

# x-cut LiNbO<sub>3</sub> 광도파로 제작 및 Ti 두께에 따른 Near-field 특성변화

논문  
11-2-11

## Preparation of x-cut LiNbO<sub>3</sub> Optical Waveguide and the Change in Near-field Properties according to Ti thickness

김성구\*, 윤형도\*, 윤대원\*, 한상필\*, 김창민\*, 박계춘\*\*, 이진\*\*, 유용택\*\*\*

(Seong-Ku Kim, Hyung-Do Yoon, Dae-Won Yoon, Sang-Pill Han, Chang-Min Kim, Gye-Chun Park, Jin Lee, Yong-Taek Yoo)

### Abstract

The optical near-field patterns, propagation loss and mode sizes of x-cut Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide which was fabricated by Ti-diffusion varying with Ti strip thickness in wet oxygen atmosphere were discussed at optical wavelength 1550nm. As Ti thickness increased from 760Å, the insertion loss of waveguide was decreased. But at Ti thickness 1500Å, mode sizes are widely broadened. The Ti thickness of below 1100Å and above 1500Å showed negative effects to propagation loss and fiber coupling. The best Ti thickness for fabricating low propagation loss and good fiber coupling was inferred to be between 1100Å-1500Å in our conditions. And for Ti thickness 1150Å, its propagation loss, horizontal/vertical mode sizes were showed 1.61 dB/cm, 11.9/8.9μm for TM, 0.22 dB/cm, 12.0/9.1μm for TE respectively.

**Key Words(중요용어)** : Near-field pattern(근거리모드), Propagation loss(전송손실), Insertion loss(삽입손실), Ti:LiNbO<sub>3</sub>(티타늄확산 광도파로), Fiber Coupling(파이버결합), Mode size(모드크기)

### 1. 서론

LiNbO<sub>3</sub> 계 광소자는 광통신, 광정보처리, 광응용 계측 등 기술분야에 중요한 위치를 차지하고 있다는 점은 말할나위도 없다<sup>1)</sup>. 특히 장래 광전송, 광교환 등 광파이버 시스템에 있어서 수십 Gb/s를 넘는 MUX/DEMUX 또는 클럭재생등에 적용이 기대되는 LiNbO<sub>3</sub> 광소자는 스위칭시간 -10ps 초고속 광스위치의 실현이 전망되고 있기도 하다<sup>2,3)</sup>. LiNbO<sub>3</sub> 결정은 테라 10<sup>12</sup> 헤르츠 이상 고속응답특성인 전기광학 효과를 매개로, Ti을 내부확산시켜 제작한 광도파로

는 <0.2dB/cm 저손실 제작이 가능하며 광파이버와 정합성이 뛰어난 등 이러한 요구에 부응하는 소자를 제작 할 수 있다.

본 연구에서는 x-cut LiNbO<sub>3</sub>를 사용하여 광도파로를 제작하고(Casix社, china) 단일모드특성과 TE 및 TM 모드를 모두 지원하는 제작조건을 조사하기 위해서 Ti 스트립 두께를 변화시켰다. 제작한 광도파로 중에서 가장 양호한 특성을 나타낸 Ti 두께는 1150Å 로 이때 전송손실은 TM 경우 1.61 dB/cm, TE 모드 경우 0.22 dB/cm 였고, TM 모드크기는 횡방향 11.9 μm, 종방향 8.9μm를 나타내었으며, TE 모드크기는 횡방향 12.0 μm, 종방향 9.1 μm를 나타내었다. 제작조건 고찰로부터 Ti 두께 1150-1500Å 사이에 가장 좋은 제작조건이 존재할 것으로 판단되었으며, 또한 제작된 광도파로의 TM 모드 삽입손실이 큰 원인을 규명하기 위하여 기관표면사진을 분석하였으며, 분석결과 표면에 미세한 스크래치가 다수

\* : 전자부품연구소  
(경기도 평택시 진위면 마산리 455-6, Tel:0333-610-4350  
Fax:0333-610-4126)  
\*\* : 목포대학교 전기공학과  
\*\*\* : 전남대학교 전기공학과  
1997년 7월 24일 접수, 1997년 12월 15일 심사완료

분포하여 도파광 산란에 기여함으로써 삽입손실이 증대하는 원인으로 작용한다고 판단되었다.

