

## Ti:LiNbO<sub>3</sub>를 이용한 초고속 광 매트릭스 스위치 제조

양우석<sup>†</sup> · 광용석\* · 김제민 · 윤형도 · 이한영 · 윤대호\*\*

전자부품연구원 광부품연구 센터  
(주) 커미넷  
성균관 대학교 신소재 공학과

### Fabrication of High Speed Optical Matrix Wwitch by Ti:LiNbO<sub>3</sub>

W. S. Yang<sup>†</sup>, Y. S. Kwak\*, J. S. Park\*, J. M. Kim, H. D. Yoon, H. Y. Lee and D. H. Yoon\*\*

Electronics Technology Institute, Optical Telecommunication Components Lab. Pyungtaek 451-865

\*Cominet Corporation, Bundang 463-070, Techno-Park 151

\*\*Department of Advanced Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746

(2001년 12월 27일 받음, 2002년 3월 27일 최종수정본 받음)

**Abstract** To realize channel cross-connecting in optical communications systems, a high speed optical matrix switch was fabricated using z-cut LiNbO<sub>3</sub>. For switch fabrication was design bending structure and coupling length and four 2×2 directional couplers were integrated on one substrate for construction of a 4×4 switch. Single-mode optical waveguides were formed by Ti-diffusion at a wet O<sub>2</sub> atmosphere. Ti-diffusion profile, refractive index variation and waveguide morphology were analyzed by Prism coupler and optical microscopy, respectively.

**Key words**: Lithium niobate, electro-optic effect, optical switch, optical waveguide, Ti-indiffusion, directional coupler, bending loss, normal mode theory, beam propagation method

## 1. 서 론

광스위치는 WDM (wavelength division multiplexing), OXC (optical cross connect) 및 광패킷 스위치를 위한 핵심 소자이다. 최근, 다양한 종류의 광스위치 발전이 있었으며 스위치구현 방식에 따라 3가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 광학거울을 이용한 기계식 스위치의 경우 광의 진행 경로를 거울로 변화시키는 방법으로써 입력/출력 단의 확장성이 좋은 반면에 손실이 크다.<sup>1)</sup> 둘째, 탄성파에 의한 광파의 굴절을 이용하는 공간스위치가 있으며 광의 경로는 굴절변화로 조절할 수 있다.<sup>2)</sup> 셋째, 물질의 광전 효과를 이용한 도파로형 스위치가 있으며 수십 nano-second의 스위치 속도를 보이는데, 이중 광전 효과에 의한 도파로형 스위치가 응답속도가 매우 빨라 광 인터넷 구현을 위해 장차 유망해 질것으로 기대한다.

도파로형 스위치의 일반적인 구조는 두 도파로의 결합 길이를 이용한 방향성 결합기이다. 이러한, 방향성 결합기(DC : directional coupler)는 다양한 도파로 소자의 기본으로써 주로 광스위칭 네트워크에서 사용되고 있으며, DC를 이용하는 소자로는 균일 전극을 이용한 switched DC, reversed-DC 스위치, DC 변조기 등이 있다.

LiNbO<sub>3</sub>는 높은 전기광학계수를 가지고 통신용 파장대역

에서 투과도가 높고, 상변위 온도가 높아 상온에서 안정한 물성을 갖는 재료로써 전기광학효과를 이용한 도파로 소자로 사용된다. 상업적으로 LiNbO<sub>3</sub> 기판은 조화용융조성(the typical mole ratio of Li : Nb=48.6 : 51.4)을 주로 이용한다.

본 연구에서는 조화용융조성의 z-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판에 Ti strip을 확산시킨 채널형 광도파로를 제작하였다. 대칭의 두개의 도파로로 구성된 방향성 결합기의 결합길이를 구하기 위하여 정상모드 이론(normal mode theory)과 준벡터 유한차분법(semivectorial finite difference method)을 이용하였다. 확산 전 Ti strip의 폭과 간격을 변화 시키면서 결합길이를 계산하였고 소자가 5V 이하의 저 전압에서 동작할 수 있도록 설계치를 찾았다.

