

論文99-36D-6-8

바깥도파로 입사된 Ti:LiNbO₃ 세 도파로 광스위치의 설계 및 제작

(Design of Ti:LiNbO₃ Three-Waveguide Optical Switch with Outer-Waveguide Fed)

金永文*, 徐廷勳*, 許彰烈*, 金昌敏*

(Young-Moon Kim, Jung-Hoon Seo, Chang-Yul Huh, and Chang-Min Kim)

요 약

등간격을 갖는 동일한 구조의 Ti:LiNbO₃ 세 도파로와 그 위에 CPW 구조 Al 전극을 갖는 광스위치를 설계, 제작, 실험하였다. z-cut LiNbO₃ 기판상에 1025°C에서 6시간 동안 Ti 패턴을 확산시킨 세 도파로 방향성 결합기를 제작하였다. TM 모드의 전파 손실을 줄이기 위해 1.2μm 두께의 SiO₂ 박막을 PECVD로 증착시킨 후, 그 위에 광스위칭을 위하여 Al 전극을 형성시켰다. λ=1.3μm의 입사광에 대해서 거의 완벽한 광 coupling이 두 바깥 도파로 사이에서 일어났다. 세 도파로를 반대칭적으로 detuning 되도록 전계가 가해졌을 때 광 스위칭 현상이 일어남을 확인하였다.

Abstract

An optical switch composed of three-identical, equally-spaced Ti:LiNbO₃ waveguides and overlaid Al electrodes of CPW structure was designed and fabricated. Patterned Ti was diffused into z-cut LiNbO₃ substrates at 1025°C for 6 hours to make a three-waveguide directional coupler. SiO₂ buffer layer of 1.2μm was grown by the PECVD to reduce the propagation loss of TM mode, and Al electrodes were built on the layer for switching the guided beam. For an incident beam of λ=1.3μm, almost perfect optical coupling between two outer waveguides was observed. When an electric field was applied to detune the three waveguides anti-symmetrically, the optical switching phenomenon was successfully confirmed.

I. 서 론

방향성 결합기는 집적 광학의 초기 단계에서부터 모든 광소자의 필수 불가결한 소자로서 관심을 끌어들였다. 일반적으로 방향성 결합기는 광결합이 일어날 수 있을

만큼 충분히 가까이에 위치한 두 개의 도파로로써 구성되어진다. 방향성 결합기는 광 분파기/합파기, 스위치/변조기 등의 소자로서 이용되어져 왔으며, 다양한 형태와 재료에 대하여 이론과 실험을 통해서 해석되어져 왔다. 제작된 광결합길이는 설계된 값과 차이가 있을 수 있기 때문에 reversed Δβ 방법이 제안되어졌다. 최근에, 두 도파로 방향성 결합기를 대신하는 세 도파로 방향성 결합기가 제안되어졌으며^{[1]-[10]}, 세 도파로 결합기는 normal 모드^{[1]-[5]} 또는 coupled 모드^{[6]-[7]}로 해석 가능하다.

또한 세 도파로 방향성 결합기에 전극을 올림으로써 능동소자로서 사용되어질 수 있음이 제안되어졌다. S. Ruschin은 세 도파로 광스위치 구조에서 바깥 도

* 正會員, 서울시立大學校 電子電氣工學部

(Department of Electronics Engineering, The University of Seoul)

※ 본 연구는 1998년도 정보통신연구관리단 (대학기초 연구지원 C1-98-0062-00)의 지원에 의하여 이루어졌습니다.

接受日字:1999年2月8日, 수정완료일:1999年5月8日

파로 입사광에 대하여 각 도파로의 굴절율을 대칭적으로 detuning시켜 스위칭 조건을 찾으려 했으나 완전한 조건을 찾지 못하였다^[11]. L. Molter-Orr는 바깥도파로 입사광에 대하여 굴절율을 반대칭적으로 detuning 시킨 경우와 가운데 도파로 입사광에 대하여 굴절율을 대칭적으로 detuning 시킨 경우를 해석하였으나 그 결과는 일부 틀리고 일부 불완전하다^[12]. R. G. Peall에 의하여 처음으로 세 도파로 광스위치가 실험적으로 입증되어졌다^[13].

본 논문에서는 동일한 구조와 등간격으로 이루어진 세 도파로 광스위치를 다루었다. 세 도파로가 광스위치로서 동작하기 위해서는 도파로 위에 얹은 전극의 전계를 도파로에 가함으로써 세 도파로의 굴절율을 대칭적 또는 반대칭적으로 detuning 시킬 필요가 있다.

바깥 도파로에서 광이 입사되어진 경우에 해석의 결과는 다음과 같다^[14]. i) 굴절율을 대칭적으로 detuning 시키면 스위칭이 가능한 소자의 길이가 존재하지 않는다. ii) 굴절율을 반대칭적으로 detuning 시키면 스위칭이 가능한 소자의 길이가 불연속적으로 존재한다.

광스위치의 제작 과정은 다음과 같다. z-cut LiNbO₃ 기판상에 표준석판법에 의하여 광결합기 Ti 패턴을 뜬 후, 700Å 두께의 Ti를 1025°C에서 6시간 동안 내부 확산시킨다. 기판의 광도파로 입출력 면을 연마한 후, 1.2μm 두께의 SiO₂ 완충 박막을 형성시킨다. 그 위에 그림 2와 같은 형태로 CPW구조의 Al 전극을 올린다.

광 스위칭 측정과정은 다음과 같다. 정렬을 위하여 0.6328μm 광원을 편광기, 집속 렌즈를 거쳐 바깥 도파로에 입사시킨후, CCD 카메라로 출력 영상을 잡는다. 광원을 1.3μm TM 모드로 대치시켜, 광 측정 부품들의 정렬을 재조정한다. λ=1.3μm의 광을 바깥 도파로에 입사시킨 후 전극에 전압을 인가하여 스위칭 현상을 확인하였다.

