before diffusion 1550Å (c) ramp time 2 h (d) diffusion 2 h



그림 10. 확산시간에 따른 Ti 두께변화.
(a)1400Å, step1(2h)
(b)1550Å, step 1(2h), step2(2h)
Fig. 10. Ti thickness variations by diffusion time. (a) 1400Å, step 1(2h) (b) 1550Å, step 1(2h), step 2(2h)

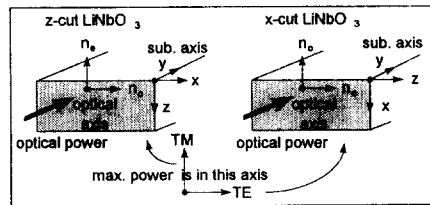


그림 11. 기관 축과 광축.
Fig. 11. Sub. axis and optical axis.

일반적으로 광제어 소자를 제작할 때 LiNbO₃는 z- 또는 x-cut을 사용하게 되는데 도파광이 광 fiber를 통해 단일모드 도파로로 전달되면 일정한 굴절율을 갖는 도파로 내부에 강금되면서 매질을 따라 진행하게 되는데 편광에 따라 굴절율을 다르게 느끼게 된다. z-방향을 따라서는 이상광선굴절율을 x-방향에 따라서는 상광선 굴절율을 느끼게 되며, 파장 632.8nm 인 헬륨네온 레이저를 입사시키는 경우, 이상광선굴절율 n_o는 약 2.2, 상광선굴절율 n_e는 2.28를 갖는다. z-cut 소자를 제작한다면 광과 전계의 효율을 증대시키기 위해서 그림 11에서 위 아래 방향으로 편향된 광, TM 모드를 사용하고, x-cut인 경우는 수평방향의 전계성분을 효과적으로 이용하기 위해서 TE 모드를 이용해야한다.

표 1. 굴절율 참고치

Table 1. Reference of refractive index

LiNbO ₃	REFRACTIVE INDEX	
	n _o	n _e
CRYSTAL TECH 社	2.2866	2.2028
SHINKOSHA 社	2.2967	2.2082

wavelength 632.8nm at the room temperature.

LiNbO₃ 광제어소자의 도파광 field 분포는 손실특성이나 변조효율등에 커다란 영향을 받는다. 그림 12에 단일모드 광도파로 field 분포를 나타내었다. 굴절율은 다소 비대칭형 분포를 하고 있기 때문에 광 field 분포도 깊이 방향이 비대칭형이 된다¹³⁾. 분

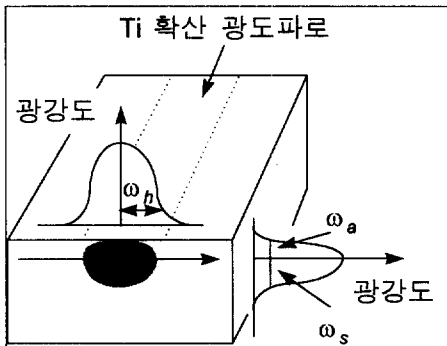


그림 12. 도파광 field 분포.

Fig. 12. Field distribution of guided optical mode.

포함수로 나타내면 도파광의 횡모드는 가우시안 함수, 깊이방향은 2개의 다른 가우시안 함수로 조합된 사시킨 헬멧-가우시안 함수로 나타낼 수 있다.

삽입손실은 중요한 성능변수 중에 하나이다. 특히 LiNbO₃ 도파로 경우는 전송손실이 작고, 입출력광 fiber와 결합손실이 삽입손실중에서도 큰 부분을 차지한다. 광 fiber와 결합손실 L은 도파광 간의 field 분포를 중첩시켜 결정하며 근사적으로 다음과 같다.

$$L = 10 \text{LOG} \left[\frac{2 \left(\left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{w_a^2} \right)^{-1/2} + \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{w_s^2} \right)^{-1/2} \right)^2}{a^2 w_h (w_a + w_s) \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{w_h^2} \right)} \right] \quad (1)$$

