

## LiNbO<sub>3</sub> 광도파로 제작에 관한 연구

김선엽\*

<sup>1</sup>남서울대학교 정보통신공학과

### A Study on the Fabrication LiNbO<sub>3</sub> Optical Waveguide

Sun-Yeob Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Information-Communication Engineering, NamSeoul University

**요약** 광통신시스템에서 효율적인 광전송을 위해서는 광섬유와 필름 도파로 사이에 효율적인 결합이 필요하다. 광섬유와 필름 도파로를 직접연결하면 광섬유와 필름 도파로간의 크기 및 모양의 차이로 인한 필드 프로파일의 불일치로 인하여 연결부 위에서 많은 광손실이 발생하기 때문에 광효율이 저하된다는 문제점이 존재한다. 이에 본 논문에서는 광섬유와 광도파로의 직접 연결 시 발생하는 효율의 저하를 막기 위해 광섬유와 광도파로를 연결하는 Y-branch를 설계하고 제작하였다. Y-branch의 해석방법으로는 많은 광도파로의 해석법 중 가장 간단하고 적용이 쉬운 섭동계환방법을 사용하였다. 해석된 결과를 이용하여 LiNbO<sub>3</sub> 에 Ti를 확산시키는 방법을 통하여 Y-branch를 제작하여 측정을 실시하였다. 측정은 1550 $\mu$ m LD레이저 광원을 이용하여 커플러를 통하여 광이 입사하도록 구성된 후 출력단에서 광신호의 near field mode를 측정하였다. 이를 통하여 Y-branch를 통해 입사하는 광의 입사조건을 변화시켜도 고차모드들은 모두 제거되고 기본 모드만 유지되고 있는 특성을 확인하였다.

**Abstract** In this paper, waveguide analysis was interpreted as an optical waveguide using the feedback perturbation method simple and easy to apply compared to the analysis method, while the other almost identical to the numerical calculation method. In addition, efficient coupling with an optical transmission line of optical fiber and the waveguide form the thin film of different functional elements is required in order to achieve the full optical communication system. However, problems arise, such as the light field (field) and the decrease of the access efficiency due to inconsistency in the distribution characteristics of the connection surface by the difference in size of the cross section thereof when connecting the optical fiber and the waveguide directly to the combination of a thin film. Therefore propose a new type of connector structure to increase the efficiency of the connection when connecting the optical fiber waveguide and the thin film was analyzed by applying a coupled mode theory, the binding efficiency of the modified contactor. And by diffusing Ti on the LiNbO<sub>3</sub> substrate and a wide range of applications in the manufacture of integrated optical material made of a current low-loss Ti: LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide and making the Y-branch waveguide, and the properties were confirmed.

**Keywords** : Waveguide, y-branch, Ti: LiNbO<sub>3</sub>, Optic, Thin-film

### 1. 서론

광전송선로인 광섬유와 필름 광도파로의 접속을 위해서는 다양한 형태의 광 결합장치가 필요하다. 이러한 광 결합장치 중 가장 간단하면서 효율이 장치에 Y-branch

있다. Y-branch는 입력된 광을 분배하거나 또는 결합하는데 이용되는 소자로서 광통신시스템에서 그 응용분야가 매우 넓은 소자이다[1,2][10-11].

Y-branch를 제작하는데 사용되는 재료로는 GaAs나 InP등의 반도체가 많이 사용되고 있는데 이는 같은 기판

본 논문은 남서울대학교 2014년도 교내 연구과제로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Sun-Yeob Kim(Namseoul University)

Tel: +82-41-580-2128 email: sykim0599@nsu.ac.kr

Received August 21, 2015

Revised September 8, 2015

Accepted September 11, 2015

Published September 30, 2015

에 광원 및 광 검출장치를 함께 구성할 수 있다는 장점이 있으나 전기광학효과가 강유전체에 비해 작다는 단점 또한 지니고 있다. 따라서 손실이 작고 전기광학 효과가 우수한 강유전체를 이용하여 Y-branch를 제작에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.[3,4]

이러한 강유전체를 이용하는 방법에는 강유전체에 금속을 확산시키는 방법이 많이 사용되는데 이는 도파로 손실이 줄어든다는 장점을 지니고 있다. [5,6]

본 논문에서는 강유전체인 LiNbO<sub>3</sub>에 Ti를 확산시키는 방법을 통해 Y-branch를 제작하였다. LiNbO<sub>3</sub>에 Ti를 확산시키는 과정에서는 LiNbO<sub>3</sub>표면에 있는 산소와 Li가 결합하여 Li<sub>2</sub>O를 발생시켜 굴절율을 증가시키기 때문에 새로운 도파모드가 형성되어 광손실이 발생한다.

