

저손실 Ti:LiNbO₃ 광도파로제작 및 BPM 해석

논문
11-5-10

BPM Analysis and Preparation of Low Loss Ti:LiNbO₃ Optical Waveguide

김성구*, 윤형도*, 윤대원*, 박계춘**, 이 진**

(Seong-Ku Kim, Hyung-Do Yoon, Dae-Won Yoon, Gye-Chun Park, Jin Lee)

Abstract

We investigated the preparation and guided-mode properties of Ti:LiNbO₃ waveguides which were fabricated by Ti in-diffusion. The diffusion method to reduce the Li out-diffusion was proposed. The optical guided-mode and propagation loss based on butt-coupling pigtailed with PMF-input were measured. How to improve the polishing grade of waveguide endfaces is newly proposed in this paper. To show the mode propagations, the BPM simulations of channel waveguide are described.

Key Words(중요용어) : Ti:LiNbO₃ waveguide(티타늄확산 광도파로), Butt-coupling(버트커플링), BPM, Mode size(모드크기), Polishing method(연마방법)

1. 서 론

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 되었다. 1990년대 초 이미 다가올 21세기를 화려한 초고속, 대용량 광통신시대로 규정하고 이를 구현할 각종 모듈개발에 박차를 가하여 왔다^{1,2)}.

Ti 내부확산으로 제작된 광도파로는 다른방식으로 제작된 광도파로와 비교해볼 때 더 좋은 특성을 나타낸다고 알려져 있으며³⁾ 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 결합하여 고기능 하이브리드소자로 이어지는 추세에 있다^{4,5)}.

광도파로 제작방법은 외부확산방법, 이온교환방법, 내부확산방법 및 양자교환방법 등이 있으며 이 중에서 가장 많이 사용되는 방법이 내부확산과 양자교환방법이다. 내부확산 원리는 수백 Å 두께의 얇은 금속박막을 기판에 증착한 후 높은 온도로 가열함으로써 금속을 결정내부로 확산하는 것이다. 이 방법은 상광선과 이상광선 굴절율을 모두 증가시키며 광손실이 <1dB/cm 인 도파로를 제작할 수 있다. 광소자에 응용하기 위해서는 광전송손실이 <1dB/cm 이어야 하며, <0.2dB/cm 이하는 극저손실 광도파로로 그리고 <0.5dB/cm 는 저손실로 분류되어 광도파로소자에 응용되고 있다^{6,7,8)}.

본 연구에서는 약 800Å 두께 Ti 스트립 광도파로를 3인치 z-cut LiNbO₃에 제작한 후 확산온도 및 확산시간을 1050℃, 8시간으로 설정하였다. 확산은 공기분위기로 하고 3인치 도파로 스트립 기판에 또 다른 3인치 기판을 덮어 확산하는 Li 외확산 억제

* : 전자부품종합기술연구소
(경기도 평택시 진위면 마산리 455-6, Fax: 0333-610-4126)
E-mail :)

** : 목포대학교 공과대학 전기공학부

*** : 전남대학교 공과대학 전자공학과

1997년 7월 24일 접수, 1998년 4월 2일 심사완료

방법으로 장착하여 저손실 광도파로를 제작에 응용하였다. 또한 제작된 시편의 모드특성 및 도파손실을 측정하여, 본 방법이 저손실 광도파로 제작에 유용함을 보이고자 하였다. 그리고 광도파로를 BPM 시물레이션하여 도파현상을 설명하고자 하였다. 본 연구에서 제작된 광도파로 도파손실은 모두 0.5dB/cm 근처에서 측정되었고 특히 Ti 두께가 900Å에 가까울수록 도파손실이 감소하였으며, 향후 두께에 대한 연구보완이 요구되었다. 제작된 광도파로를 피그테일링한 결과 fiber-to-fiber 삽입손실이 5.4dB로 나타났으며 이를 구동시킨 결과, 구동전압 6V를 보였다.

