

論文2000-37SD-6-9

가운데 도파로 입사된 Ti:LiNbO₃ 세 도파로 광스위치의 설계 및 제작

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

許彰烈*, 韓榮鐸*, 金昌敏*

(Chang-Yul Huh, Young-Tak Han, and Chang-Min Kim)

요 약

등간격, 동일 구조의 Ti:LiNbO₃ 세 도파로를 이용한 광스위치를 설계하고 제작하였다. 광도파로는 z-cut LiNbO₃ 기판상에 Ti를 내부 확산시켜 제작하였다. TM 모드 전파 손실을 줄이기 위하여 도파로 위에 SiO₂ 박막을 증착시킨 후, 광스위치를 위하여 CPW(Coplanar Waveguide)구조 Al 전극을 형성시켰다. 가운데 도파로에 입사된 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 광에 대하여 세 도파로가 대칭적으로 detuning 되도록 전계 인가시 광스위칭이 일어남을 확인하였다.

Abstract

An optical switch composed of identical, equally-spaced Ti:LiNbO₃ three-waveguides was designed and fabricated. Patterned Ti was diffused into z-cut LiNbO₃ substrates. SiO₂ buffer layer was evaporated to reduce the propagation loss of TM mode, and Al electrodes of CPW structure were built on the layer for switching of the guided beam. The optical switching phenomenon was confirmed when a beam of $\lambda=1.3\mu\text{m}$ was launched into the center waveguide and an electric field was applied to detune the three waveguides symmetrically.

I. 서 론

방향성 결합기는 광통신 집적광학소자 대부분에 이용될 정도로 필수적인 소자로써 광 분파기/합파기, 광스위치/변조기 등에 기본 구조로 채택되어왔다. 다만 두 평행 도파로간의 광결합 길이를 알고 있다하더라도

입출력 부분의 굽음 구조로 말미암아 두 도파로 사이의 완전 광결합을 얻기가 현실적으로 곤란하였다. 이러한 문제를 극복하고자 교번 $\Delta\beta$ 구조가 제안되었으나^[1], 이는 결합길이가 늘어나고 인가전압이 증가되어야하는 단점을 안고 있다. 이후 두 도파로 방향성 결합기를 대신하는 세 도파로 방향성 결합기가 제안되었으며^{[2] [13]}, 세 도파로 방향성 결합기는 normal 모드^{[2] [4]} 또는 coupled 모드^{[5] [13]}로 해석 가능하다.

또한 세 도파로 방향성 결합기에 전극을 올림으로써 능동 소자로써 사용되어질 수 있음이 제안되어졌다. S. Ruschin은 세 도파로 광스위치 구조에서 바깥 도파로 입사광에 대하여 각 도파로의 굴절율을 대칭적으로 detuning시켜 스위칭 조건을 찾으려 했으나 완전한 조건을 찾지 못하였다^[8]. L. Molter-Orr는 바깥 도파로 입사광에 대하여 굴절율을 반대칭적으로 detuning 시킨

* 正會員, 서울시立大學校 電子電氣工學部除科

(Dept. of Electronics Eng., The University of Seoul)

※ 본 연구는 1999년도 서울시립대학교 학술 연구조성비, 1999년 연구교수년 지원 연구비, 그리고 정보통신연구관리단 대학기초연구지원(CI-98-1062-00, 1998)에 의하여 이루어졌습니다.

接受日字:1999年11月18日, 수정완료일:2000年5月2日

경우와 가운데 도파로 입사광에 대하여 굴절율을 대칭적으로 detuning 시킨 경우를 해석하였으나 그 결과는 일부 틀리고 일부 불완전하다^[10]. R. G. Peall에 의하여 처음으로 세 도파로 광스위칭이 실험적으로 입증되어 졌으며^[10], 이후 국내에서도 유사한 연구가 수행된 바 있다^[11,12].

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

가운데 도파로에 광이 입사되었던 경우에 해석의 결과는 다음과 같다. i)굴절율을 대칭적으로 detuning시키면 스위칭이 가능한 소자의 길이가 불연속적으로 존재한다. ii)굴절율을 반대칭적으로 detuning시키면 스위칭이 가능한 소자의 길이가 연속적으로 존재한다. 본고에서는 대칭 detuning 된 경우를 다루고자 한다.

광스위칭의 제작 과정은 다음과 같았다. z-cut LiNbO₃ 기판상에 표준식판법(Standard Photolithography)에 의하여 광결합기 Ti 패턴을 만든 후, 700Å 두께의 Ti를 1025°C에서 6시간 동안 내부 확산시켰다. 기판의 광도파로 입출력 면을 연마한 후, 1.2μm 두께의 SiO₂ 완충 박막을 형성시켰다. 그 위에 그림 1과 같은 형태로 CPW구조의 Al 전극을 올렸다. 설계, 제작을 거쳐 λ=1.3μm에서 광결합 현상, 광스위칭 현상을 실험하였으며, 스위칭 전압 30V, 소멸비 30dB를 확인하였다.

II. 세 도파로 광결합 및 스위칭 해석

세 도파로 방향성 결합기의 광스위칭을 coupled mode로 해석한 세 도파로 coupled 모드 방정식은 다음과 같이 기술되어 진다^[11].