여기서 ω₀(=2a) : 광 fiber의 spot size

a : spot size 의 1/2

ω_{||}(=2ω_h) : 광도파로 횡방향(폭) spot size

ω_h : 도파광의 횡방향의 1/2

ω_⊥(ω_a+ω_s) : 광도파로 깊이방향 spot size

ω_s : 종방향 아래쪽 빔직경

ω_a : 종방향 윗쪽 빔직경

$\bar{w} = \sqrt{w_{||} \cdot w_{\perp}}$: 광도파로 횡 및 종방향 굵의 제곱근

γ : 깊이방향 분포의 대칭성을 표시하는 계수, ω_a/ω_s 윗쪽을 아래쪽으로 나눔

ε : 비타원률(非圓率), ω_{||}/ω_⊥ 횡방향직경을 깊이(종)방향직경으로 나눈 값

결합손실을 계산한 결과들을 비교하여 보면 광 fiber 빔직경과 광도파로 횡 및 종방향모드 굵의 제곱근의 비를 같게 했을 때, 즉 ω₀= \bar{w} 일 때 손실이 최소가 될 수 있는데 이 비율이 1 보다 작거나 클 때 결합손실은 증대한다. 먼저 1보다도 작은 경우는 0-2.5dB까지 감소하고 1보다 큰 경우는 0-1dB까지 감소한다. 따라서 제작된 광도파로는 모두 ω₀≠ \bar{w} 임으로 도파로를 도파하는 도파광의 모드크기가 약간 큰(ω₀< \bar{w} , 약 1-1.4배)쪽이 결합손실을 낮출 수 있다. 그리고 결합손실을 0.5dB 이하로 유지하기 위해서는 \bar{w}/ω_0 가 0.8-1.25 정도 범위에 있는 것이 좋다. 그리고 이러한 결합손실은 분포의 비대칭성을 나타내는 γ 및 ε에 의해서 제한 된다. 또한 횡방향 직경을 종방향 직경으로 나눈 값을 비타원률 ε 이라할 때 ε이 1에 가까울수록 결합손실이 작으며,

종방향이 횡방향의 1.6배까지 커질 때 결합손실은 약 0.5dB 정도 커지게 된다. 종방향 모드크기를 축 으로부터 윗쪽직경과 아래쪽 직경으로 분리할 때 윗쪽을 아래쪽으로 나눈값을 γ 라고 하며, 이 값이 1일 때 fiber 모드와 일치되어 결합손실은 0dB가 되 며 약 0.5배 정도 이면 0.4dB($\epsilon=1$ 기준, $\epsilon=1.7$ 이면 0.7dB)정도로 증가한다. 즉 깊이방향 모드의 타원비 율이 심할수록(γ 가 작을수록, 종모드의 축아래쪽 직경이 클수록) 결합손실이 커진다¹⁴⁾.

그림 13은 TE 모드를 도파시켰을 때 도파광 field profile 이다. 그림 13(b)에 contour map을 나 타내었고 그림 (c), (d)에 횡방향 모드 및 종방향모 드 크기를 나타내었다. 그림 14는 TM 모드에 대한 도파광 field profile이다. 파장 1550nm를 입사시켰을 때 모드크기를 비교해 보면 TM 모드는 횡/종 방향 크기가 13.8/8 μ m 였고 TE 모드는 횡/종방향 크기가 9.6/6.5 μ m를 얻었고 표 2에 나타내었다. 여기서 $\omega_0=9\mu$ m, $a=4.5\mu$ m 및 $\omega_n=6.9\mu$ m(TM), 9.6 μ m(TE) 이고 TM 경우 $\omega_s=4.9\mu$ m, $\omega_a=3.1\mu$ m, TE 경우 $\omega_s=6.5\mu$ m, $\omega_a=2.6\mu$ m 이다. 이때 fiber 축과 광도파로 기준점(광 power max. point)을 일치시킬 경우 모드 부정합손 실은 $L=-0.36$ dB(TE), -0.58 dB(TM)로서 입출력 양단 의 손실을 포함시키면 전체 TM 모드 부정합손실은 -1.16 dB, TE 모드 부정합손실은 -0.72 dB(표3 참조) 를 나타내어 Fresnel 손실 -1.3 dB 보다는 작았고, 따라서 TM/TE 모드 fiber-to-fiber 삽입손실이 -4.1 dB/ -5.5 dB(표4 참조) 임으로 모드부정합이 손실 에 미치는 영향은 약23%/13% 정도였다. 광도파로 중심축을 이동시킴에 따른 모드 불일치도를 조사한 결과 그 TM/TE 손실크기는 각각 광파이버 최대 광 power에서 아래방향으로 0.6 μ m 이동하면 TE 모 드는 -0.26 dB 까지 감소하며 깊이 0.8 μ m에서 TM 모 드는 -0.44 dB 까지 감소하는 것으로 분석되었다.

그림 15는 58 μ m 정도 떨어져 있는 두 인접채널 간에 발생하는 커플링효과를 알아보기 위한 그림이 다. 광의세기를 1.5mW 이상 입사시켰을 때 인접채널 에 광이 멀티모드 형상으로 커플링되어 도파되었다.