2. 실험 및 방법

그림 1에 광도파로 제작에 이용한 튜브확산로 개략도를 나타내었다. 일반적으로 확산로에 산소를 유입하고 수증기와 증기가 혼합된 분위기로 확산을 10시간정도 수행하나 본 연구에서는 산소개스를 유입하지 않고 공기분위기로 유지하면서 그림 2에서와 같이 본 연구에서 제안한 Li 외부확산을 억제하는 방법으로 Ti 확산을 수행하였다. 본 연구에서 제작한 시편의 이름 및 제작조건은 표1에 나타내었다. 확산전 Ti 초기두께는 평균 800Å 정도였고 도파로 폭은 각각 7 및 8μm 였으며 3인치 웨이퍼 위에 16블록 × 4 개 씩 제작되도록 설계하였다. 그림 3은 본 연구에서 제시한 기관 측면 연마방법으로서 도파로 바로 위에 버퍼층을 쌓고 다시 금속층을 형성하여 도파로를 보호한다음 폴리싱을 하면 그 금속층 부분이 매우 깨끗한 폴리싱 결과를 얻었다. 이 방법은 대량생산에 응용가능한 것으로 판명되었고 실험실 수준에서 20개 정도 내부칩을 동시에 폴리싱하였을 때 모두 양호한 결과를 얻었다.

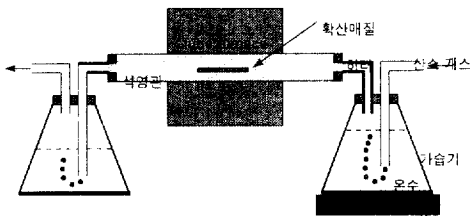


그림 1. 확산로 구조

Fig. 1. Structure of Diffusion Furnace

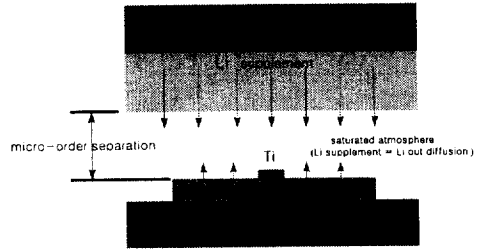


그림 2. Li 외확산 억제방법

Fig. 2. Suppression method of Li out diffusion

3. 결과 및 고찰

그림 4에는 확산 前後 형성된 Ti 스트립과 광도파로 특성을 나타내는 변수를 나타내었다. 일반적으로 광도파로 수직방향 광형태는 헬미트-가우시안(Hermite-Gaussian Func.) 형태이며 수평방향은 가우시안(Gaussian) 형태의 광분포를 나타내는 것으로 알려져 있고 도파광모드 크기는 $1/e^2$ 되는 점을 유효광전력으로 규정하고 이를 측정하고 있다.

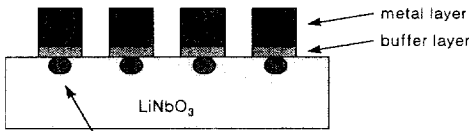
표 2에 측정된 시편들의 광도파로 제원을 나타내었다. 시편모두 Y-분기 각도는 0.5°로 설계하였고 그 형태는 SIN 및 COS 함수가 조합되는 S-밴드로 설계하지 않았다.

표 1. LiNbO₃ 광도파로 제작조건

Table 1. Fabrication samples of LiNbO₃ optical waveguide.

기판이름(cu V두께)	P0 (Z/0.5t)	P1 (Z/t)	P2 (Z/t)	P3 (Z/t)	P4 (Z/t)
전후 Ti 두께, Å	729 (534)	951 (580)	802 (488)	790 (553)	922 (527)
도파로 폭, μm	7, 8	7, 8	7, 8	7, 8	7, 8
도파로 길이, cm	6	6	6	6	6
온도, °C	1050	1050	1050	1050	1050
시간, hour	7	8	8	7	7
분위기	공기중 확산	공기중 확산, Li 외확산 억제		공기중 확산	

※ diffusion temperature(1035-1045°C)



OPTICAL WAVEGUIDE

(a) 본 연구에서 제안한 폴리싱 방법



(b) 폴리싱 후 단면사진(왼쪽:×500, 오른쪽:×1000)

그림 3. 폴리싱방법 및 단면사진

Fig. 3. Proposed polishing method and its cross-sections.