이러한 확산을 방지하기 위해 Ar 기체 속에서 LiNbO<sub>3</sub> 기판과 Ti를 확산시켜 냉각시키는 방법을 이용하였다.

이러한 Ti가 확산된 LiNbO<sub>3</sub> 도파로는 확산온도 및 시간등의 제작변수에 따라 선폭과 두께가 결정되는데 이러한 값들은 제작된 도파로의 굴절율 분포를 결정하는 중요한 변수가 된다.

Ti 확산은 1000℃ ~ 1150℃의 확산온도에서 8시간 동안 Ti를 LiNbO<sub>3</sub>에 확산시키는 과정을 통해 Y-branch를 제작하였다.

## 2. 광도파로 및 Y-branch 설계

Ti:LiNbO<sub>3</sub> 단일모드 광 도파로 설계 조건은 Ti 박막의 두께, 열확산 시간, 도파로 폭과 간격, 또 입사광의 파장에 따라 달라진다. 일반적으로 Ti:LiNbO<sub>3</sub>의 굴절율 분포는 식 (1)과 같다.

$$n_{dc}(x,y) = n \left( x - \frac{(c+w)}{2}, y \right) + n \left( x + \frac{(c+w)}{2}, y \right) - n_s \quad (1)$$

$$n(x,y) = \frac{\tau}{\sqrt{\pi}D_y} \alpha \exp \left\{ - \left( \frac{y}{D_y} \right)^2 \right\} \left\{ \operatorname{erf} \left( \frac{w+2x}{2D_x} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{w-2x}{2D_x} \right) \right\} + n_s \quad (2)$$

여기서 단일 모드가 되기 위한 조건은 식 (3)과 같다.

$$14 < 2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 n_s \alpha w \tau < 38 \quad (3)$$

그러므로  $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ 에서  $w = 6\mu\text{m}$ 일 때  $n_s = 2.146$ ,  $\alpha = 0.6$  정도이므로  $\tau$ 가 350~1000Å, 확산온도는 950~1050℃ 사이이면 단일 모드 조건이 된다. 또  $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 에서  $w = 7\mu\text{m}$ 일 때 단일 모드 조건은  $\tau$ 가 700~1200Å, 확산온도는 950~1050℃ 사이 정도이다.

Fig. 1에 보인 Y-branch 구조는 집적광학에서 간섭계, 분파기, 합파기등에 사용되며 본 논문에서는 단일 모드 Y-branch에 대해서 고려하였다. 동작 형태는 정상모드(normal mode)에 의해서 설명 할 수 있다. Y-branch의 분기 각도는 정상모드의 이론이 성립하기 위해서 아주 작은 각도 2°이하로 가정한다. 분기 각도가 너무 크면 도파모드가 큰 각도에서 산란에 의하여 손실된다. 정상모드는 우수모드(even mode)와 기수모드(odd mode)가 있으며 각각의 branch가 단일모드 도파로이므로 두 개의 정상모드를 도파시킬 수 있다. 테이퍼 영역에서 도파로이 폭이 진행방향으로 나아감에 따라서 변한다. 이 영역의 시작에서 두 개의 도파모드인 기본모드와 고차모드가 진행하지만 끝점에서는 단일모드 도파로가 연결되므로 단지 기본모드만 도파되고 고차모드는 방사모드가 되어 기판쪽으로 방사된다. branching 영역의 우수모드는 테이퍼 영역과 straight guide 영역에서 기본모드로 진행하지만 기수모드는 테이퍼 영역에서 고차모드를 형성하고 진행하여 가다가 방사되어 진다[7,8]