이상의 설계과정, 제작과정, 측정과정을 거쳐 광결합현상, 광스위칭 현상을 실험하였다. 스위칭 전압 15.6V, 소멸비 35.1dB를 갖는 광 스위칭이 일어남을 확인하였다.

II. 세 도파로 coupled mode 해석

세 도파로 방향성 결합기의 광스위칭을 coupled

mode로 해석한 세 도파로 coupled 모드 방정식은 다음과 같이 기술되어 진다^[14].

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} A_1(z) &= -jx_1 A_2(z) e^{i\Delta\beta_1 z} \\ \frac{d}{dz} A_2(z) &= -jx_1 A_1(z) e^{-i\Delta\beta_1 z} - jx_3 A_3(z) e^{-i\Delta\beta_3 z} \\ \frac{d}{dz} A_3(z) &= -jx_3 A_2(z) e^{i\Delta\beta_3 z} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Delta\beta_1 &= \beta_1 - \beta_2 \\ \Delta\beta_3 &= \beta_3 - \beta_2 \end{aligned} \quad (2)$$

이며, β_i 는 각 도파로의 전파상수이다.

그림 1 같이 동일한 구조와 등간격을 갖는 세 도파로에서 바깥 도파로 즉 WG 1으로 광이 입사될때, 굴절율이 비대칭 조정된 경우에 대하여 논의하기로 하자.

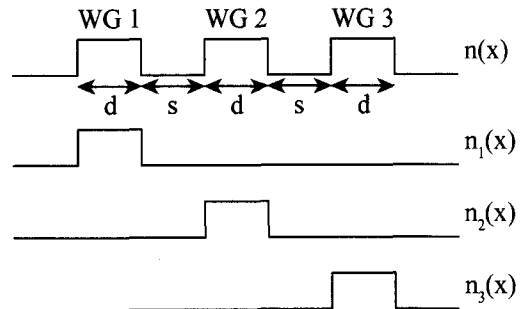


그림 1. 동일구조와 등간격을 가지는 세 도파로의 굴절율 분포

Fig. 1. Index distribution of identical and equally-spaced three-waveguide.

세 도파로가 동일한 구조를 가지며, 등간격으로 놓여져 있기 때문에, $x_1 = x_3 = x$ 라고 놓는다.

식 (1)의 미분 방정식을 풀기 쉬운 형태로 만들기 위해 다음과 같이 치환을 하기로 한다.


$$\begin{aligned} A_1(z) &= a_1(z) e^{i\Delta\beta_1 z} \\ A_2(z) &= a_2(z) \\ A_3(z) &= a_3(z) e^{i\Delta\beta_3 z} \end{aligned} \quad (3)$$

이제 식 (1)은 다음과 같이 되어진다.

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} \Delta\beta_1 & x & 0 \\ x & 0 & x \\ 0 & x & \Delta\beta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

전극에 의해서 각 도파로에 전계가 가해지면, 그림 1의 전체 굴절율 분포는 전기광학 효과로 인하여 변화가 생긴다. 광 스위칭 현상을 해석하기 위해서 다음과 같이 1. 전압이 가해지지 않은 경우($\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = 0$), 2. 굴절율을 반대칭적으로 변화시킨 경우($\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$), 3. 굴절율을 대칭적으로 변화시킨 경우($\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = \Delta\beta$)로 분류하여 해석한다.

1. $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = 0$

( : 전압이 가해지지 않은 경우)

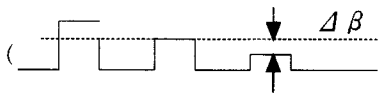
식 (4)의 해는 다음과 같이 기술되어진다.

$$\begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + \frac{1}{2} & c_2 & c_1 - \frac{1}{2} \\ c_2 & 2c_1 & c_2 \\ c_1 - \frac{1}{2} & c_2 & c_1 + \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(0) \\ a_2(0) \\ a_3(0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{1}{2} \cos \sqrt{2}xz \\ c_2 &= -j \frac{1}{2} \sin \sqrt{2}xz \end{aligned} \quad (6)$$

2. $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$

( : 굴절율을 반대칭적으로 변화시킨 경우)

$a_1(z)$, $a_2(z)$, $a_3(z)$ 의 해는 다음과 같이 나타내어진다.

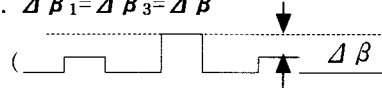
$$\begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + \frac{x^2}{x'^2} & c_2 & c_3 - \frac{x^2}{x'^2} \\ c_2 & 2c_3 + \frac{\Delta\beta^2}{x'^2} & -c_2^* \\ c_3 - \frac{x^2}{x'^2} & -c_2^* & c_1^* + \frac{x^2}{x'^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(0) \\ a_2(0) \\ a_3(0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} c_1 &= (1 - \frac{x^2}{x'^2}) \cos x'z - j \frac{\Delta\beta}{x'} \sin x'z \\ c_2 &= -j \frac{x}{x'} \sin x'z + \frac{x\Delta\beta}{x'^2} (\cos x'z - 1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_3 &= \frac{x^2}{x'^2} \cos x'z \\ x'^2 &= \Delta\beta^2 + 2x^2 \end{aligned} \quad (8)$$

3. $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = \Delta\beta$

( : 굴절율을 대칭적으로 변화시킨 경우)

이 경우는 본 논문의 광스위칭 소자와 동작 원리가 다르므로 생략하기로 하고, [14]를 참조하면 된다.