## 2. 실험 및 방법

그림 1에 광도파로 제작 공정도 및 공정기판을 나타내었다. 티타늄증착에 사용한 장비는 Electron-beam evaporator로서 초당 1A/s 정도로 장시간 증착하여 패턴화하였으며 티타늄 증발원과 기판사이 거리를 60cm 이상 간격을 유지하면서 회전시켜 3인치 기판의 표면 균일도를 유지코자 하였다.

그림 2은 티타늄 내부 확산에 이용한 튜브 확산로 개략도이다. 3인치 시편은 확산로 중앙부근 확산 zone에 알루미나 받침대로 받혀진 상태로 위치시켰으며 2시간동안 1050℃ 로 확산온도를 끌어올린 후

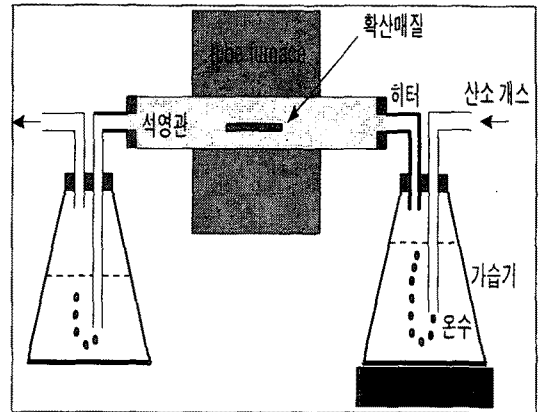
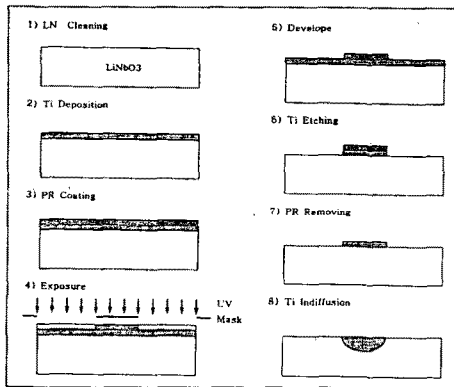
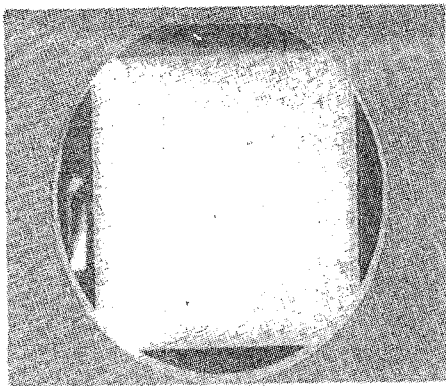


그림 2. 확산로 구조  
Fig. 2. Diagram of diffusion furnace

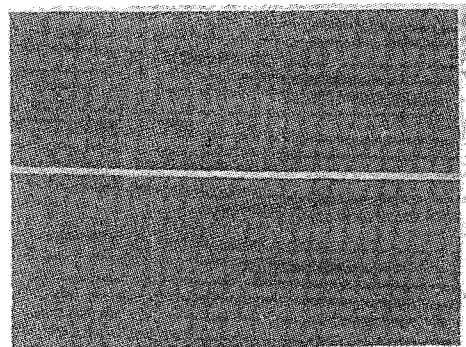


(a)

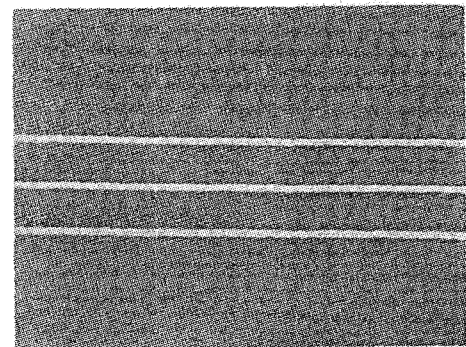


(b)

그림 1. 공정도 및 기판, (a) 공정도 (b) 기판  
Fig. 1. Process diagram and substrate, (a) Process diagram (b) substrate



(a)



(b)

그림 3. 확산 前 Ti 스트립(×200). (a) 7μm (b) 8μm  
Fig. 3. Ti stripe, before diffusion(×200). (a) 7μm (b) 8μm

8시간 동안 확산로를 유지시켰다. 버블러 온도는 90℃로 맞추고 산소는 초당 5-10 bubble씩 유지토록

조절하였다. 확산로 출구는 실리콘오일을 사용하지 않고 증류수로 교체하여 실험하였다.