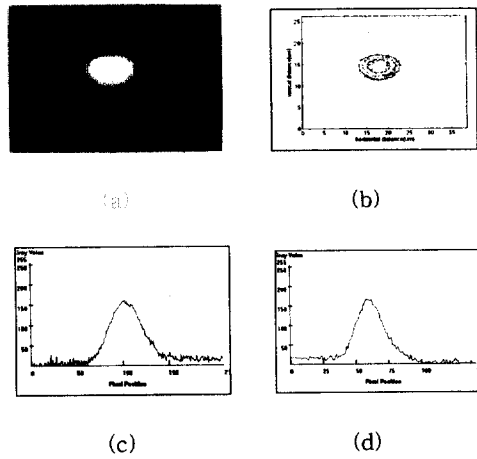


그림 13. TE 모드, 파장 1590nm. (a) TE/TE (b) contour (c) 횡 모드 (d) 종모드

Fig. 13. TE mode. (a) TE/TE (b) contour (c) horizontal mode (d) vertical mode

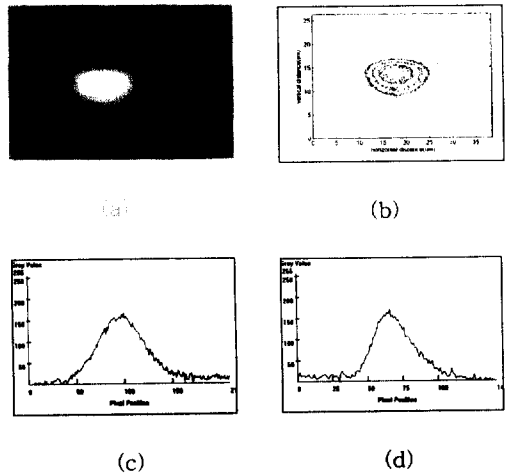


그림 14. TM 모드, 파장 1590nm. (a) TM/TM (b) contour (c) 횡 모드 (d) 종모드

Fig. 14. TM mode. (a) TM/TM (b) contour (c) horizontal mode (d) vertical mode

표 2. 모드크기, 파장 1550nm

Table 2. Mode size

	TE	TM
Horizontal, μm	9.6	13.8
Vertical, μm	6.5	8

표 3. 최소 모드 부정합손실 계산

Table 3. Calculation of minimum mode mismatch

	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
TM	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.46	0.446	0.441		0.445	0.454	0.4
TE	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.262		0.265	0.274	0.290	0.311	0.3
모드	→ 파이버 광축을 고정하고 도파로 광축을 모드 종방향으로 이동, 단위[μm]											

표 4. 전체 삽입손실, 파장 1550nm

Table 4. Packaged total insertion loss

	TM	TE
LOSS	- 4.1 dB	- 5.5 dB
LENGTH, CHANNEL	3.3 cm	
SUB.(-X polished)	X-CUT LiNbO ₃	

Ti thick. : 1400 Å

condition : 1050 °C, 8hours, wet bubbling oxygen atmosphere

substrate : CASIX社, CHINA

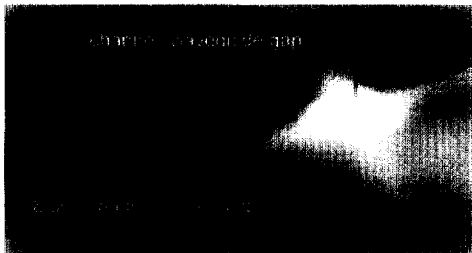
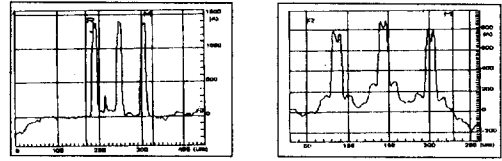


그림 15. 인접채널 간섭효과

Fig. 15. Coupling effect of closed channel



(a)

(b)

그림 16. 확산 前後 스트립 두께 변화.

(a) 확산 전 (b) 확산 후

Fig. 16. Strip thickness variation.

(a) before (b) after diffusion

그림 16은 확산전후의 Ti 스트립 두께변화를 보인 것이다. 확산 후 두께는 800Å 정도 측정되었다.

전기광학효과를 이용한 소자는 인가전계와 광 field의 중첩으로 소자효율을 결정함으로 기판표면에 설계된 전극인가 전계강도는 보통 표면근처에서 제일 강하다. 그래서 고효율화를 위해서는 동작전압을 저감시키기 위해서 도파광을 할 수만 있으면 전계가 집중하는 기판표면에 강금시키는 점이 필요하다. 그러나, 이러한 요구는 일반적으로 광 fiber와 결합손실을 증대시키는 방향으로 작용하여 상반되는 trade-off 작용을 나타낸다. 따라서 저손실, 저전압의 요구조건을 모두 충족시키기 위해서 전계인가 제어부와 입출력 광 fiber 부에 도파광의 field 분포를 변환시킬 필요가 있다. 즉, 그림 17과 같이 도파광 입출력부에 손실이 발생하지 않도록 완만한 taper 형으로 굴절률 분포를 변화시켜 이 사이에 모드변환을 시도하면서 광 fiber와 접속하는 것이다. 이와 같은 굴절률을 변화시키는 방법에는 Ti 박막 두께, 도파로 폭, 확산시간 및 확산온도 등을 변화시키는 것이다. 예로서 그림 17에 taper 확산에 대한 그림을 나타내었다¹⁵⁾. 서로 다른 박막두께를 taper 형으로 접속시켰을 때 광도파로의 근거리모드 측정결과를 살펴보면 광제어부쪽 $\bar{u}=6.0\mu\text{m}$, $\bar{w}_1=7.6\mu\text{m}$, $w_2=4.7\mu\text{m}$ 였고 광 fiber 쪽은 $\bar{u}=6.0$, $\bar{w}_1=5.8\mu\text{m}$, $w_2=4.2\mu\text{m}$ 를 나타내어 taper 확산이 광모드 크기를 조절할 수 있다.