Y-branch는 단일 광 도파로에 대해 암(arm)과 암 사이의 간격 s와 Y-branch 각도  $\theta$ 는 중요한 설계변수로서 향후 이를 이용한 광 변조기 등의 성능에 큰 영향을 미친다. Y-branch 각도  $\theta$ 는 산란손실과 변조기 전체 길이에 영향을 미칠 수 있는 중요한 설계변수이다. 즉 분리각이 작으면 도파로에서 산란손실은 감소하지만 이 부분의 도파로 길이가 길어짐으로 전파손실 증가를 초래하며, 이와 반대로 분리각이 클 경우 반대되는 현상이 야기된다. 이와 같은 Y-branch에서 산란손실은 Marcuse step 근사 방법을 바탕으로 Burns와 Milton에 의하여 이론적으로 계산된 바가 있으며 실험적인 값으로는 분리각이 0.57°일 때 약 1dB의 손실, 1.9°일 때 약 2dB, 그리고 2.3°일 때 손실은 2.6dB 정도로 알려져 있다.[9]

Fig. 1에 보인 대칭적인 Y-branch에서 전계 사이의 관계는 다음과 같다. TE 모드에 대해 전력은 전계의 자승에 비례하며 TM 모드도 같다. 따라서 입력 암에 들어오는 전력과 출력 암으로 나가는 전력 사이에는  $P_o = P_1 + P_2$ 의 관계가 성립되고 식 (4), 식 (5)와 같다[5,6].

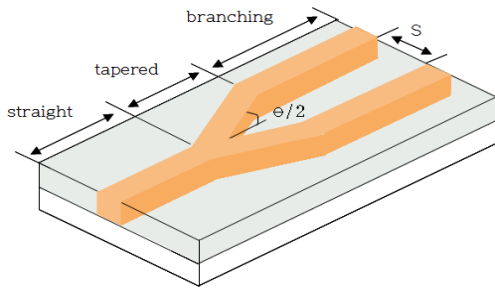


Fig. 1. Single mode Y-branch.

$$E_o = \left( \frac{E_1}{\sqrt{2}} + \frac{E_2}{\sqrt{2}} \right) \sqrt{(1-\gamma)} \quad (4)$$

$$E_1 = E_2 = \frac{E_o}{\sqrt{2}} \sqrt{(1-\gamma)} \quad (5)$$

Fig. 2에 제작을 위한 채널형 광 도파로와 Y-branch의 설계도를 나타내었다.

채널형 광 도파로의 폭은 7 $\mu\text{m}$ 이고, 전체 길이는 66,000 $\mu\text{m}$ 이며 Y-branch에 대해서도 측정에 사용될 광파의 파장이 1.55 $\mu\text{m}$ 이기 때문에 이 파장에서 단일모드 광 도파로를 제작하기 위해서 도파로폭을 7 $\mu\text{m}$ , 전체길어도 광 도파로와 마찬가지로 66,000 $\mu\text{m}$ , 전체 평행 암 길이는 56,910 $\mu\text{m}$ , Y-branch의 길이는 9,090 $\mu\text{m}$ 로 설계하였다.

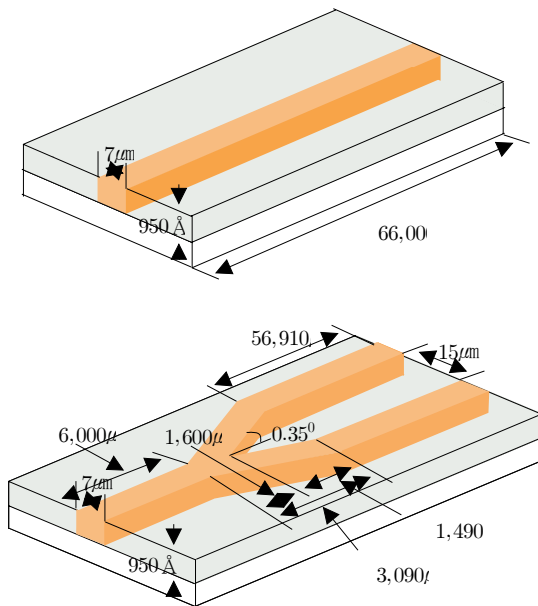


Fig. 2. The structure and dimension of optical waveguide and Y-branch.