그림 3은 제작된 시편 스트립 확대사진을 보였다. 삽입손실 및 근거리모드측정은 Melles Giot社의 Ultra-positioner를 사용하여 입력측에 Polarization maintaine fiber로 광도파로와 정렬하며 광이 출력되는 단자에 40배율의 볼록렌즈로 확대하여 적외선 감지 CCD 카메라로 측정하였다. 측정된 모드는 종방향과 횡방향크기를 측정하고 이 결과를 PMF로 측정한 모드와 비교하여 정확한 길이를 산정하였다. 그리고 삽입손실측정은 도파로 끝단에 40배 렌즈로 확대한 모드를 관찰하고 그 중에서 도파로를 따라 도파된 단일모드 부분만을 적외선감지 실리콘포도다이오드로 강도를 측정하여 손실을 산정하였다. 입력측에 굴절률정합오일을 사용하는 경우 그렇지 않는

경우에 비해서 삽입손실은 20-30% 이상 감소하는데 실험결과와 일관성을 유지하기 위해서, 여기서는 굴절률정합오일을 사용하지 않았다.

### 3. 결과 및 고찰

확산前 Ti 두께가 광도파로 형성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 Ti 두께를 700Å ~ 1500Å로 변화시키면서 전자빔 증착법으로 증착시켰다. 그 중 본 논문에서는 두께 760Å, 1100Å, 1150Å 및 1500Å에 대한 결과를 서술하였다. 확산온도는 모두 1050°C로 하였고 시간은 8시간으로 제한하였다.

표 1은 확산前 Ti 두께가 760Å 일 때 확산조건을 나타내었다. 여기서는 확산시간 5시간 및 8시간 일때 결과를 나타내었다. 그림 4의 근거리 패턴에서 보는 것처럼 구가지 경우 모두 도파로 형성은 TE 모드만 약하게 지지하고 있을뿐 TM에 관해서는 거의 도파되지 않았고 전송손실은 매우 크게 나타났다. 그림 4(f)는 마크젠다 간섭기의 도파형상인데 기판으로 누설되는 광량이 매우 큰 것으로 판단되었다. 여기서 사용한 1550nm Tunable Semiconductor Laser(Santec社)는 TE 모드가 강한 TE 및 상대적으 약한 TM이 혼재된 편광성분으로 도파로에 입사됨으로 출력측에 편광자를 부착하여 각 성분만을 근거리패턴으로 필터링한 것이다. 따라서 그림 4(b) TE/TM 은 입력측에 TE로 입사시키고 출력측에서는 편광자로 TM 성분만을 골라 근거리패턴으로 본 것을 설명한 것이다. 그림 5는 확산 후 도파로 표면사진과 두께를 나타내었다. 확산 후 혼적은 약 600Å으로 현미경 사진에서와 같이 선명한 윤곽을 나타내었다. 이 실험으로부터 본 실험조건에서 두께 약 700Å은 도파로 형성에 기여하지 못하는 것으로 판명되었다.

표 2는 Ti 두께를 1100Å로 했을 때 확산조건이다. 이때 근거리패턴은 그림 6과 같다. 두께가 1100Å일 때 비로서 TE 및 TM 모드가 모두 도파되었지만 TM 모드는 약해서 제대로 광도파로가 형성되었다고 볼 수 없었다. 또한 도파손실이 매우 크게 측정되어 도파광 주변으로 누설량이 많았고 그 모드크기도 매우 작았다. 따라서 확산前 Ti 두께를 좀더 증가시킬 필요가 있었다. 그림 7은 도파된 TE 모드의 횡모드와 종모드 형상을 나타내고 있으며, 종모드는 정확히 헬름-가우시안 분포를 하고 있으나 횡모드는 가우시안 분포가 정확하게 나타나지 않는 형태였다. 그림 8은 이 도파로의 확산 후 표면사진과

표 1. 확산조건

Table 1. Diffusion conditions

Substrate/Thickness	x-cut LiNbO <sub>3</sub> China/0.5t
Diffusion Before/After Thickness	760 Å / 600 Å
Diffusion Temperature/Time	1050 °C / 5 hours
Atmosphere/Bubbling	Wet Oxygen / 3-5 b/s
Bubbler Temperature	90°C