그림 5에 시편 P2 Y-branch 도파모드를 나타내고 있다. 본 연구에서 사용한 Tunable Laser Source는 출사광원이 TE 모드세기가 강한 TE/TM 혼성모드로서 정확한 도파특성을 조사하기 위하여 출력단에 편광자를 연결하고 측정에 임하였다. 여기서 제시한 시편의 도파로 제원은 도파로스트립폭이 7 μ m, 그 간격이 16 μ m 인 마크젠다간섭기를 절단후 폴리싱한 시편이다. P2, P3 모두 TE 및 TM 성분은 모두 양호하게 통과되고 있음을 모드 사진으로 확인하였다. 그러나 출사 도파로공간에 상호작용이 있는 것으로 판단되어 좀더 정확한 분석을하고자 BPM 시뮬레이션을 수행하였다.

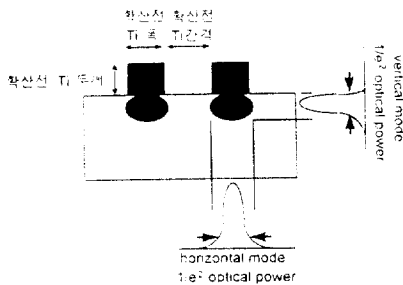


그림 4. 광도파로 Ti 제원 및 모드관계.

Fig. 4. Relationship Ti dimensions and optical waveguide mode.

표 2. 도파로 Y-분기 각도 및 길이

Table 2. Optical waveguide dimensions of Y-branch

	P1	P2	P3	P4
길이, L	6.6cm	6.6cm	6.6cm	6.6cm
각도,	0.5° /	0.5° /	0.5° /	0.5° /
테이퍼길이	3350 μ m	3440 μ m	3440 μ m	3350 μ m
평행arm 길이	50200 μ m	50200 μ m	50200 μ m	50200 μ m
채널arm 길이	4550 μ m	4460 μ m	4460 μ m	4550 μ m

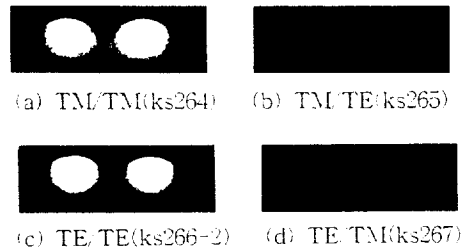
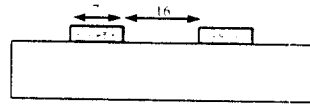


그림 5. 시편 도파모드(P2), (OPELS, Tunable Semiconductor Laser, 1550 nm)

Fig. 5. Waveguide modes of sample P2

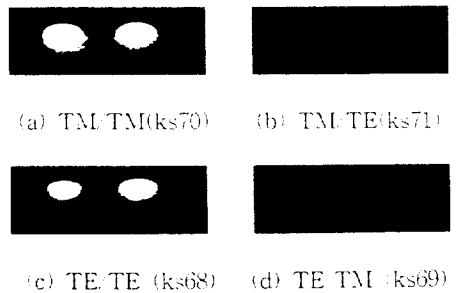
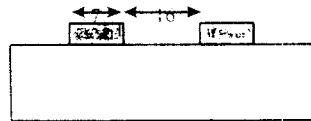


그림 6. 시편 도파모드 (P3), (OPELS, Tunable Semiconductor Laser, 1550 nm)

Fig. 6. Waveguide modes of sample P3

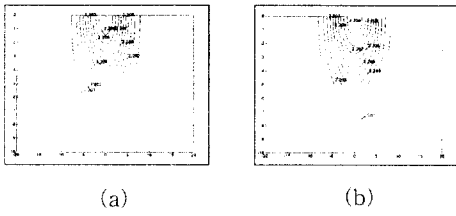


그림 7. 계산된 index-change profile(P2, TMmode)
 (a) $7\mu\text{m}$ channel waveguide (b) $8\mu\text{m}$ channel waveguide

Fig. 7. Calculated index-change profile
 (a) $7\mu\text{m}$ channel waveguide (b) $8\mu\text{m}$ channel waveguide