그리고 암과 암 사이의 거리는 두 암 사이의 모드결합을 방지하기 위하여 15 $\mu\text{m}$ 로 설정하였다. 또한 Y-branch의 분리각은 산란손실을 최소화하는데 비중을 두어 작게 할수록 좋으나 이 또한 마스크 제작상 관계가 있기 때문에 위에서 언급한 바와 같이 여러 문헌에서 발표된 내용을 검토하여 분리각을 0.35°로 결정하였다. 본 논문에서 기존 문헌들을 참고하여 제작한 1.55 $\mu\text{m}$  대역 단일모드 광도파로 제작조건으로 Ti 박막증착 두께는 950 $\text{\AA}$ , Ti 선폭은 7 $\mu\text{m}$ , 확산온도는 1030 $^{\circ}\text{C}$ , 확산시간을 8시간으로 하여 식(2)를 이용하여 굴절률 분포를 측정한 결과가 Fig. 3에 보인다.

### 3. 광 도파로 제작

Ti 내부확산은 LiNbO<sub>3</sub> 기판위에 놓여 있는 Ti strip을 900 ~ 1050 $^{\circ}\text{C}$ 의 고온으로 열에 의해서 내부로 확산시키는 방법으로 실제 확산에 사용한다. 이때 버블러 내부의 온도는 95 $^{\circ}\text{C}$ 를 유지하게 하고 유입되는 건조한 O<sub>2</sub>는 1 ~ 2 bubbler/sec의 일정량을 흐르게 한다. 확산온도 세팅(setting)은 3단계로 주어 처음 1030 $^{\circ}\text{C}$ 까지는 2시간, 확산시간은 8시간으로 고정하고 마지막으로 확산시간이 종료된 후에는 자연냉각을 시켰다. 실제 확산실험을 한 확산시간에 따른 확산온도를 변화시켰다.

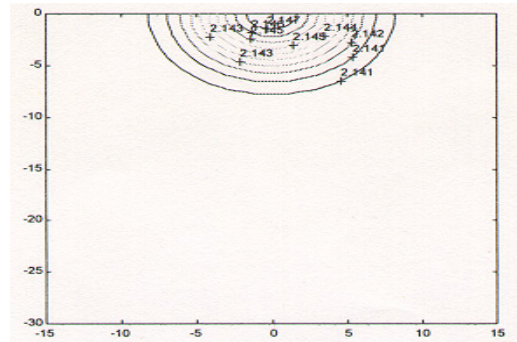


Fig. 3. Refractive index profile.

젓은 O<sub>2</sub>의 확산 분위기로 인하여 Li<sub>2</sub>O의 외부확산을 억제하는 방법과 더불어 계속되는 확산으로 인하여 알루미늄 지지대의 내부벽이 Li<sub>2</sub>O로 둘러 쌓이게 되어 이중의 효과를 얻을 수 있다. 알루미늄 지지대의 내부벽에 둘러 쌓인 Li<sub>2</sub>O는 Ti가 내부확산될 때 발생하는 Li<sub>2</sub>O 외부확산의 양을 억제시키는 역할을 하는 것으로 추정된다.

광 도파로 제작공정 조건을 적절히 잘 맞춘다면 흠집이나 끊김이 없는 Ti 스트립 패턴(strip pattern)의 수율을 높일 수 있는데 Fig. 4는 제작된 Ti 스트립의 두께를  $\alpha$  스텝퍼( $\alpha$ -stepper)를 사용하여 측정된 결과이다. Ti 스트립의 폭  $w=7\mu\text{m}$ , Ti 스트립의 두께  $t=950\text{\AA}$  임을 알 수 있다.