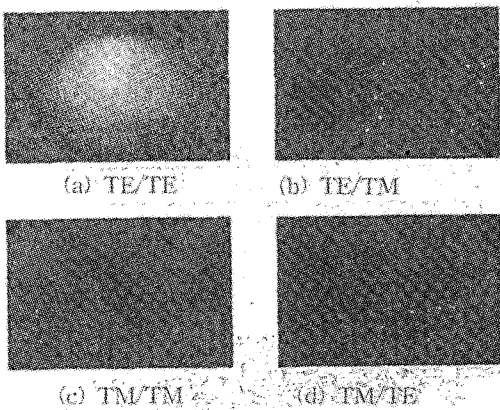
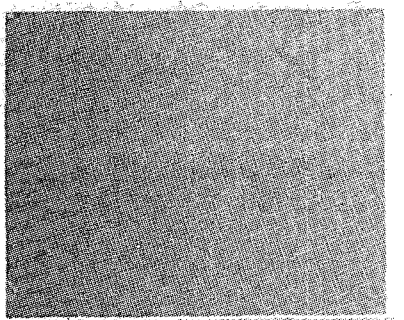


그림 4. 근거리 모드.

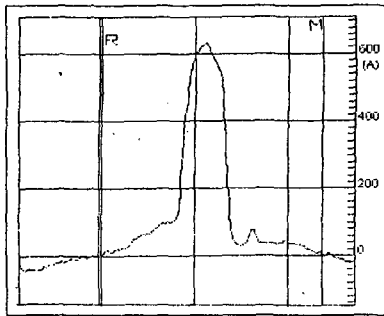
- (a) TE/TE (b) TE/TM (c) TM/TM
- (d) TM/TE

Fig. 4. Near-Field Patterns.

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



(a) surface morphology



(b) thickness

그림 5. 표면사진 및 두께.

(a) surface morphology (b) thickness

Fig. 5. Surface morphology and thickness.

(a) surface morphology (b) thickness

표 2. 확산조건

Table 2. Diffusion conditions

Substrate/Thickness	x-cut LiNbO <sub>3</sub> China/0.5t
Diffusion Before/After Thickness	1100 Å / 600 Å
Diffusion Temperature/Time	1050 °C / 8 hours
Atmosphere/Bubbling	Wet Oxygen / 3-5b/s
Bubbler Temperature	90°C

두께를 나타내고 있다. 이 시편의 TE 모드 삽입손실은 0.57 dB/cm 였으며 횡모드 크기는 13.8 $\mu$ m, 종모드 크기는 9.92 $\mu$ m를 나타내었다. TM 모드는 손실이 매우 커서 기록하지 않았다.

Ti 두께를 조금 높혀 1150Å 로 했을 때 실험결과를 표 4와 5 그리고 그림 9, 10, 11에 나타내었다. 그림 9의 근거리패턴에서 보는 바와 같이 TE 및 TM 모드가 확실하게 도파되었고 그 형태도 매우 양호하였다. 그러나 TM 모드 삽입손실은 평균 7.7dB였고 TE 모드 삽입손실은 2.16dB 로 측정되어 도파광

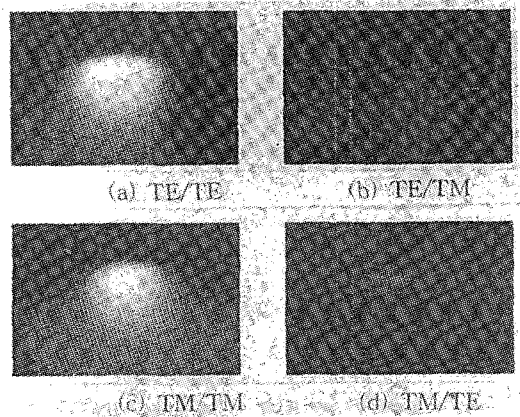
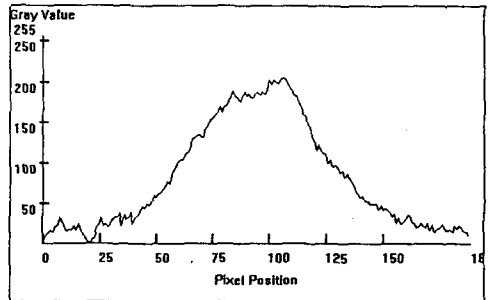
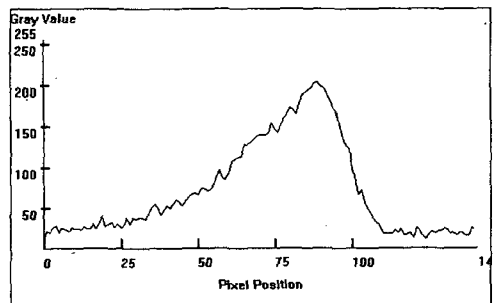