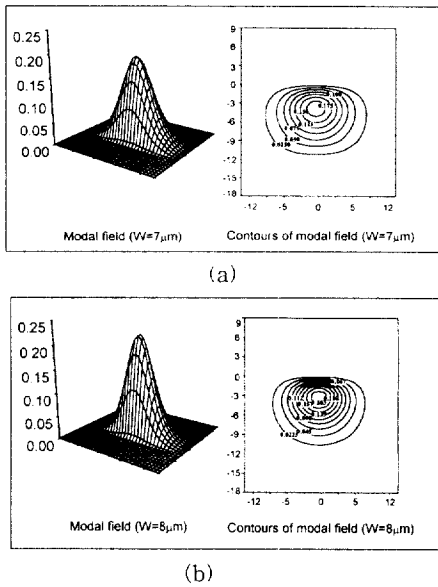


그림 8. 광전계 및 contour 분포(P2, TM mode)
 (a) $7\mu\text{m}$ 채널도파로 (b) $8\mu\text{m}$ 채널도파로

Fig. 8. Optical modal field and contour
 (a) $7\mu\text{m}$ 채널도파로 (b) $8\mu\text{m}$ 채널도파로

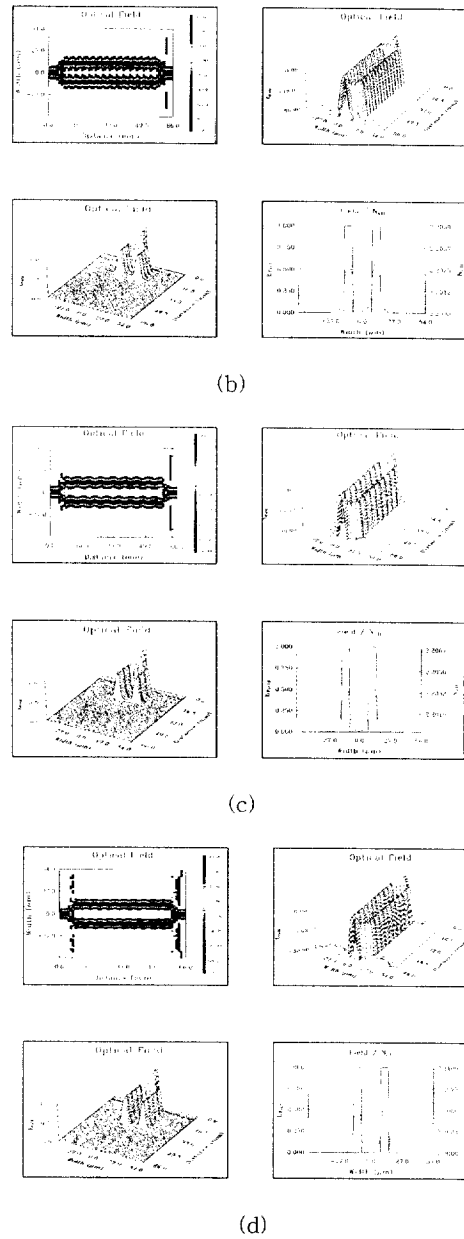


그림 9. 마크젠다 간섭기 도파로 BPM 시뮬레이션
 (P2, step index 근사)

Fig. 9. Mach-Zehnder interferometric waveguide
 BPM simulation
 (a) waveguide index, 2.203
 (b) waveguide index, 2.205
 (c) waveguide index, 2.207
 (d) waveguide index, 2.210

그림 5는 8시간 확산한 시편이고 그림 6은 7시간 확산한 시편이다. 두 시편간의 차이점은 7시간 확산한 시편의 모드가 근거리패턴, 광모드세기 및 크기를 측정된 결과 그림 6의 도파로의 도파모드 중심점에서 광세기가 크고 광모드 크기가 작은 것으로 보아 광감금이 더욱 좋은 것으로 판단되었다 그러나 TE 및 TM 모드의 근거리 패턴 크기에서 그림 6은 모드 차이가 비교적 커서, 두 모드를 동시에 이용하는 AOTF(acousto optic tunable filter) 등에서는 불리한 측면이 있고, 광변조기와 같은 특정한 모드 1개(TM)만 이용하는 분야에만 가능한 것으로 판단되었다. 반면 그림 5는 두 모드 모두 균일한 정도로 도파되는 것으로 나타났다. 그림 5, 6 두 모드사이에 커플링이 약간씩 존재하는 것으로 보였으며, 모든 시편은 TM 모드보다는 TE 모드가 좀더 커플링이 적은 것으로 나타났다.