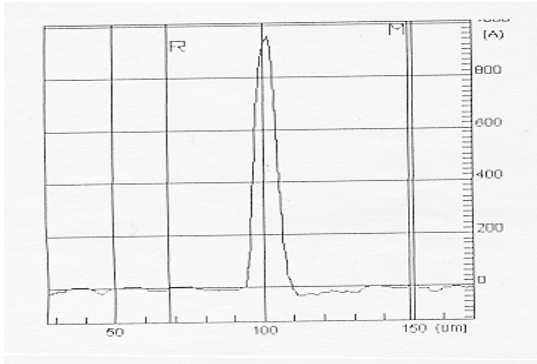


Fig. 4. Ti thickness and width prior to diffusion.

Fig. 5는 확산전후의 광 도파로와 Y-branch를 광학 현미경을 통하여 광 도파로의 표면을 촬영한 사진이다.

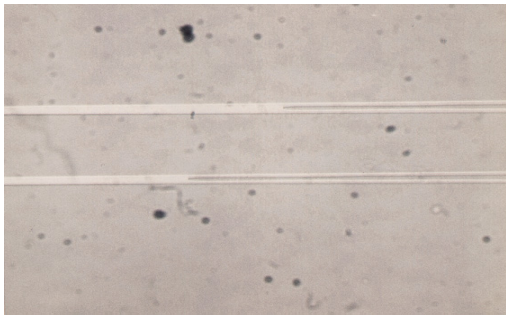


Fig. 5. Photography of Y-branch prior to diffusion.

확산전 도파로는 뚜렷한 경계가 있으나 확산후의 모양은 많은 변화를 하게 되는데 확산 표면은 매끄럽고 삼각형 모양의 기복이 발생하지 않는 것이 광 도파 손실을 더욱 줄일 수 있어 조건분석이 필요하다.

절단은 광 도파로가 생성된 후 광 도파실험을 하거나 광 도파로 위에 전극을 형성하여 전극특성 측정이나 피그테일링(pigtailing)을 할 경우에 이루어지는 것으로 절삭기를 사용하여 원하는 크기로 절단하게 된다. 절단이 끝나는 후에는 연마를 한다. 연마작업은 사포에 의한 그라인딩(grinding)과 다이아몬드에 의한 연마로 나눌 수

있다. 그리고 연마를 하기 전에 연마로 인하여 도파로 종단면이 굴곡이 생길 우려를 방지하기 위하여 도파로 끝부분에 더미 블럭(dummy block)을 유리를 이용하여 에폭시(epoxy)로 부착한다. 유리를 이용하는 특별한 이유는 굴절을 매칭 때문이다.

#### 4. 광 도파 특성 측정

Ti 확산공정을 통해서 제작된 광 도파로의 도파특성을 Fig. 6과 같은 광 도파 실험장치를 이용하여  $1.55\mu\text{m}$ 의 입력광에 대하여 광 도파로의 단일모드 도파특성을 확인하기 위해 출력광의 전력 및 그거리 모드를 관찰하였다.

광원인  $1.55\mu\text{m}$  가변 레이저와 He-Ne 레이저가  $2\times 1$  커플러를 통하여 광 도파로에 동시에 입사할 수 있게 구성하였고 출력단에는 출사되는 광원을 40배 렌즈로 확대한 다음 global image program을 내장하고 CCD 카메라 부착한 컴퓨터로 근거리 모드 및 모드형상을 측정하였다. 또한 TE 및 TM모드의 광의 도파특성을 확인하기 위해서 입력단에서는 광섬유형 편광기를  $1.55\mu\text{m}$  광원과 연결하여 임의로 편광되어 있는 광을 정확하게 TE 또는 TM 모드로 편광시키기 위함이다. 출력단에서도 편광 유지광섬유와 광 도파로간의 축방향 부정합으로 인한 원치않는 상이한 편광모드를 제거하기 위해서 CCD 카메라 바로 앞에 Glan-Thomson형 편광기를 설치하였으며 도파로 입력단의 축과 정확히 맞추기 위하여 X-Y-Z stage를 사용하였다.