III. 스위칭 해석

그림 2에서와 같이 바깥 도파로(도파로 1)에 광을 입사시킨 경우에 어떻게 스위칭이 일어나는가에 대하여 알아보기로 한다.

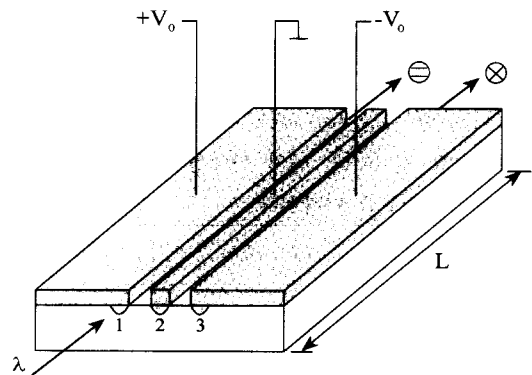



그림 2. 광이 바깥 도파로에 입사되는 경우의 스위칭
Fig. 2. Switch operation when input beam is launched into the outer W/G.

처음 광이 입사된 도파로에서 다른 도파로로 완전히 전달되는 경우를 ⊗상태로 나타내기로 하고, 광이 입사된 도파로로 다시 출력되는 경우를 ⊖ 상태로 나타내기로 한다.

초기 조건은 다음과 같다.

$$a_1 = 1, \quad a_2 = 0, \quad a_3 = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (9)$$

1. $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = 0$

( : 전압이 가해지지 않은 경우)

이는 전계가 가해지지 않은 경우이며, 식 (5)는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} a_1(z) &= \frac{1}{2}(\cos(\sqrt{2}xz) + 1) \\ a_2(z) &= -\frac{j}{\sqrt{2}}\sin(\sqrt{2}xz) \\ a_3(z) &= \frac{1}{2}(\cos(\sqrt{2}xz) - 1) \end{aligned} \quad (10)$$

A. ⊗ 상태

도파로 1에 입사된 광이 z=L에서 도파로 3으로 완전히 옮겨가기 위해서, 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$a_1 a_1^* = a_2 a_2^* = 0, \quad a_3 a_3^* = 1 \quad \text{at } z=L \quad (11)$$

식 (11)은 다음의 경우에 만족되어진다.

$$L = (2m-1)\frac{\pi}{\sqrt{2}x} = (2m-1)l_{c1}, \quad m=1,2,\dots \quad (12)$$

m=1일 때, 처음으로 ⊗ 상태가 되며, 따라서, 결합 길이는 다음과 같다.

$$l_{c1} = \frac{\pi}{\sqrt{2}x} = \sqrt{2}l_c \quad (13)$$

식 (13)에서 l_c(=π/2x)는 대칭적인 두 도파로 결합기의 결합 길이이다. l_{c1}의 아래첨자 1은 광이 쏘아진 도파로의 번호를 나타낸다.

B. ⊖ 상태

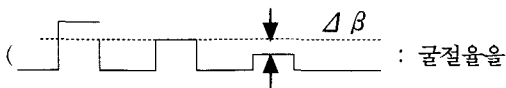
도파로 1에 입사된 광이 다시 도파로 1로 되돌아오기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$a_1 a_1^* = 1, \quad a_2 a_2^* = a_3 a_3^* = 0 \quad \text{at } z=L \quad (14)$$

식 (14)는 다음의 경우에 만족되어진다.

$$L = (2m)\frac{\pi}{\sqrt{2}x} = 2ml_{c1}, \quad (m=1,2,3,\dots) \quad (15)$$

2. Δβ₁=-Δβ₃=Δβ



반대칭적으로 변화시킨 경우)

이는 전계가 가해짐에 따라 굴절율 분포가 반대칭적으로 변화되어지는 경우이며, 이 경우에는 식 (7)을 사용하여 해석되어진다.

A. ⊗ 상태

광이 다른 도파로로 완전히 옮겨 가기 위해서는 식 (11)이 만족되어야 하는데, 이를 만족하는 해는 존재하지 않는다.

B. ⊖ 상태

⊖ 상태는 식 (14)가 만족되어야 하며, 다음의 해를 얻을 수 있다.

$$\sqrt{\Delta\beta^2 + 2x^2}L = 2m\pi \quad (m=1,2,3,\dots) \quad (16)$$

식 (16)은 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta\beta L}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{L}{l_{c1}}\right)^2 = (2m)^2 \quad (m=1,2,3,\dots) \quad (17)$$

그림 3은 식 (12), (15), (17)의 스위칭 조건을 스위칭 다이어그램으로 나타내고 있다.

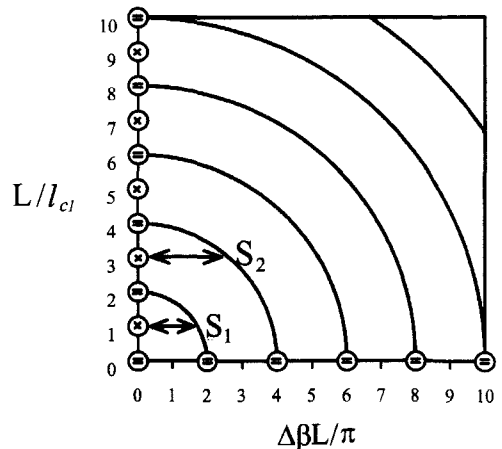
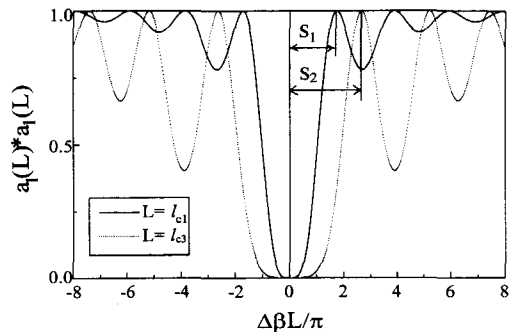


그림 3. Δβ₁=-Δβ₃=Δβ인 경우의 스위칭 다이어그램

Fig. 3. Switching diagram for Δβ₁=-Δβ₃=Δβ.