방향성 결합기의 입출력 부분의 bends는 소자의 성능을 좌우할 만큼 중요하며, bends의 모양 및 길이에 따라서 bending loss는 큰 차이를 보인다. 따라서 bends의 모양을 linear, sine, cosine, double arc 형태로 변화시키고, 각각의 경우에 대하여 입출력 영역의 길이를 변화시키면서 bending loss를 계산하였다. 계산된 수치해석 방법으로는 직각좌표계를 이용한 준 벡터 유한차분 법 전송법(semivectorial finite difference-beam propagation method)을 사용하였다.

<sup>†</sup> E-mail: wsyang@keti.re.kr

## 2. 실험 방법

### 2.1. 단일모드 도파로 제작

Fig. 1은 Ti 확산 광도파로 제조 공정도이다. Ti 층은 E-beam 장치를 이용하여 z-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판 위에 증착하였으며 UV-lithography와 식각 후에 wet O<sub>2</sub> 분위기에서 확산온도 1050°C에서 확산하였다.

### 2.2 도파로형 광매트릭스 스위치 설계

Fig. 2는 두개의 도파로 방향성 결합기의 모식도이다. 두개 도파로 방향성 결합기는 입력/출력 단자로 구성되어 있으며(Fig. 2(a)) S-bend구조를 갖는다. 상호작용영역(interaction region)은 각각의 두 도파로의 l<sub>c</sub> 영역을 따라 빛이 진행하며 금속전극으로 인한 TM모드의 propagation loss와 구동전압을 감소시키기 위해서 SiO<sub>2</sub> 버퍼층을 도파로와 전극사이에 증착시켰다(Fig. 2(b)). 커플링 길이(l<sub>c</sub>)는 정상모드이론으로 구하였다.

### 2.3 정상모드이론

정상모드이론은 두 개의 도파로를 한 개의 도파구조로 취급하며, 단일모드 도파로의 경우, 입사파장에 대하여 항상 두개의 고유치 β<sub>e</sub>(even), β<sub>o</sub>(odd)가 얻어진다. 이 고유치는 두개의 모드 ψ<sub>e</sub>(symmetric), ψ<sub>o</sub>(anti-symmetric)에 각각 대응된다. 대칭 도파로 방향성 결합기에서 도파광이 l<sub>c</sub> 만큼 진행했을 때 even모드와 odd모드의 위상차가 π만큼 차

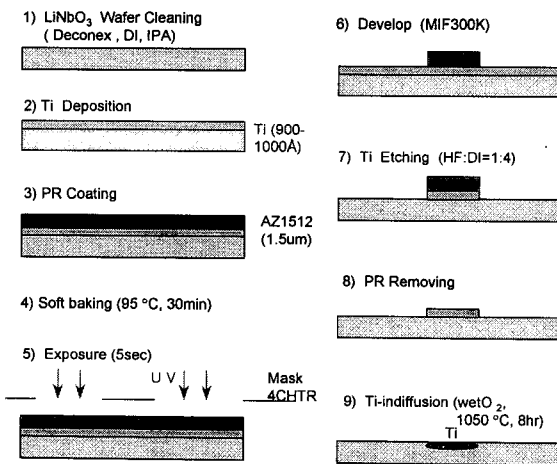


Fig. 1. Ti-indiffused waveguide fabrication procedure.

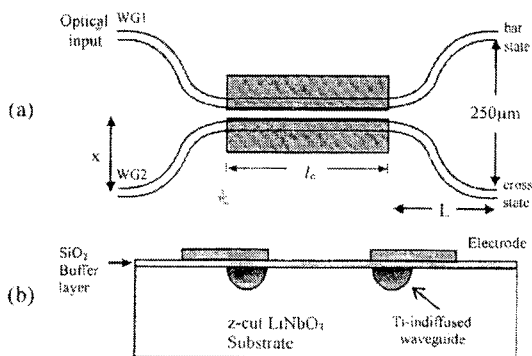


Fig. 2. Schematics of (a) a directional coupler switch unit and (b) cross-section of a directional coupler.