Fig. 7은 제작조건이 광 도파로의 경우에는  $w=7\mu\text{m}$ ,  $t=950\text{\AA}$ ,  $T=1030^\circ\text{C}$ ,  $t=8$ 시간이고 Y-branch의 경우에는  $w=7\mu\text{m}$ ,  $t=950\text{\AA}$ ,  $T=1030^\circ\text{C}$ ,  $t=8$ 시간,  $S=15\mu\text{m}$ ,  $\theta=0.35^\circ$  일 때 광 도파로와 Y-branch에 Fig. 6과 같이 광 도파 실험장치를 구성하여  $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 의 광을 입사시켜 측정된 근거리 모드와 모드형상이다.

광도파 측정 실험시 입사파의 조준 위치를 상하좌우로 변화시킬 때 출사빔 패턴은 그대로 인체 크기만 변화하면 단일모드 도파로이고 출사빔 패턴이 이리저리 변화하면 다모드 도파로라 단정지를 수 있는데 실험에서는 입사조건을 어떻게 변화시켜도 기본모드만이 유지됨을 확인 할 수 있었다.

또한 횡모드 종모드 형상에서도 횡모드는 가우시안 분포를 갖고 종모드는 헬릿 가우시안 분포로 그 형태도 양호하였다.

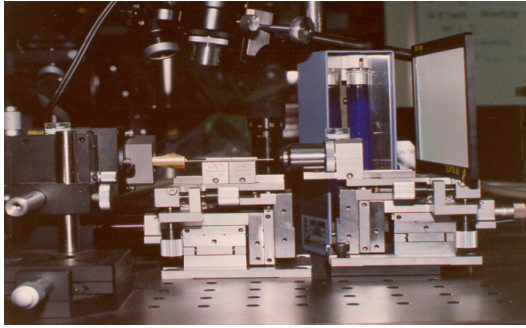
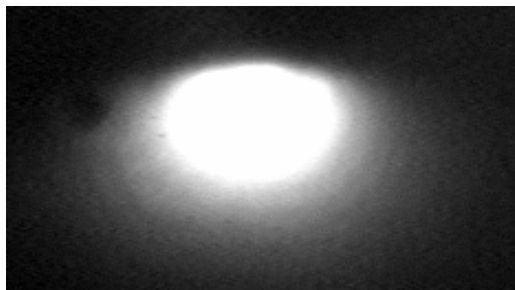
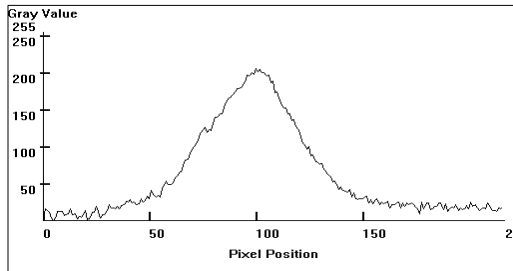


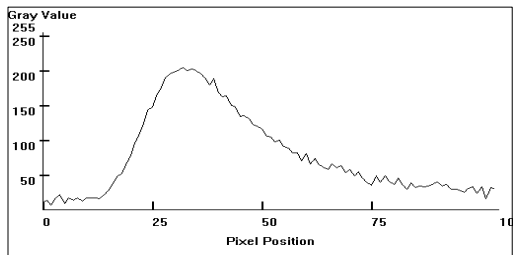
Fig. 6. Optical setup for guiding the optical waveguide.



(a) Near field mode



(b) transverse mode



(c) longitudinal mode

Fig. 7. Near-field pattern and mode profiles of an optical waveguide.

## 5. 결론

Ti 내부 확산공정을 통해서 LiNbO<sub>3</sub>에 단일모드 광도파로 및 Y-branch를 제작하였다. Z-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판에 950Å의 Ti를 증착시킨 후 1030°C에서 8시간 동안 Ti를 확산시켜 단일모드 광도파로 및 Y-branch를 형성시켰다. 확산은 전기로에서 수행하였으며 1000°C 이상의 확산 온도에서 Ti 확산과 동시에 기판으로부터의 Li의 외부 확산으로 인해 형성되는 일종의 기생 도파로의 형성을 억제하기 위해서 젖은 O<sub>2</sub>분위기 속에서 Ti를 확산시켰다.