(a)

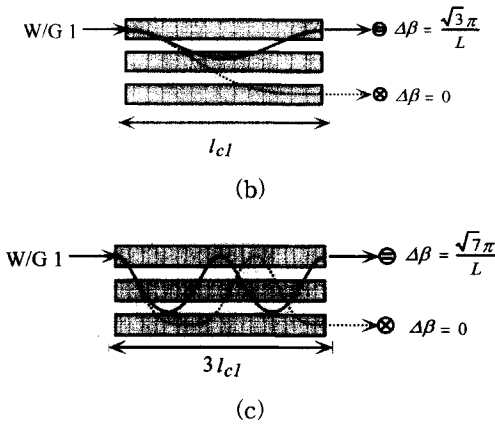


그림 4. $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 인 경우 스위칭 (a) 도파로 1의 출력 파워 변화 (b) $L = l_{cl}$ 일 때, 스위칭 동작 (c) $L = 3l_{cl}$ 일 때, 스위칭 동작
 Fig. 4. Switching operation for $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ (a) output power variation of WG1 (b) switching operation for $L = l_{cl}$ (c) switching operation for $L = 3l_{cl}$.

그림 3에서 S_1, S_2 는 스위칭 일어나는 처음 두 경우를 나타내고 있다.
 그림 4는 도파로 1의 출력 파워의 변화와 $L = l_{cl}, 3l_{cl}$ 일 때, 스위칭 동작을 보여주고 있다.
 본 논문에서는 $L = l_{cl}$ (S_1 스위칭)을 대상으로 설계, 제작을 하였다.

IV. Ti:LiNbO₃ 광도파로 모델링 및 해석

1. 굴절율 분포함수

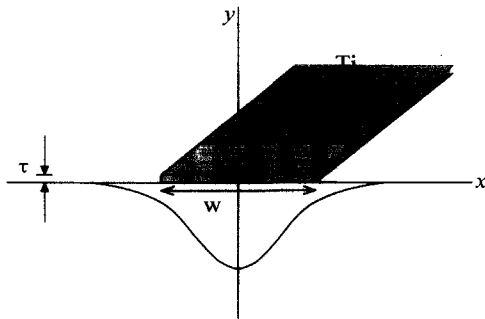


그림 5. 채널형 광도파로 형태
 Fig. 5. Channel type optical W/G.

그림 5의 채널형 광도파로의 굴절율 분포는 수평방향으로는 Gaussian 함수의 적분형으로, 길이방향으로

는 Gaussian 함수로 가정한다. 확산 재료 Ti이 700 Å일 경우, 두께가 확산깊이에 비해 무시할 수 있을 정도로 작고 확산시간이 Ti이 모두 없어지는 시간보다 훨씬 길다면 이러한 가정은 무난하다^[15].

$$\Delta n(x, y) = \Delta n_0 \exp\left[-\left(\frac{y}{d_y}\right)^2\right]$$

$$\frac{1}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x + \frac{w}{2}}{d_x}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x - \frac{w}{2}}{d_x}\right) \right] / \operatorname{erf}\left(\frac{w}{2d_x}\right) \tag{18}$$

여기서

$$\Delta n_0 = \frac{dn}{dc} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\tau}{d_y} \operatorname{erf}\left(\frac{w}{2d_x}\right) \tag{19}$$

$$d_x = 2\sqrt{D_x t}, \quad d_y = 2\sqrt{D_y t} \tag{20}$$

$\frac{dn}{dc} = 0.764$ 이고, c 는 Ti의 농도이다. τ 와 w 는 확산전의 Ti 스트립의 두께와 폭을 의미한다. 1025°C에서 $D_x = 1.2 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2/\text{sec}$, $D_y = 1.2 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2/\text{sec}$ 이므로 식 (20)에 의해 $d_x = 3.2 \mu\text{m}$ 이고 $d_y = 3.2 \mu\text{m}$ 이다^[15].

Ti 스트립의 두께 $\tau = 700 \text{Å}$ 일 때, 폭(w)에 따른 Δn_0 의 값은 다음과 같다.

표 1. 스트립의 폭(w)에 따른 Δn_0 의 값 (Ti 두께 : $\tau = 700 \text{Å}$, 확산온도 : 1025°C, 확산시간 : 6hr)

Table 1. Δn_0 value with strip width(w) (Ti thickness : $\tau = 700 \text{Å}$, diffusion temp. : 1025°C, diffusion time : 6hr).

	$w = 4 \mu\text{m}$	$w = 5 \mu\text{m}$	$w = 6 \mu\text{m}$
Δn_0	0.01175	0.01378	0.01537

2. 분산 곡선

확산전 Ti의 폭을 $4 \mu\text{m}$ 에서 $7 \mu\text{m}$ 까지 $1 \mu\text{m}$ 씩 증가하였으며, 두께는 각 폭에 대해서 650 Å, 700 Å, 750 Å, 800 Å의 4가지만을 택하였다. $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, TM 모드로 입사 경우, FEM에 의한 모의전산 수행결과가 그림 6에 있다.

그림 6에서의 b 와 v 는 각각 $b = (N_{eff}^2 - n_0^2) / (2n_0 \Delta n)$, $v = \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{2n_0 \Delta n}$ 이다. 모의전산에서 확산온도는 102

5°C, 확산시간을 6시간으로 하면, $d_x=d_y=3.2\mu\text{m}$ 가 된다. 그리고 $n_s=2.15$, $dn/dc=0.764$ 로 놓았다^[15].