이가 나면 입력된 광이 인접 도파로에 완전히 결합된다. 이러한 조건을 이용하여 방향성 결합기의 완전 결합길이를 다음과 같은 관계를 이용하여 계산할 수 있다.

$$l_c = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o} \quad (1)$$

여기서, β<sub>e</sub>와 β<sub>o</sub>는 준벡터 유한차분법 또는 준벡터 유한요소방법으로 구할 수 있다.

### 2.4 구동전압

전극에 가해진 외부전계에 의해 각 도파로에서의 전파상수의 변화가 생기며, 양도파로 간의 전파상수 차 Δβ는 인가된 스위칭 전압 V<sub>sw</sub>로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\beta &= k_o | \Delta n_1 + \Delta n_2 | \\ &= \frac{2\pi}{\gamma} \left[ \frac{1}{2} n_e^3 r^{33} (\Gamma_1 + \Gamma_2) \frac{V_{sw}}{S} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$$\Gamma \cong \frac{S}{V_{sw}} \frac{\iint E_{op}^2 \cdot E_{ol} \, exdy}{\iint E_{op}^2 \, dxdy} \quad (3)$$

S는 두 전극 간의 간격, Γ<sub>1,2</sub>는 각 도파로에서의 인가전계와의 중첩인자이며 n<sub>e</sub><sup>3r33</sup>=3.0610<sup>-4</sup>µm/V이다.

균일 방향성 결합기에서 광 스위칭이 일어나기 위한 조건은

$$\text{bar state : } \Delta\beta/\pi = | \Delta\beta_1 + \Delta\beta_2 | L/\pi = \sqrt{3} \quad (4a)$$

$$\text{cross state : } \Delta\beta = 0, L = l_c \quad (4b)$$

따라서, 광스위칭 전압 (V<sub>sw</sub>)은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{sw} = \sqrt{3} \cdot \frac{\gamma \cdot S}{n_e^3 r^{33} (\Gamma + \Gamma) l_c} \quad (5)$$

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 3에 wet O<sub>2</sub>유량에 따라 제작된 도파로의 표면 형상을 나타내었다. Wet O<sub>2</sub>는 LiNbO<sub>3</sub>에 Ti가 확산되어 질 때 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 결정질의 분해를 막아준다. 따라서, wet O<sub>2</sub>의 유량은 기판에 확산후 표면 형상에 영향을 미친다. 미량 및 과도한 wet O<sub>2</sub>의 유량은 표면을 거칠게 만들며 적절한 양의 wet O<sub>2</sub>를 흘려주었을 때 좋은 도파로 표면을 기대할 수 있다. 약 700°C 이상의 온도에서 Ti를 확산시킨 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 도파로는 확산 층에 (Ti<sub>0.65</sub>Nb<sub>0.35</sub>)O<sub>2</sub>를 형성하게 되며, 확산 전의 LiNbO<sub>3</sub>보다 굴절률이 높아진다.<sup>3)</sup> 이상(phase)은 z-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판위로 에피 성장하며 확산이 진행되는 동안 기판안쪽으로 Ti가 확산되는데 wet O<sub>2</sub>는 도파로의 깊이 방향이 아닌 수평방향의 확산에 영향을 준다.<sup>4,5)</sup> Ti가 확산된 도파로의 깊이 방향에 따른 굴절률 이득은 fiber core와 surface scatter 사이의 모드 매칭의 결정을 위해 중요하다.

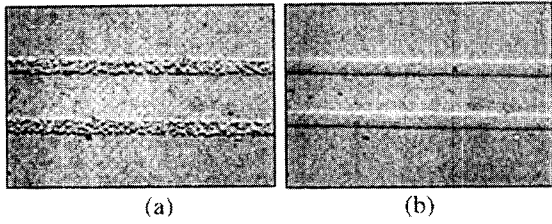


Fig. 3. Surface photographs (1,000) of waveguides Ti-indiffused at atmosphere of (a) excess O<sub>2</sub> and (b) 2 bubbles of O<sub>2</sub>/sec.