광이 도파되는 사진으로 볼 때 그 광파워 중심은 기판표면에서 약간 아래에 존재하는데 그 도파로 굴절율변화를 분석하기 위해서 그림 7과 같은 모의실험을 하였다. 여기서는 채널형 도파로를 모델하여 굴절율변화를 관찰한 것이다. 확산전 Ti 이 존재한 표면에 가까울수록 굴절율이 증대하고 7 μ m 도파로는 최대 2.208, 8 μ m 도파로는 2.209 정도를 나타내고 있다. 모델링에 사용한 이론적 배경은 다음과 같다. 먼저 광도파로의 굴절율분포는 다음과 같다.

$$n(x, z) = n_s + \Delta n \cdot f(x) \cdot g(z) \quad (1)$$

여기서 n_s 는 기판의 굴절율이고, Δn , $f(x)$ 및 $g(z)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta n(\tau, w) = \frac{dn}{dc} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\tau}{dx} \operatorname{erf} \left(\frac{w}{2dz} \right) \quad (2)$$

$$f(x) = \exp \left\{ - \left(\frac{x}{dx} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

$$g(x) = \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{z+w/2}{dz} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z-w/2}{dz} \right) \right\} / 2 \operatorname{erf} \left(\frac{w}{2dz} \right) \quad (4)$$

여기서, dn/dc 는 Ti concentration에 대한 굴절율 변화량, dx 는 확산깊이, dz 는 확산깊이를 나타내며,

$$dx, z = 2\sqrt{Dx, z \cdot t} \quad (5)$$

이고 Dx, z 는 x 및 z 방향으로의 확산계수, t 는 확산 시간을 가리킨다.

도파로를 따라 도파하는 광의 중심은 굴절율이 가장 큰 2.208, 2.09 영역에 광파워 중심이 존재하기 보다는 그림 8과 같이 약 3~3.5 μ m 아래에 존재하여 가장 큰 광파워는 굴절율 2.205~2.207 사이 값을 가지는 영역을 도파한다⁹⁾.

마크젠다 간섭기형 도파로를 절단하고 측정된 근시야상에서 약간의 채널간 모드상호작용(coupling)이 존재하는 것으로 판단되었는데 이를 정확히하기 위해서 BPM(beam propagation method) 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 도파로를 계단형굴절율 분포를 갖는 것으로 가정하고 굴절율을 2.203, 2.205, 2.207 및 2.210으로 변화를 주어 실시하였다(그림 9 참조). 굴절율이 2.203인 채널도파로는 도파로간 상호작용으로 도파로 밖 영역에서 광전계 중첩이 발생하였고(그림 9(a)), 2.205로 근사시킨 경우 그 커플링 정도가 감소하였다(그림 9(b)). 2.207인 경우 그 커플링은 현저히 감소하였으나 마크젠다 간섭기 출력측에서 기판으로 방사되는 방사모드에 의해 약간의 광손실이 존재하는 것으로 나타났다(그림 9(c)). 굴절율이 2.210인 경우 두 평행 도파로간의 모드커플링은 완전히 사라졌으나 간섭기 입력/출력단에서 기판으로 방사하는 광손실로 너무 큰 굴절율도 도파광을 안전하게 강금하는 데 역작용을 나타내는 것으로 나타났다(그림 9(d)). 따라서 도파로 굴절율을 2.206~2.207 정도로 유지하는 광도파로가 가장 최적의 광강금을 하는 것으로 분석되었다. 이 결과는 그림 7과 8의 광파워 중심이 약 3 μ m 아래에 존재하는 것과 일치하였다.

그림 10은 시편 P2에 헬륨네온 레이저 632.8nm를 입사시켰을 때 근시야상을 나타낸 것이다. 예견된 것처럼 단파장에서는 멀티모드를 나타내었다. 그림 11은 이시편의 모드크기를 측정하기 위해서 측정된 모드의 종 및 횡 모드이다.