$n_s = 2.15$ 로 놓고 1025°C에서 6시간동안 확산을 하는 경우를 전제로 하였다.

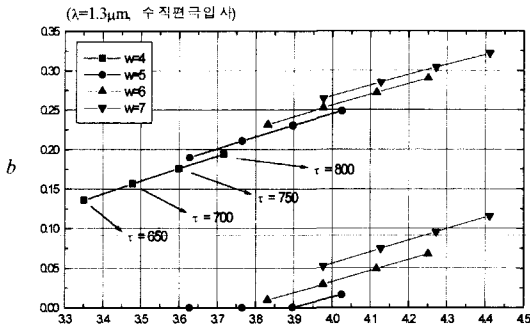


그림 6. z-cut Ti:LiNbO₃ 광도파로 b-v 곡선
Fig. 6. b-v diagram for z-cut Ti:LiNbO₃ optical W/G.

광통신 소자의 설계에 있어 단일모드 조건을 만족 하면서 광의 집중도를 높이기 위해 가능한 한 1차 모드의 차단 주파수에 가까운 정규화 주파수 v 값을 선택하면 된다. 본 논문에서는 $w=5\mu\text{m}$, $\tau=700\text{\AA}$ 값을 택하였으며, 이는 그림 6의 단일모드 조건을 만족하는 $v=3.76$ 에 해당된다.

V. 세 도파로 결합기의 설계

Normal mode 이론에 의해 광도파로가 방향성 결합기와 같이 두 개의 도파로로 구성된 경우의 결합길이를 구하여 세 도파로 방향성 결합기의 결합길이를 구하였다.

대칭 균일 방향성 결합기의 광결합길이는 even과 odd 모드간의 맥동주기의 반으로 나타낸다.

$$l_c = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o} = \frac{\lambda}{2(N_e - N_o)} \tag{21}$$

여기서 β 는 전파상수를, N 은 mode index를 나타낸다.

바깥 도파로 입사된 세 도파로 방향성 결합기의 결합길이는 식 (13)에 의해 다음과 같이 나타낸다.

$$l_a = \sqrt{2}l_c \tag{22}$$

z-cut LiNbO₃ 기판에 1.3 μm 의 TM-mode가 입사되는 경우 두 도파로 방향성 결합기의 광결합길이는 표 2와 같이 나타낸다. 이 때 제작조건으로는 Ti 스트립의 폭이 5 μm , 두께가 700 \AA 일 때, 기판의 굴절율은

표 2. 제작에 적용된 Ti:LiNbO₃ 광도파로 방향성 결합기의 결합길이 l_{cl}

Table 2. Coupling length(l_{cl}) of directional coupler applied fabrication

W ₁	S	W ₂	Even mode index N_e	Odd mode index N_o	Coupling length	
					l_c	l_{cl}
5 μm	6 μm	5 μm	2.15304	2.15298	9744 μm	13780 μm

* $n_s = 2.15$, $\tau = 700\text{\AA}$, $t = 1025^\circ\text{C}$, $h = 6\text{hrs}$

표 2의 설계치를 토대로 Ti:LiNbO₃ 세 도파로 광스위치를 제작하였다. 우선 양각으로 제작된 mask를 이용하여 표준 석판법(Standard Photolithography)에 의한 습식 식각(wet etching) 방법으로 LiNbO₃ 기판위에 Ti pattern을 하였다. 그런 다음 1025°C에서 6시간의 Ti 내부확산을 통하여 채널형 광도파로를 제작하였다. 제작된 도파로의 PECVD를 이용하여 1.2 μm 두께의 SiO₂막을 증착하고, 상단에 Al으로 전극을 제작하였다. 그리고 도파로 안으로 광을 효율적으로 입사시키기 위해 끝면 연마(End Polishing)을 수행하였다. 그림 7은 세 도파로 광스위치의 도파로와 전극의 mask pattern을 나타내는 그림이다.

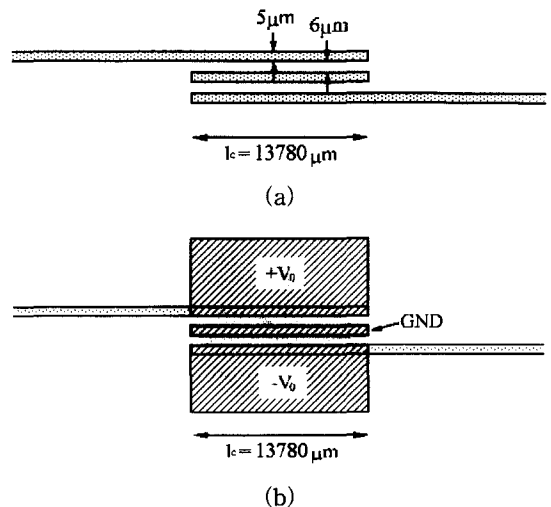


그림 7. 세 도파로와 전극의 마스크 패턴 (a) 도파로 패턴 (b) 도파로 위에 올려진 전극 패턴
Fig. 7. Mask patterns for three-W/G, electrode (a) W/G pattern (b) electrode pattern on W/G.

VI. 광 스위치 특성 측정 및 결과

1. 단일 광도파로의 모드 측정

그림 8에는 z-cut LiNbO₃ 기판위에 제작된 세 도파로 광스위치의 구조가 도시되어 있다.