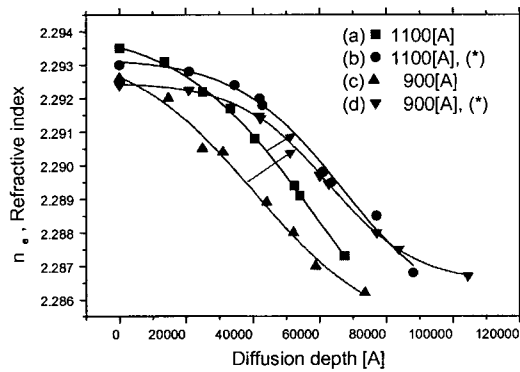


Fig. 4. The refractive index profiles, in a depth direction, of a z-cut Ti:LiNbO<sub>3</sub> after diffusion. Ti strip thickness was 1100Å for (a) and (b), and 900Å for (c) and (d), respectively. The curves (a) and (c) depict the index profiles when diffusion was conducted at only wet O<sub>2</sub> atmosphere, and (b) and (d) depict the profiles when a wafer foldering method was also accompanied.

Fig. 4에 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 도파로의 깊이방향에 따른 굴절률 이득을 나타내었으며, Ti 두께 및 확산조건변화에 따른 결과를 표 1에 나타내었다. 굴절률은 프리즘 커플러로 측정되었으며 45° rutile prism과 0.6328μm He/Ne laser을 이용하였다.

Ti 두께의 증가에 따라 굴절률은 증가하였으나 Fig. 4에서와 같이 확산 중 기관 위에 LiNbO<sub>3</sub> 기관은 덮을 경우 기존방법에 비해 표면에서의 굴절률이 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 이러한 굴절률의 감소는 확산 기관위에 LiNbO<sub>3</sub> 기관을 덮어 줌으로써 확산 중 기관에서 빠져나오는 Li 이온을 막아주기 때문이라고 추측되어진다. 이러한 굴절률의 감소는 Li 결핍을 가지고 있는 LiNbO<sub>3</sub>보다 Li 양이 많은 화학양론조성의 LiNbO<sub>3</sub>에서도 나타난다.

준 벡터 유한차분법을 이용하여 대칭인 두도파로의 β<sub>o</sub>,

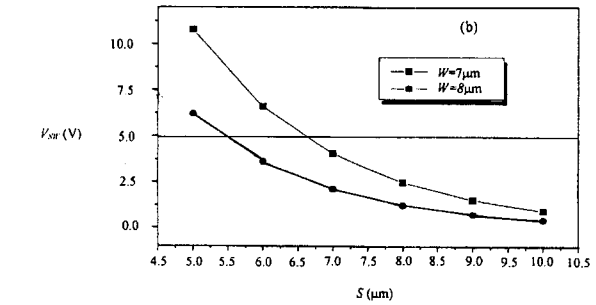
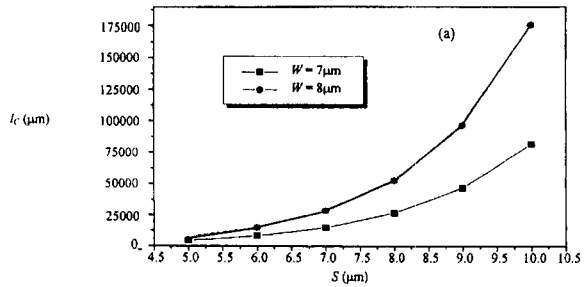


Fig. 5. (a) Coupling length,  $l_c$ , and (b) driving voltage,  $V_{sw}$ (V) according to the separation and width of waveguides.