그림 6. 근거리 모드. (a) TE/TE (b) TE/TM (c) TM/TM (d) TM/TE

Fig. 6. Near-Field Patterns. (a) TE/TE (b) TE/TM (c) TM/TM (d) TM/TE



(a) 횡 모드

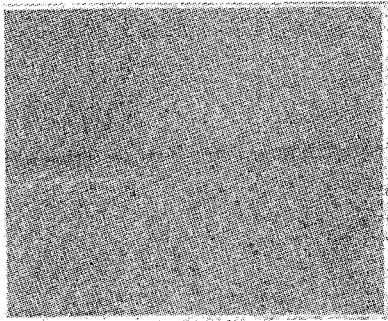


(b) 종 모드

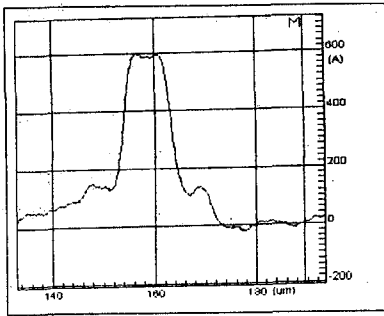
그림 7. 모드형상(TE mode)

(a) 횡 모드 (b) 종 모드

Fig. 7. Mode profiles. (a) horizontal mode (b) vertical mode



(a)



(b)

그림 8. 표면사진 및 두께.

(a) surface morphology (b) thickness

Fig. 8. Surface morphology and thickness.

(a) surface morphology (b) thickness

표 3. 손실 및 모드크기(TE mode)

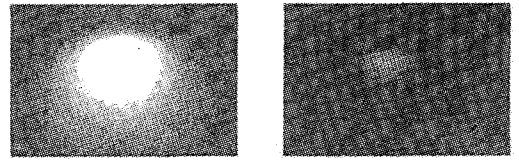
Tabl 3. Loss and Mode Size

삽입손실	2.18 dB
도파로 길이	3.8 cm
전송손실	0.23 dB/cm
모드크기 횡/종	13.8 μm/ 9.92 μm
도파로 폭	8 μm

표 4. 확산조건

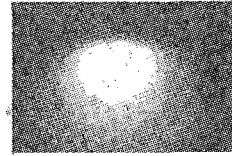
Table 4. Diffusion condition

Substrate	x-cut LiNbO <sub>3</sub> China/0.5t
Diffusion Before/After Thickness	1150 Å/ 600 Å
Diffusion Temperature/Time	1050 °C/ 8 hours
Atmosphere	Wet Oxygen
Bubbler Temperature	90°C, 3-5 b/s



(a) TE/TE

(b) TE/TM



(c) TM/TM

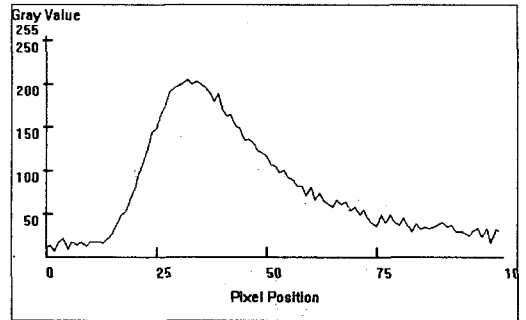
(d) TM/TE

그림 9. 근거리모드, 8μm. (a) TE/TE (b) TE/TM

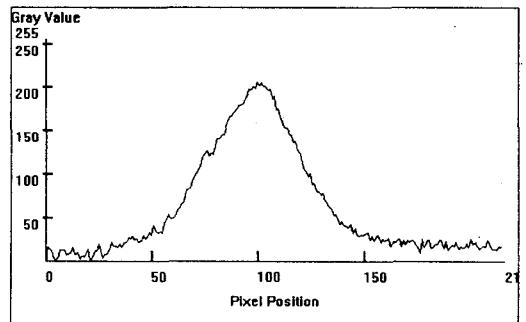
(c) TM/TM (d) TM/TE

Fig. 9. Near Field Patterns. (a) TE/TE

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



(b) 횡모드



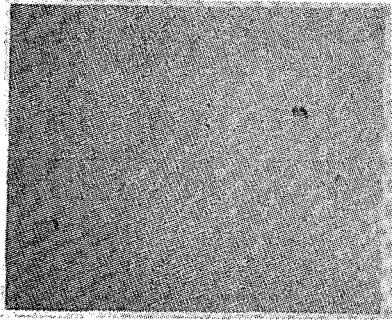
(a) 종모드

그림 10. 모드형상(TM 모드). (a) 횡 모드

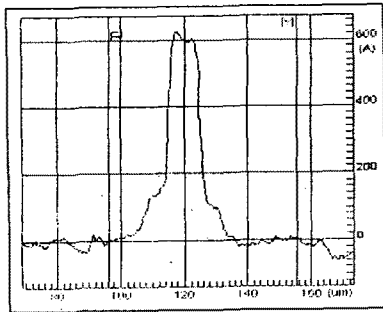
(b) 종 모드

Fig. 10. Mode profiles. (a) vertical mode

(b) horizontal mode



(a)