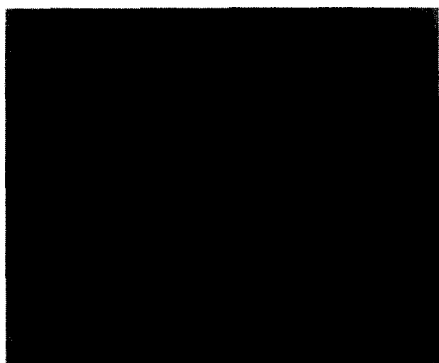
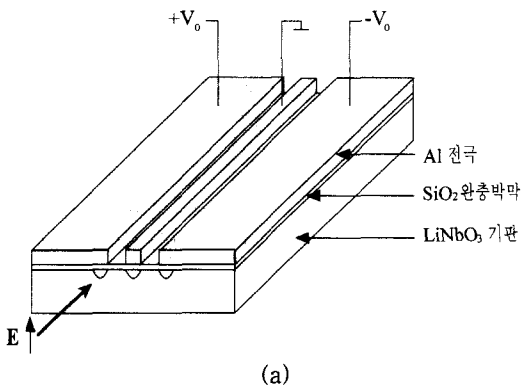


그림 8. 제작된 세 도파로 광스위치 (a) 개략도 (b) 제작된 소자의 출력단 패턴
Fig. 8. Fabricated three-W/G optical switch (a) Schematic diagram (b) Fabricated device pattern.

제작된 광도파로의 특성을 측정하기 위한 장치가 그림 9에 도시되어 있다. 가시광선영역인 0.6328μm 레이저를 이용하여 CCD 카메라에 나타난 모드를 찾아 정렬시킨 다음, 1.3μm 레이저 다이오드의 출력광을 PMF(Polarization Maintaining Fiber)를 통하여 광도파로에 결합시킨다. 40배 대물렌즈를 이용하여 광도파로의 출력광의 상이 CCD 카메라의 검출기 표면에 맺히도록 한다.

광도파로를 지지하고 있는 positioner와 도파로에 입력되는 fiber ferrule의 tilt를 잘 조정하고, 도파로와 대물렌즈의 거리를 조절하여 도파로의 출력광세

기가 최대가 되는 결합조건을 얻었다.

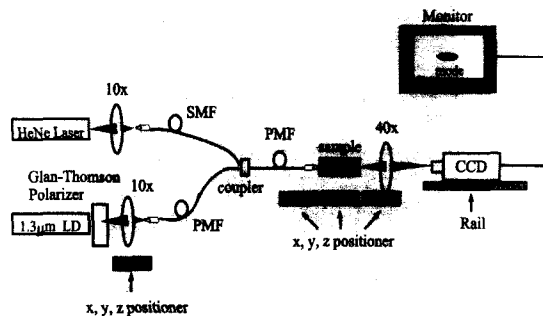


그림 9. 광도파로 특성 측정 장치
Fig. 9. Measurement system for optical W/G characterization.

A. λ=0.6328μm

앞에서 기술된 Ti:LiNbO₃ 도파로의 제작 조건은 λ=1.3μm TM 모드 입사시, Ti 두께가 700Å, 폭이 5μm일 때 1025°C에서 6시간동안 확산하였다. 이는 v=3.76인 경우에 해당되며, 그림 6의 b-v 곡선에서 알 수 있듯이 단일모드에 해당된다.

그러나 광원을 λ=0.6328μm로 대체시키는 경우 v ≈ 7.0이 되며, 계산에 의하면 모드가 적어도 세 개 이상 나온다. 따라서 λ=0.6328μm에서는 다모드 도파로가 되며, 이 경우 입사조건에 따라 다양한 광출력 패턴을 보인다.

$$E_{in}(x, y) = c_0 E_0(x, y) + c_1 E_1(x, y) + c_2 E_2(x, y) + \dots \quad (23)$$

단, $\langle E_i | E_j \rangle = \delta_{ij}$

여기서 E₀, E₁, E₂, … 등은 power가 1로 정규화되어 있으며, 도파로 형태가 고정되면 E_i(x, y)는 모두 확정된다.

광원은 도파로 입구에 정준준하여 입사하여야 하나, 도파로 입구의 치수가 수 μm에 불과하므로 실험할 때마다 입사위치가 조금씩 바뀌게 된다. 이런 이유로 E_{in}(x, y)가 변하게 되므로 c₀, c₁, c₂, … 등이 역시 변하게 된다.

$$c_j = \langle E_{in} | E_j \rangle \quad (24)$$

이상과 같은 이유로 다모드 도파로는 입사위치에 따라 다음 그림 10과 같이 다양한 패턴을 보이게 된다.

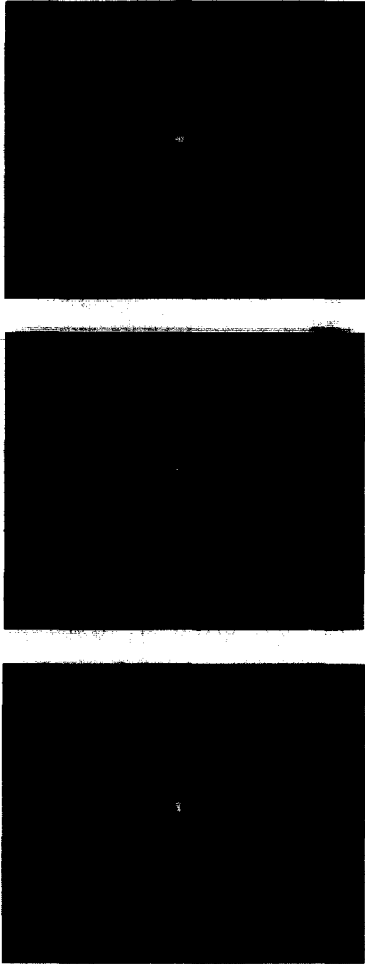
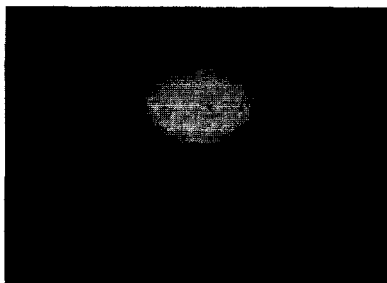