β<sub>o</sub>를 각각 구하였으며, 정상모드 이론에서 도출된 식 (1)을 적용하여 방향성 결합기의 완전결합 길이를 계산하였다. 단, 정상모드를 이용하여 결합길이를 계산하는 것은 방향성 결합기의 입력력 영역이 결합길이에 영향을 주지 않을 때에는 정확한 값을 보이지만 실제로는 입력력 영역의 도파로가 S-bends 모양으로 점차 접근하기 때문에 기생결합이 발생하게 되어 결합길이에 영향을 주게 된다. 또한, 결합모드를 이용하여 결합영역을 해석하는 것도 같은 종류의 오차를 수반하기 때문에 진행방향으로 도파로의 모양이 변하는 것을 효과적으로 해석할 수 있는 빔 전송법을 이용하여 방향성 결합기를 전체적으로 분석하여 오차를 줄여야 할 것으로 사료된다.

준 벡터 유한 차분법을 이용하여 방향성 결합기의 β<sub>o</sub>, β<sub>c</sub>를 계산하기 위한 해석조건은 표 2와 같다. 해석평면의 그리드 간격을 각각 dx=0.3μm, dy=0.3μm로 하였으며 메모리 및 계산의 효율성을 이용하여 비균일 메쉬를 적용하였다.

Fig. 5는 표 2의 공정조건에서 확산 전 Ti 스트립 폭 (W) 과 간격(S) 를 변화시키면서 결합길이 l<sub>c</sub>와 SiO<sub>2</sub> 막의 두께(tb)가 0.2μm인 경우 구동전압을 계산한 것이다. 스위치와 광섬유를 pig-tailing 할 때 결합손실을 고려하여 Ti

Table 1. Description of samples.

| sample | Ti thickness | Diffusion method | Diffusion condition  |
|--------|--------------|------------------|--|
| A      | 1100 Å       | Conventional     | Temperature : 1050°C<br>Ramp time : 2hrs<br>Diffusion : 8hrs, 95°C<br>wet O <sub>2</sub> bubbling<br>natural cooling |
| B      | 110 Å        | Wafer foldering  |  |
| C      | 900 Å        | Conventional     |  |
| D      | 900 Å        | Wafer foldering  |  |

Table 2. Analysis conditions to calculate coupling length.

| Polarization | Wave-Length  | Diffusion Temp    | diffusing Time | Ti Strip Thickness | dn/dc |
|--------------|--------------|-------------------|----------------|--------------------|-------|
| TE mode      | 1.55 $\mu$ m | 1050 $^{\circ}$ C | 6hrs           | 9.50 $\text{\AA}$  | 0.625 |

Table 3. Bending losses in various bending structures. ( $W=7\mu\text{m}$ ,  $S=7\mu\text{m}$ ,  $x=125-(W+S)/2$ ,  $L=4000\mu\text{m}$ )

| bend     | linear | Sine   | double arc | cosine |
|----------|--------|--------|------------|--------|
| Loss(dB) | 3.8823 | 0.1867 | 0.12       | 0.0367 |

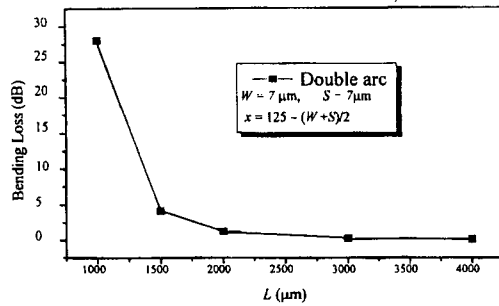


Fig. 6. Bending loss versus L in a double arc structure.

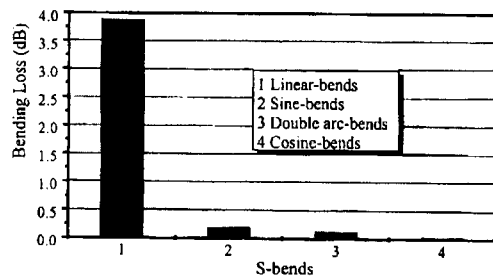


Fig. 7. Bending loss vs bending structure in input/output regions.