(b)

그림 11. 표면사진 및 두께. (a) 표면사진 (b) 두께  
Fig. 11. Surface Morphology and thickness.  
(a) surface morphology (b) thickness

표 5. 손실 및 모드크기

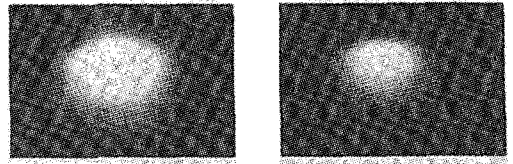
Table 5. Loss and Mode Size

	TM	TE
삽입손실	① -8.0 dB ② -7.4 dB	-2.16 dB
도파로 길이	3.8 cm	3.8cm
전송손실	① 1.76 dB/cm ② 1.46 dB/cm	0.22 dB/cm
모드크기 횡/종	11.9 $\mu$ m/8.9 $\mu$ m	12.0 $\mu$ m/9.1 $\mu$ m
도파로 폭	8 $\mu$ m	8 $\mu$ m

표 6. 확산조건

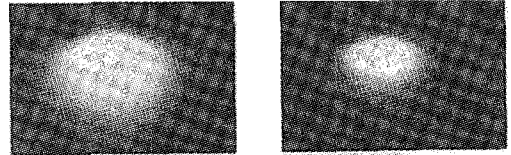
Table 6. Diffusion condition

Substrate	x-cut LiNbO <sub>3</sub> China/0.5t
Diffusion Before/After Thickness	1500 Å / 600 Å
Diffusion Temperature/Time	1050 °C / 8 hours
Atmosphere	Wet Oxygen
Bubbler Temperature	90°C, 2개/sec



(a) TE/TE

(b) TE/TM

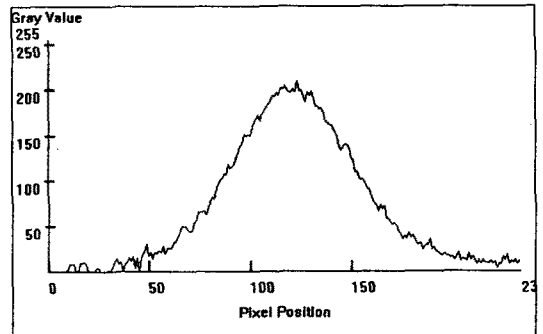


(c) TM/TM

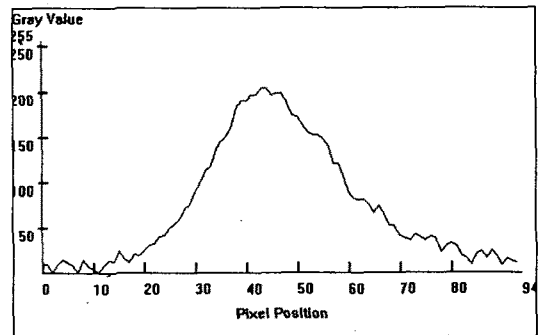
(d) TM/TE

그림 12. 근거리모드, 8 $\mu$ m. (a) TE/TE (b) TE/TM  
(c) TM/TM (d) TM/TE

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



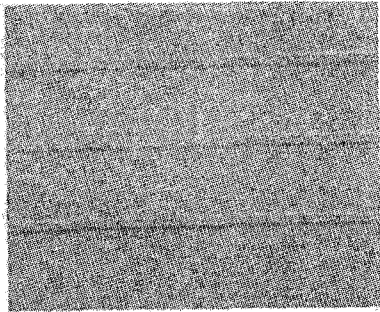
(a)



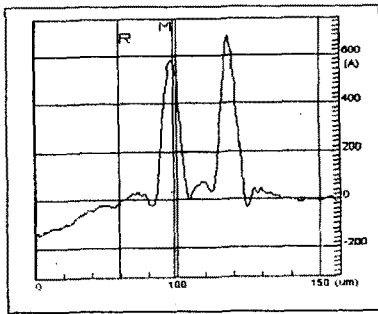
(b)

그림 13. 모드형상(TM 모드). (a) 횡 모드  
(b) 종 모드

Fig. 13. Mode profiles. (a) Vertical mode  
(b) horizontal mode



(a)



(b)

그림 14. 표면사진 및 두께. (a) 표면사진 (b) 두께  
Fig. 14. Surface Morphology and thickness.