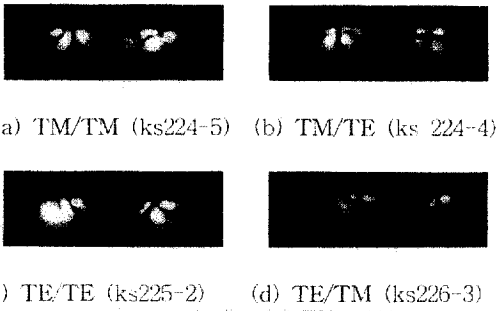


그림 10. 632.8nm HeNe laser 입사패턴 (p2)
 (a) TM/TM (b) TM/TE
 (c) TE/TE (d) TE/TM

Fig. 10. Mode patterns(P2, 0.6328 μ m)
 (a) TM/TM (b) TM/TE
 (c) TE/TE (d) TE/TM

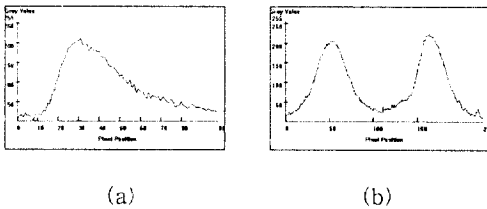


그림 11. 종 및 횡 모드(P2)
 (a) 종모드 (b) 횡모드

Fig. 11. Vertical and Horizontal mode size
 (a) vertical (b) horizontal

표 3. 모드크기 및 전파손실

Table 3. Mode size and Propagation loss

	P1	P2	P3	P4
Fiber-to-waveguide output	0.72dB/cm	0.9 dB/cm	0.68dB/cm	1.62dB/cm
Mode size (WxWy)	12.8/10.0 μ m	13.6/10.5 μ m	14.1/10.8 μ m	12.5/10.5 μ m
Propagation Loss	0.5 dB/cm	0.45dB/cm	0.4 dB/cm	0.41dB/cm