스트립 폭  $W$ 를 7~8 $\mu\text{m}$  수준에서 모의전산을 수행하였다. Fig. 5의 결과로부터 확산된 Ti 스트립 폭과 간격이 증가할수록 결합길이  $L$ 가 증가하고 구동전압은 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 계산결과, 결합길이를 줄일수 있는 Ti 스트립폭  $W$ 를 7 $\mu\text{m}$ , 구동전압을 5 V 이하로 유지하면서 결합길이를 최소화 할 수 있는 Ti 스트립 간격  $S$ 를 7 $\mu\text{m}$ 로 채택하였다.  $W=7\mu\text{m}$ ,  $S=7\mu\text{m}$ 일 때 결합길이  $L_c \sim 14750\mu\text{m}$ , 구동전압  $V_{sw} \sim 4V$ 로 계산 되었다.

방향성 결합기의 입출력 부분의 S-bends는 소자의 성능을 좌우할 만큼 매우 중요하며, bend의 모양 및 길이에 따라서 bending loss는 큰 차이를 보인다. 따라서, bends의 모양을 linear, sine, cosine, double arc 형태로 변화시키고, 각각의 경우에 대하여 입출력 영역의 길이  $L$ 을 변화시키면서 bending loss를 계산하였다. 이러한 결과로부터 손실을 최소화할 수 있는 bends 구조를 채택하였다. 계산된 수치해석 방법으로는 직각 좌표계를 이용한 준 벡터 유한차분 빔전송법을, 경계조건으로는 TBC (transparent boundary condition)를 이용하였다.

입출력 영역의 도파로 사이간격(중심과 중심사이)은 광섬유와 도파로와의 V-groove 결합을 위하여 250 $\mu\text{m}$ 로 고

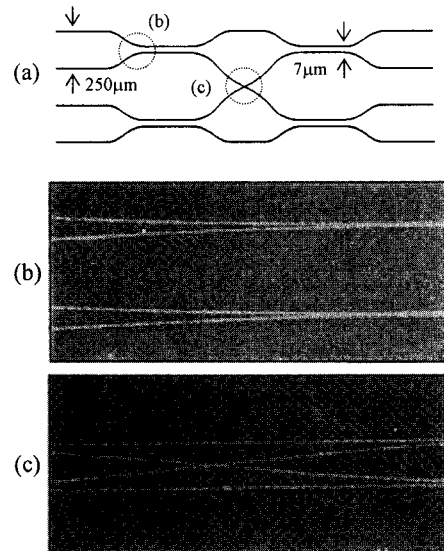


Fig. 8. A schematic diagram (a) of Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguides of an optical matrix switch and microscope-photographs of bending structures of (b) a directional coupler and (c) the crossing point of four directional couplers. The regions of (b) and (c) are indicated in (a).

정을 하였고, 결합길이, 소자의 크기와 구동전압을 고려하여 도파로의 폭과 간격을 각각 7 $\mu\text{m}$ 로 하였다.

Fig. 6은 도파로의 폭과 간격을 각각 7 $\mu\text{m}$ , 입출력 영역의 두 도파로 사이의 간격을 250 $\mu\text{m}$ 로 고정한 상태에서 double arc S-bends의 입출력 영역의 길이  $L$ 을 변화시켜가면서 bending loss를 계산한 것이다.  $L$ 이 1000~2000 $\mu\text{m}$  부분에서는 bending loss의 변화가 급격하게 변화였고 ~4000 $\mu\text{m}$ 에서 점차 수렴하고 있음을 알 수 있다.

표 3과 Fig. 7은 입출력 영역의 S-bends 모양에 따른 bending loss를 모식조건 ( $W=7\mu\text{m}$ ,  $S=7\mu\text{m}$ ,  $L=4000\mu\text{m}$ ) 하에서 계산한 것이다. Linear bends 구조가 가장 큰 손실을 보였고 cosine bends 구조가 sine이나 double arc 구조보다 오히려 더 작은 손실을 보였다.