또한 확산조건이 도파로 표면 형상에 미치는 영향을 알아보기 위해 확산전, 후의 표면 형상을 관찰하였는데 확산전에는 도파로 패턴에 뚜렷한 경계가 있었으나 확산 후 모양은 많은 변화를 하게된다. 확산 과정에서 Ti는 깊이 및 측면으로 확산하게 되는데 확산 표면은 매끄럽고 삼각형 모양의 기복이 발생하지 않는 것이 광도파 손실을 더욱 줄일 수 있어 조건 분석이 필요하다. 그리고 제작된 광도파로와 Y-branch에 대해 단일모드 특성을 확인하기 위해 도파로가 제작된 기판을 잘라서 입, 출력단을 폴리싱한 뒤 입력단에 광섬유를 end-fire 결합시킨후 Fig. 6과 같은 광도파 실험장치를 이용하여 근거리 모드를 관찰하였다. 도파 실험장치의 구성은 1.550μm LD 레이저 광원과 633nm He-Ne 레이저 광원이 2×1 커플러를 통하여 광도파로에 동시에 입사할 수 있도록 구성하여 출력단에는 40배 렌즈와 CCD 카메라를 통하여 출력 광파의 근거리 모드 및 모드 형상을 관찰하였는데 도파광의 입사 조건을 어떻게 변화시켜도 기본모드만이 유지되며 그 형태도 매우 양호함을 확인할 수 있었다.

## References

- [1] I. P. Kaminow and J. R. Carruthers, "Optical waveguiding layers in LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub>", Appl. Phys. Lett., Vol.22, No.7, pp.326-328, 1973
- [2] Manhar L. Shah, "Optical waveguides in LiNbO<sub>3</sub> by ion exchange technique", Appl. Phys. Lett., Vol.26, No.11, pp.652-653, 1975
- [3] J. M. Hammer and W. Phillips, "Low-loss single-mode optical waveguides and efficient high-speed modulator of LiNb<sub>x</sub>Ta<sub>1-x</sub>O<sub>3</sub> on LiTaO<sub>3</sub>", Appl. Opt. Lett., Vol.24, No.11, pp.545-547, 1974

- [4] R. V. Schmidt and Kaminow, "Metal-diffused optical waveguides in LiNbO<sub>3</sub>", Appl. Phys. Lett., Vol.25, No.8, pp.458-460, 1974
- [5] J. K. Jackel, C. E. Rice and J. J. Veselka, "Proton exchange for high-index waveguides in LiNbO<sub>3</sub>", Appl. Phys. Lett., Vol.41, No.7, pp.607-608, 1982
- [6] M. D. Micheli, D. B. Ostrowsky, J. P. Bareky, C. Canali, "Crystalline and optical quality of proton exchanged waveguides", IEEE J. Lightwave Tech., Vol.4, No.7, pp.743-745, 1986
- [7] M. Fukuma, "Optical properties in titanium-diffused LiNbO<sub>3</sub> strip waveguide", J.Appl. Phys., Vol.49, pp.3693-3698, 1978
- [8] R. C. Alferness, "Characteristics of Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> optical directional couplers", Appl. Opt., Vol.18, pp.4012-4018, 1979
- [9] J. L. Jackel, "Suppression of outdiffusion in titanium diffused LiNbO<sub>3</sub> : a review", J.Opt. Comm., Vol.3, No.3, pp.82-85, 1982
- [10] B.-J. Lee, Y.-W. Kim, K.-S. Kim, "Received Power Optimization applying Adaptive Genetic Algorithm in Visible light communication," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, VOL. 13, No. 6, pp. 147-154, Dec. 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2013.13.6.147>
- [11] M. S. Rahman, B.-Y. Kim, M.-S. Bang, Y.G. Park, K.-D. Kim, "Color Space Mapping and Medium Access Control Techniques in Visible Light Communication," *The Journal of The Institute of Webcasting, Internet Television and Telecommunication*, Vol. 9, No. 4, pp. 100-107, 2009.

---

김 선 엽(Sun-Yeob Kim)

[정회원]



- 1993년 2월 : 원광대학교 전자공학과(공학사)
- 1995년 2월 : 원광대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 2001년 2월 : 원광대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 남서울대학교 정보통신학과 조교수

<관심분야>  
광시스템, 광통신응용