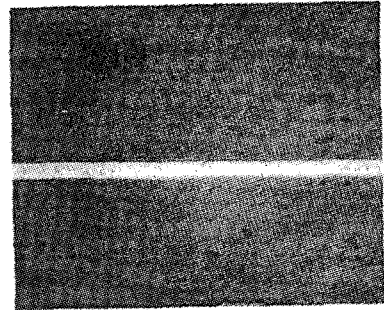
(a) surface morphology (b) thickness

표 7. 삽입손실 및 모드크기

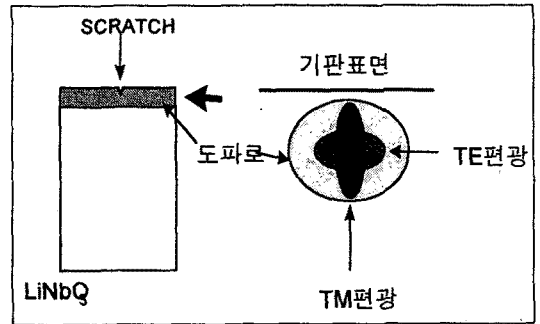
Table 7. Loss and Mode size

	TM	TE
Insertion Loss	① -5.6 dB ② -4.0 dB	-2.10 dB
Waveguide Length	3.49 cm	3.49 cm
Propagation Loss	① 1.23 dB/cm ② 0.77 dB/cm	0.22 dB/cm
Mode Size Horizontal/Vertical	15.73 μm/ 7.1 μm	16.0 μm/8.1 μm
waveguide strip width	8 μm	8 μm

의 근거리패턴이 양호할지라도 TM 모드는 도파층에 손실되는 것으로 판단되었다. 이 점은 두께를 계속 증가시켜도 TM 모드 손실이 줄어들지 않는 것으로 보아, 도파로 형성에 관여하는 외적요인이 있는 것으로 판단되었는데, 이점에 관해서는 뒤에서 언급하였다. 지금까지 실험으로부터 도파로가 형성되어



(a)



(b)

그림 15. 기관표면 결함 사진 및 손실원인.

(a) 결함사진 (b) 손실원인

Fig. 15. Damage photograph of wafer surface.

(a) damage photograph (b) cause of loss

TE 및 TM 모드를 지원하기 시작하는 초기 Ti 두께는 약 1150Å 전후로 사료된다. 그림 10에 TM 모드형상을 그림 11에 확산후 사진 및 두께를 각각 나타내었고 표 5에 손실 및 모드크기를 표시하였다.

이번에는 확산 前 Ti 두께가 매우 높을때 도파로 형성 미치는 영향을 알아보기 위해서 Ti 두께 1500Å을 증착하고 확산하여 그 실험 및 결과를 표 6, 7 그리고 그림 12, 13, 14에 나타내었다. 이 시편은 입사되는 파장 1550nm 레이저 광원세기를 3배 이상 했을 때 도파모드 특성이다. 편광자로 반대성분을 필터링했을 때 그림 6, 9 등에서는 도파모드가 관측되지 않은 것과 마찬가지로 이 시편도 광세기를 낮추면 도파형상이 보이지 않는다. 이 시편의 특징은 입력단에 접속되는 광파이버의 위치에 따라 그 모양이 변화하고 경우에 따라서 광모드가 2개로 나타나는 멀티모드형상을 보이기도 하였다. 삽입손실과 전송손실을 산정해보면 이 시편이 가장 작지만, 소자 제작단계로 보아 광파이버 피그테일링을 수행할 때 심

각한 문제를 야기시킬 것으로 분석되었다. 그 이유는 도파된 광 모드 크기가 너무 커서 광파이버의 코아에 양호한 접속을 기대하기 어렵기 때문이다. 따라서 지금까지 연구로 미루어 볼 때 양호한 광도파로가 형성되기 시작하는 두께는 1150Å이며 멀티모드로 진행되는 시작점은 1500Å인 것으로 사료된다. 이 시편의 전송손실은 TM 모드 경우 평균 1 dB/cm, TE 모드는 0.22 dB/cm를 나타내었다.