밴딩손실에 대한 시뮬레이션 결과, 스위칭 전압을 고려한 방향성 결합기 길이, 입출력 영역 및 방향성 결합기간의 연결부위를 위한 S-bend의 길이를 이용하여, 주어진 3 inch LiNbO<sub>3</sub> 기판 내에 최소의 손실을 가지며 구동할 수 있는 4x4 광 매트릭스 스위치를 제작하였다. 제작된 매트릭스 스위치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 8은 cosine-bend 구조를 갖는 bend 및 cross 영역의 도파로 패턴(1000 magnification)의 광학현미경 사진

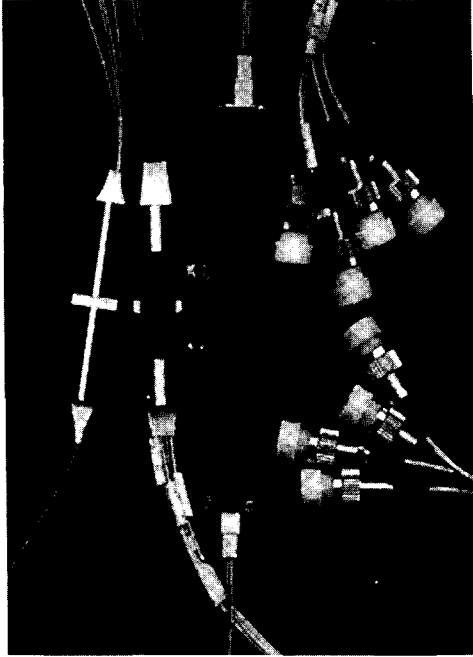


Fig. 9. A photograph of the packaged optical 4×4 matrix switch.

이다. Ti 확산 및 Au 전극이 증착된 웨이퍼를 스위치 칩 크기에 맞게 dicing saw를 이용하여 절단하였다. 절단된 칩 양 끝 단면은 화이버 어레이 블록과 저손실 접속을 위하여 특수 제작된 폴리싱 지그를 이용하여 광학 연마하였고, 스위치의 신뢰성을 높이기 위해 플라스틱 재질의 충격 흡수체 내에 장착하였다. 제작이 완료된 4×4 광매트릭스 스위치의 사진을 Fig. 9에 나타내었다. 제작된 광스위치의 삽입

손실, 스위칭 속도, 파장의존성 등의 특성을 분석하여 문제점을 보완함으로써 더욱 우수한 소자 제작이 가능할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

Z-cut LiNbO<sub>3</sub>를 이용한 4×4 스위치의 구현을 위해 2×2 방향성 커플러 4개를 하나의 웨이퍼 위에 집적화시킨 도파로형 광스위치를 제작하였다. 제작조건은 두도파로 방향성 결합기의 입출력 영역의 S-bend구조는 cosine, 길이를 4000μm로 하였다. 또한, 4×4 스위치 구현 시 방향성 결합기 출력 영역에서 한쪽 도파로의 분기된 부분이 인접한 방향성 결합기와 연결되는 S-bend의 길이 L은 약 8000μm였다.

#### 참 고 문 헌

1. L.Y. Lin, Optical Fiber Communication Conference 99, San Diego USA, Feb. 21-26 (1999).
2. S. Gosselin, and J. Sapriel, European Conference on Optical Communication, Madrid, Spain, Sep. 20-24 (1998).
3. M.Fukuma and J.Noda, Applied Optics. **19**, 591-597 (1980).
4. Kenji Kawano, Toshinori Nozawa, Mitsuaki Yanagibashi and Hiroshimichi Jumonji, NTT REVIEW. **1**, 103-112 (1989).
5. T.Noguchi, K.Kawano, M.Yanagibashi and H.Jumonji, NTT R&D. **38**, 629-638 (1989).