표 3에 제작한 시편의 전송손실, 모드크기 및 모드불일치를 나타내었다. 시편은 모두 굴절률매칭오일을 사용하지 않고 그 전송손실을 측정 한 것이며

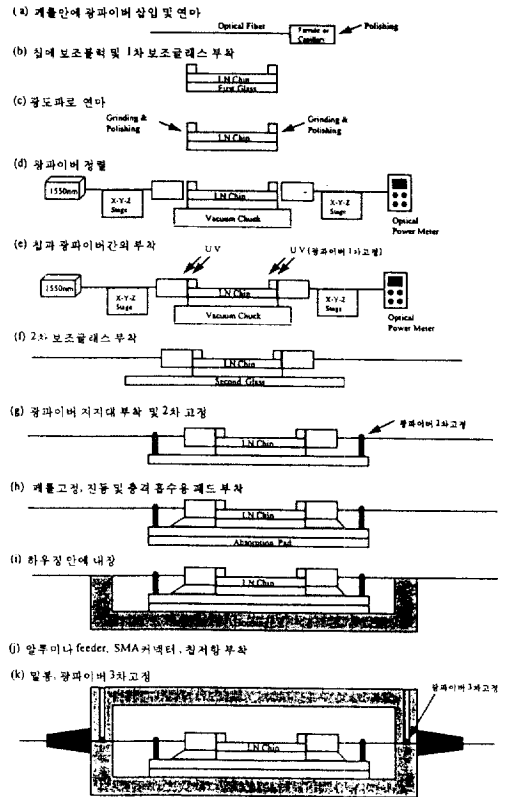


그림 12. 피그테일링 실험
 Fig. 12. Experimental diagram of Pigtailing

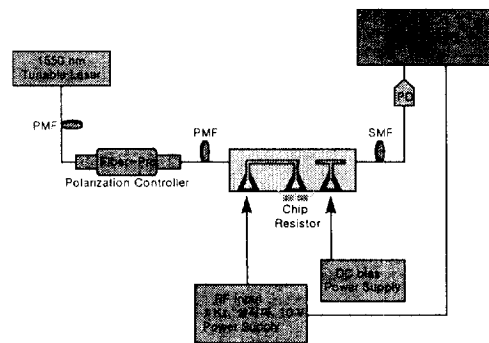


그림 13. 구동전압 측정
 Fig. 13. Diagram of driving voltage measurement

굴절률정합용 오일을 사용하는 경우 삽입손실은 20% 이상 감소한다. 시편 P1-P4 모두 1dB/cm 이하

를 나타내었고 시편 P2를 그림 12와 같이 피그테일링한 결과 fiber-to-fiber 삽입손실은 5.4dB를 나타내었고 단위길이당으로 환산하면 0.45dB/cm 였다. 이것을 굴절율정합오일로 매칭하는 경우 0.2-0.3dB/cm를 얻을 수 있었다. 그러나 정열시 부정성으로 파이버 접속손실은 크게 증가하며 P1을 fiber-to-fiber 피그테일링한 경우 10dB를 보이는 등 큰 편차를 보이기도 했다. 그림 13은 시편 P2을 패키징하여 구동전압을 측정 한 측정도이다. 입력전압은 10V, 1kHz 삼각파를 입력으로 공급하고 구동되는 광전력의 변조모양을 오실로스코우프로 관찰하면서 그 크기를 측정하였다. 측정된 구동전압은 약 6V를 나타내었다.

그림 14는 시편 P2의 확산 후 도파로 표면사진과 두께변화를 나타낸 것이다.

단일모드 제작조건을 확인하였다.

- ② Li 외부확산을 억제하고 <0.5 dB/cm 로 제작하는 광도파로 제작방법을 제시하였다.
- ③ 광도파로 입출력 단면 폴리싱방법을 제시하였다.
- ④ 설계된 광도파로를 BPM 분석하여 광도파 현상을 설명하였다.

감사의 글

본 과제는 정보통신부 국책과제사업 일환으로 수행되었습.

참고문헌

1. Osamu Mitomi, Hiroshi Miyazawa, and Kazuto Noguchi, "Waveguide-type high-speed LiNbO₃ optical switches", NTT R&D Vol.44 No.7, pp.566-570, 1995.
2. Michael R. Matthews, Braian M. Macdold and Keith R. Preston, "Optical Components The new challenge in packaging" IEEE Trans. on Components, Hybrids and Manufacturing Tech. Vol.13, No.4, pp.798-806, 1990.
3. 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.
4. 김성구, 윤형도, 윤대원 "LiNbO₃ 수동광부품기술", 월간전자부품, 1997년 5월호, pp.26-40.
5. 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.
6. J.Ctyroky and H.J.Henning, "Thin film polarizers for Ti:LiNbO₃ waveguides at $\lambda=1.3\mu\text{m}$ ", Electronics Letters, Vol.22, No.14, pp.756-757, 1988.
7. M.Fukuma, J.Noda and H.Iwasaki, "Optical properties in titanium diffused LiNbO₃ strip waveguides", J.Appl.Phys. 49(7), pp.3693-3698, 1978.
8. O.Eknoyan, D.W.Yoon and H.F.Taylor, "Low-loss optical waveguides in titanium tantalate by vapor diffusion", Appl. Phys. Lett. 51(6), pp.384-386, 1987
9. Jacques Albert and Gar Lam Yip, "Insertion loss reduction bewteen single-mode fibers and diffused channel waveguides", Appl.Optics, Vol.27, No.23, pp.4837-, 1988.

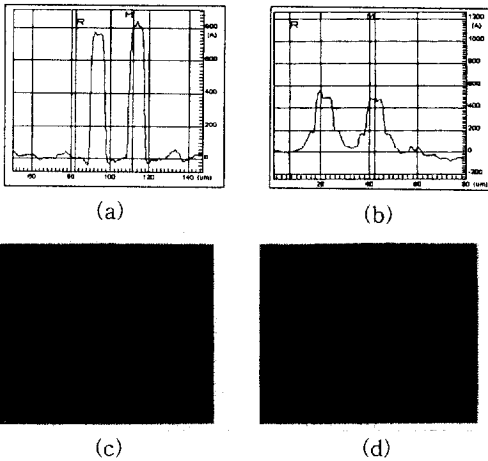


그림 14. 확산 전 후 시편사진(P2)
(a) 확산 前 두께 (b) 後 두께, (c) 확산 後 마크젠다 arm (d) Y-region

Fig. 14. Surface photogarph of diffusion, before and after (P2)
(a) before (b) after (c) Mach-Zehnder arm (d) Y-region

4. 결 론

본 연구에서는 z-cut LiNbO₃ 에 Ti을 확산하여 광도파로를 제작하고 특성을 분석하였으며, 분석 결과를 명확히하기 위해서 설계된 광도파로를 BPM 해석하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 도파로 폭 7 μm 인 단일채널 광도파로와 마크젠다 간섭기형 광도파로에 1550nm를 입사시켰을 때