참 고 문 헌

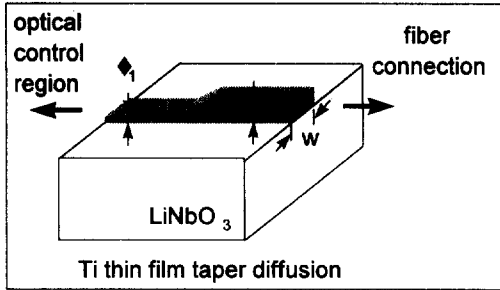


그림 17. Taper 확산.

Fig. 17. Taper diffusion. (→ 확산온도 $T=1050^{\circ}\text{C}$, 시간 $t=6.3\text{H}$, $\tau_1=580\text{\AA}$, $\tau_2=810\text{\AA}$)

4. 결 론

본 연구 前 결과에 의하면[9] x-cut 광도파로의 TE 및 TM 모드가 도파가 양호하게 시작되는 확산 前 Ti 두께는 1100Å 前後이고, 두께가 1500Å 일 때부터는 도파모드가 비대해져, 멀티모드화하는 현상을 확인한바 있다. 그리고 가장 양호한 도파로 형성 Ti 두께는 1200-1500Å 사이에 존재할 것으로 추정한다.

본 연구에서는 x-cut LiNbO₃에 Ti-1400Å을 확산하고, pigtailling하여 삽입손실 및 도파특성을 광파장 1550nm로 측정하여 다음과 같은 양호한 결론을 얻었다.

- (1) 도파로 TM/TE 모드 fiber-to-fiber 삽입손실은 -4.1/-5.5dB 였으며 TM 모드 수평/수직방향 크기는 13.8 μm /8 μm 이고 TE 모드 수평/수직방향 크기는 9.6 μm /6.5 μm 를 나타내었다.
- (2) 모드 부정합손실(도파로 출력단)은 TM/TE 모드가 -0.58/-0.36dB, 최소 광모드 부정합손실은 TM/TE 모드 : -0.44/-0.26dB를 나타내었다.

1. 전자부품종합기술연구소, B-ISDN 공동연구개발 사업:수동광부품개발 최종년도 보고서, KETI-RD-96091, 1996.12
2. 전자부품종합기술연구소, 광통신용 도파로형 광필터개발, KETI-RD-97003, 1996.12
3. 전자부품종합기술연구소, 수동광부품개발, KETI-RD-94030, 1994.7
4. 전자부품종합기술연구소, 차세대 광전자 기술 개발전략수립, KETI-MS-94048, 1994.7
5. 김성구, "Mach-Zehnder LiNbO₃:Ti 광도파로 제작 및 특성", 한국전기전자재료학회, 1997년 춘계학술연구 논문발표대회, OA-4
6. 김성구, 윤형도, "광통신용 고속LiNbO₃ 광변조기 기술", 전자부품종합기술연구소 전자연구지, 제5권 2호, 1996. 4
7. 김성구, 윤대원, "광통신용 수동광소자 기술동향 및 시장동향", 한국통신학회지, 제13권 11호, 1996년 11월.
8. 김성구, 윤형도, 윤대원, "LiNbO₃ 수동광부품기술", 전자부품연구지, 1997년5월호, pp.26-40
9. 김성구, 윤형도, 윤대원, 한상필, 김창민, 박계춘, 유용택, "x-cut LiNbO₃ 광도파로제작 및 Ti 두께에 따른 Near-field pattern 특성변화", 한국전기전자재료학회, 제11권 제2호, 1998.2
10. 김성구, 윤형도, 윤대원, "Air 분위기로 제작한 Ti:LiNbO₃ 도파로 특성", 한국전기전자재료학회, 제9권 7호, 1997년 8월.
11. L. McCaughan and E. J. Murphy, "??", IEEE J. Quantum Electron., QE-19, 131, 1983.
12. 日本 應用物理學會, 光集積回路, 朝倉書店, pp.113-135. 1983
13. 小松, 昭和 60 年度電子通信學會綜合全國大會, 1073.