그림 10. $\lambda=0.6328\mu\text{m}$ 입사시 다모드 도파로의 near field pattern

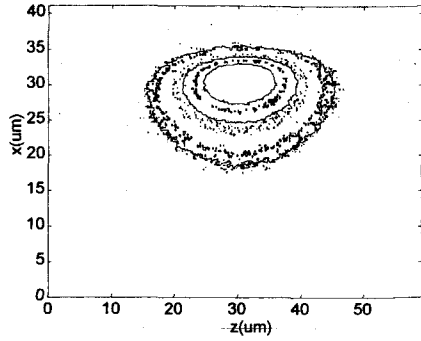
Fig. 10. Near field pattern when input beam is $\lambda=0.6328\mu\text{m}$.

B. $\lambda=1.3\mu\text{m}$

그림 11(a)는 단일 도파로에 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 의 광을 입사시킬 때 CCD 카메라로 잡은 도파모드를, (b)는 광세기에 대한 등고선 분포를 나타낸다.



(a)



(b)

그림 11. $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 입사시 단일 도파로의 near field 패턴 (a) CCD 카메라로 잡은 도파모드의 광세기 분포 (b) 도파모드의 등고선 분포

Fig. 11. Near field pattern when input beam is $\lambda=1.3\mu\text{m}$ (a) optical intensity distribution of guided mode on CCD (b) contour of guided mode.

2. 광 스위칭 현상 측정

그림 3에 의하면 첫 번째 광 스위칭이 일어날 조건은 다음과 같다.

$$\Delta\beta \frac{l_{cl}}{\pi} = \sqrt{3} \tag{25}$$

여기서 $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ 이며, $\Delta\beta$ 는 근사적으로

$$\begin{aligned} \Delta\beta &\approx k_0(\delta n) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{2} n^3 r_{33} E \right) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} n^3 r_{33} \left(\Gamma \frac{V_0}{S} \right) \end{aligned} \tag{26}$$

으로 표현된다. $\delta n = (1/2)n^3 r_{33} E$ 로써 E 는 도파로 1에 유기된 전계의 크기이며 이는 근사적으로 $E = \Gamma(V_0/S)$ 로 나타낸다. S 는 두 전극간의 간격이며, Γ 는 전계와 도파광의 중첩인자이며, 실험 경험에 의하면 0.2~0.3 정도이다. 식 (25)를 식 (26)에 대입해서 정리하면 다음과 같이 전극 길이와 입력 전압 사이의 관계식을 얻을수 있다.

$$l_{cl} = \frac{\sqrt{3}\lambda \cdot S}{n^3 r_{33} \Gamma V_0} \tag{27}$$

$\lambda=1.3\mu\text{m}$, $n_e=2.15$, $r_{33}=30.9 \times 10^{-6} \mu\text{m}/V$, $\Gamma \approx 0.3$, $S=6\mu\text{m}$, $l_{cl}=7856\mu\text{m}$ 를 식 (27)에 대입하면 $V_0=18.67V$ 정도의 스위칭 전압이 예상된다.

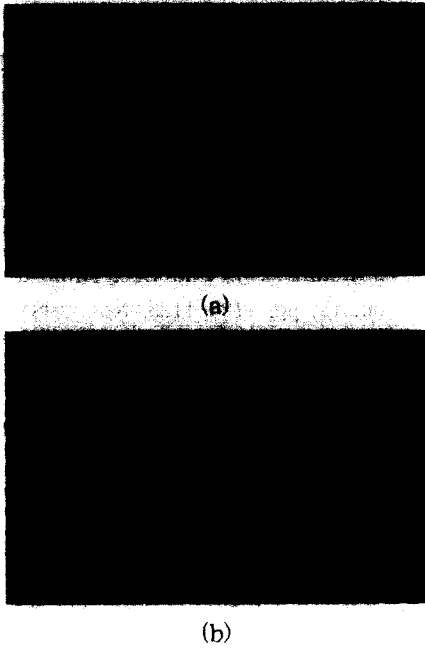


그림 12. 광 스위칭시 도파로 3의 출력광 패턴 (a) $V_0 = 0V$ (b) $V_0 = 15.6V$
 Fig. 12. Output power pattern of W/G-3 at switching (a) $V_0 = 0V$ (b) $V_0 = 15.6V$.

그림 12에는 실제 실험 결과가 보여지고 있다. 도파로 1에 $\lambda = 1.3\mu m$ 의 광이 입사되었고, 출력광은 도파로 3에서 측정되었다. 그림 12(a)는 전압 무인가 시 광결합에 의하여 나타난 출력 광세기 패턴이고, 그림 12(b)는 $V_0 = 15.6V$ 가 인가되었을 때 나타난 결과이다. 식(27)을 이용하여 구한 전압 18.67V보다 더 작은 전압을 인가하였을 때 스위칭이 일어남을 확인하였다.

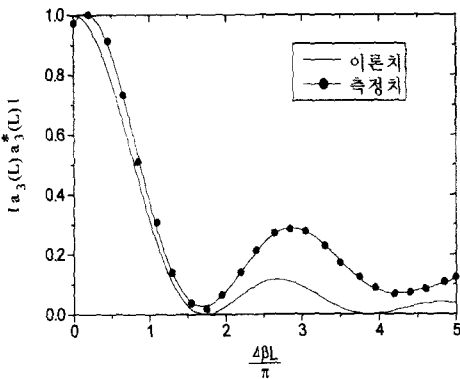


그림 13. 도파로 3의 출력 power 패턴
 Fig. 13. output power pattern of W/G-3.