그림 15에 시편제작에 사용한 기판의 결합사진을 나타내었다. 본 연구에 사용한 기판은 전표면에 걸쳐서 그림과 같은 scratch가 있으며 그 크기도 다양한 것으로 나타났다. 본 실험에서 제작한 시편이 모두 TM 모드가 Ti 초기 두께에 관계 없이 삽입손실을 크게 나타내는 이유 중에 하나는 그림 16 경우와 같이 기판표면 scratch로 인해서 도파하는 TM 모드가 산란되고 일부 손실됨으로서 광도파손실을 동반하는 것으로 생각되며 반면 TE 모드는 기판 결합에 관계 없이 잘 도파하기 때문으로 생각되나 이 문제를 규명하기 위한 정량적인 분석이 필요하다고 사료된다. 그리고 본 연구에서 제작된 시편은 Ti 두께가 다른 문헌에서 보고된 것보다도 상당히 높은 이유로는 전자빔증착법을 사용함으로써 증착막의 원자밀도를 조밀하게 하지 못했다는 점과 증착시 기준으로 사용한 증착률 1Å/s 이 너무 빨라서 조밀하고 밀도가 높은 Ti 막을 제작하지 못함으로써 상대적으로 많은 두께의 Ti 이 확산시 요구된 것으로 보인다. 그 예로 5 Å/s 로 증착한 시편의 경우 도파되는 근거리패턴은 같은 두께의 1Å/s 로 증착된 것보다도 그 형태가 조잡하다는 점을 근거로 들 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 x-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판에 Ti을 확산하여 광도파로를 제작하고 모드특성을 조사하였으며, 레이저 구동광장 1550nm로 동작시켰을 때 다음과 같은 결론을 내렸다.

- ① TE 및 TM 이 도파가 시작되는 확산 前 Ti 두께는 1100Å 前後이다.
- ② 확산전 Ti 두께가 1150Å 부터 광도파로가 TM 및 TE 모드를 모두 지지하는 것으로 나타났다.

- ③ 두께가 1500Å 일 때부터는 도파모드가 비대해졌으며, 멀티모드 현상이 나타나는 등이 조건을 피그테일링에 활용할 경우 모드불일치가 클 것으로 사료된다.
- ④ 삽입손실은 Ti 두께가 증가되면서 감소하였으나 그 한계는 1500Å 전후로 판단되며, 전송손실도 Ti 두께가 증가함에 따라 TE 및 TM 모두 그 삽입손실은 감소하였고, 두께 1150 Å부터 TE 모드는 0.2 dB/cm 정도로 가장 낮은 값을 갖었으나, TM 모드는 더욱 두꺼울수록 더욱 감소하였다.
- ⑤ 가장 양호한 도파로 형성 Ti 두께는 1200-1500Å 사이에 존재할 것으로 추정되었다.
- ⑥ Ti 두께에 관계 없이 TM 모드 전송손실이 1dB/cm 정도로 큰 이유는 기판자체에 결합에 의한 영향이 큰 것으로 생각된다.
- ⑦ 본 연구의 Ti 두께가 두꺼운 이유는 증착에 사용되는 E-beam evaporator의 증착조건에 따른 영향이 큰 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

1. Osamu Mitomi, Hiroshi Miyazawa, and Kazuto Noguchi, "Waveguide-type high-speed LiNbO<sub>3</sub> optical switches", NTT R&D Vol.44 No.7, pp.566-570, 1995.
2. Y.Shimazu, M.Tsukada and S.Kikuchi, "Ultra-fast photonic packet switch with optical output buffer", in Tech. Digest PS'90, pp.220-222, 1990.
- (3) M.Nakazawa, K.Suzuki, H.Kubota, E.Yamada and Y.Kimura, "20Gbit/s-3,000km straight-line soliton transmission beyond Gordon-Haus limits", in Tech. Dig. OEC'94, PDI-3, pp.6-7, 1994.
4. 김성구, 윤형도, 윤대원, 한상필, 허현, 류용택, "Mach-Zehnder LiNbO<sub>3</sub>:Ti 광도파로 제작 및 특성", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회, OA-4, 1997.
5. Juichi Noda and Masaharu Fukuma, "Phase matching temperature variation of second-harmonic generation in Li out diffusion LiNbO<sub>3</sub> layers", J.Appl.Phys.51(3), pp.1379-1384, 1980.