그림 13에는 도파로 3에서 측정된 출력 전력 패턴을 이론치와 비교하여 나타내고 있다

dc 스위칭 작용을 테스트하는데 있어, 전극에 걸여준 인가 전압은 0~50V 사이에서 변화시켜 주었다. 그림 13에서 볼 때 이론치와 측정치가 대체로 일치하는 것을 볼 수 있으며, 스위칭 전압 및 소멸비는 각각 15.6V 및 35.1dB로 측정되었다.

VII. 결론

동일한 구조, 등간격을 갖는 세 단일모드 도파로 방향성 결합기로 구성된 광스위치를 제안하였고, 이의 검증을 위하여 소자를 설계, 제작하였다. z-cut LiNbO₃ 기판상에서 Ti를 내부확산시켜 단일모드 광도파로를 제작하였으며, TM 모드 입사를 위하여 1.2 μm 두께 SiO₂ 완충 박막을 올린후 CPW 전극을 구성하였다. 바깥 도파로에 $\lambda = 1.3\mu m$ 의 광이 입사되었으며, 굴절율은 반대칭적으로 detuning 시켜가며 광스위칭 현상을 확인 하였다.

제안된 이론을 실험으로 검증하였으며, 제작된 광스위치의 스위칭 전압은 15.6V, 소멸비는 35dB로 측정되었다. 향후 진행과 전극을 탑재하여 초고속 광변조기를 설계, 제작할 예정이다.

참고 문헌

- [1] J. P. Donnelly, N. L. Demeo, and G. A. Ferrante, "Three-optical couplers in GaAs", J. Lightwave Tech, vol. LT-1, no. 2, pp. 417-424, June 1984.
- [2] A. N. Kaul, K. Thyagarajan, and A. Kumar, "Coupling characteristics of a three channel waveguide directional coupler", Optics Commun, vol. 56, no.2, pp. 95-99, 1985.
- [3] J. P. Donnelly, "Limitations on power-transfer efficiency in three-guide optical couplers", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-22, no. 5. pp. 610-616, May 1986.
- [4] J. P. Donnelly, H. A. Haus, and N. Whitaker, "Symmetric three-guide optical coupler with nonidentical center

- and outside guides", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-23, no. 4, pp. 401-406, Apr. 1987.
- [5] H. Kubo, and K. Yasumoto, "Numerical analysis of three-parallel embedded optical waveguides", J. Lightwave Tech., vol. 7, no. 12, pp. 1924-1931, Dec. 1989.
- [6] K. Iwasaki, S. Kurazono, and K. Itakuna, "The coupling of modes in three dielectric slab waveguides", Electron. Commun. Japan, vol. 58-C, no. 8, pp. 100-108, 1975.
- [7] K. L. Chen and S. Wang, "The crosstalk in three-waveguide optical directional couplers", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-22, no. 7, pp. 1039-1041, July 1986.
- [8] F. D. Pacquale and H. E. Hernandez-Figueroa, "Improved all-optical switching in a three-slab nonlinear directional coupler with gain", IEEE J. Quantum Electron., vol. 30, no. 5, pp. 1254-1258, May 1994.
- [9] H. Ogiwara, "Optical waveguide 3×3 switch: Theory of tuning and control", Appl. Opt., vol. 18, no. 4, pp. 510-515, Feb. 1979.
- [10] H. A. Haus and C. G. Fonstad, "Three-waveguide couplers for improved sampling and filtering", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-17, no. 12, pp. 2321-2325, Dec. 1981.
- [11] S. Ruschin and E. Marom, "Coupling effects in symmetrical three-guide structures", J. Opt. Soc. Am. A, vol. 1, no. 12, pp. 1120-1128, Nov. 1984.
- [12] L. Molter-Orr and H. A. Haus, "Multiple coupled waveguide switched using alternating phase mismatch", Appl. Opt., vol. 24, no. 9, pp. 1260-1264, May 1985.
- [13] R. G. Peall and R. R. A. Syms, "Further evidence of strong coupling effects in three-arm Ti:LiNbO₃ directional couplers", IEEE J. Quantum Electron., vol. 25, no. 4, Apr. 1989.
- [14] 임영준, 김창민, "세 도파로 광스위치의 설계 규칙, 전자공학회 논문지", 제33권 A편, 제6호, pp. 197-205, 1996년 6월
- [15] C. M. Kim and R. V. Ramaswamy, "Modeling of graded-index channel waveguides using nonuniform finite difference method", J. Lightwave Tech., vol. 7, no. 10, Oct. 1989.

저 자 소 개



金永文(正會員)

1972년 8월 31일생. 1994년 2월 서울시립대학교 전자공학과 졸업. 1999년 2월 동 대학원 전자공학과 석사. 1999년 3월 ~ 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정. 주관 심분야는 도파/집적광학, 광 스위치/변조기, BPM, FEM 등 수치해석 등임

변조기, BPM, FEM 등 수치해석 등임



許彰烈(正會員)

1972년 2월 22일생. 1997년 2월 서울시립대학교 전자공학과 졸업. 1998년 3월 ~ 현재 동 대학원 전자공학과 석사과정. 주관심분야는 도파/집적광학, 광 스위치/변조기, FDM, FEM 등 수치해석 등임



徐廷勳(正會員)

1972년 5월 2일생. 1997년 서울시립대학교 전자공학과 졸업. 1999년 2월 동 대학원 전자공학과 석사. 주관심분야는 도파/집적광학, 진행파 전극/고속광변조기, FEM, FEM, BPM 등 수치해석 등임

金昌敏(正會員) 第35卷 D編 第6號 參照

현재 서울시립대학교 전자전기공학부 교수