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} A_1(z) &= -j\chi_1 A_2(z) e^{j\Delta\beta_1 z} \\ \frac{d}{dz} A_2(z) &= -j\chi_1 A_1(z) e^{-j\Delta\beta_1 z} - j\chi_3 A_3(z) e^{-j\Delta\beta_3 z} \\ \frac{d}{dz} A_3(z) &= -j\chi_3 A_2(z) e^{j\Delta\beta_3 z} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

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

이며, β_i는 각 도파로의 전파상수이다.

세 도파로가 동일한 구조를 가지며, 등간격으로 놓여져 있기 때문에, k₁=k₂=k라고 놓는다.

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

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

이후의 해석 결과는 [11,13]을 참조한다.

그림 1에는 가운데 도파로(도파로2)에 광을 입사시킨 경우가 그려져 있으며, 대칭적으로 detuning된 경우에 스위칭 현상을 살펴보기로 한다.

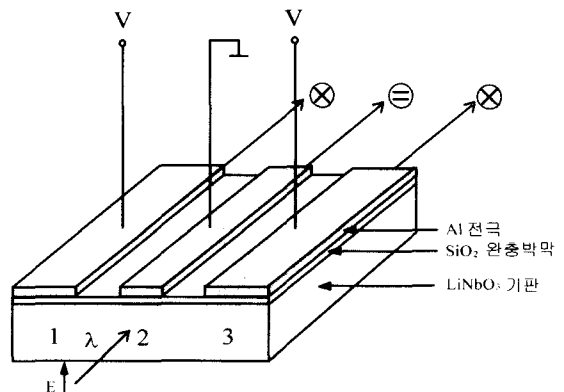


그림 1. TM모드 광이 가운데 도파로에 입사되는 경우의 스위칭

Fig. 1. Switch operation when TM mode beam is launched into the center WG.

처음 광이 입사된 도파로(WG : waveguide)에서 다른 도파로로 완전히 전달되는 경우를 ⊗상태(cross-state)로 나타내기로 하고, 광이 입사된 도파로로 다시 출력되는 경우를 ⊖ 상태(bar-state)로 나타내기로 한다.

초기 조건은 다음과 같다.

$$a_1 = 0, \quad a_2 = 1, \quad a_3 = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (4)$$

1. Δβ₁=Δβ₃=0
(: 전압이 가해지지 않은 경우)

이는 전계가 가해지지 않은 경우이며, 해는 다음과

같이 나타내어진다^{11,13)}.

$$\begin{aligned} a_1(z) &= -\frac{j}{\sqrt{2}} \sin(\sqrt{2}xz) \\ a_2(z) &= \cos(\sqrt{2}xz) \\ a_3(z) &= -\frac{j}{\sqrt{2}} \sin(\sqrt{2}xz) \end{aligned} \quad (5)$$

A. ⊗ 상태

도파로 2에 입사된 광이 z=L에서 도파로 1과 3으로 완전히 옮겨가기 위해서, 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$a_1 a_1^* = a_3 a_3^* = \frac{1}{2}, \quad a_2 a_2^* = 0 \quad \text{at } z=L \quad (6)$$

식 (6)은 다음의 경우에 만족되어진다.

$$L = (2m-1) \frac{\pi}{2\sqrt{2}x} = (2m-1)l_{c2}, \quad m=1, 2, \dots \quad (7)$$

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

$$l_{c2} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}x} = \frac{1}{\sqrt{2}} l_c \quad (8)$$

식 (8)에서 l_c(= π/2κ)는 대칭적인 두도파로 결합기의 결합 길이이다. l_{c2}의 아래첨자 2는 광이 입사된 도파로의 번호를 나타낸다.

B. ⊖ 상태


도파로 2에 입사된 광이 다시 도파로 2로 되돌아오기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

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

식 (9)는 다음과 같은 경우에 만족되어진다.

$$L = (2m) \frac{\pi}{2\sqrt{2}x} = 2ml_{c2}, \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

2. Δβ₁=Δβ₃=Δβ

 : 굴절율을 대칭적으로 변화시킨 경우)

이 경우에 해석을 위해서 다음식이 사용되어진다¹⁴⁾.

$$\begin{aligned} a_1(z) &= -j e^{-j \frac{\Delta\beta}{2} z} \frac{x}{x'} \sin x' z \\ a_2(z) &= e^{-j \frac{\Delta\beta}{2} z} (\cos x' z + j \frac{\Delta\beta}{2x'} \sin x' z) \\ a_3(z) &= -j e^{-j \frac{\Delta\beta}{2} z} \frac{x}{x'} \sin x' z \end{aligned} \quad (11)$$

A. ⊗ 상태

이는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$a_1 a_1^* + a_3 a_3^* = 1, \quad a_2 a_2^* = 0 \quad \text{at } z=L \quad (12)$$

이 경우는 만족하는 해가 존재하지 않는다.

B. ⊖ 상태

⊖ 상태가 되기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$a_1 a_1^* = a_3 a_3^* = 0, \quad a_2 a_2^* = 1 \quad \text{at } z=L \quad (13)$$

식 (13)을 만족하는 해는 다음과 같다.

$$\sqrt{\frac{\Delta\beta^2 + 8x^2}{2}} L = m\pi \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (14)$$

식 (14)는 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{L}{l_{c2}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\beta L}{\pi}\right)^2 = (2m)^2 \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (15)$$

식 (7), (10), (15)의 스위칭 조건을 그림 2의 스위칭 다이어그램으로 나타낼 수 있다.

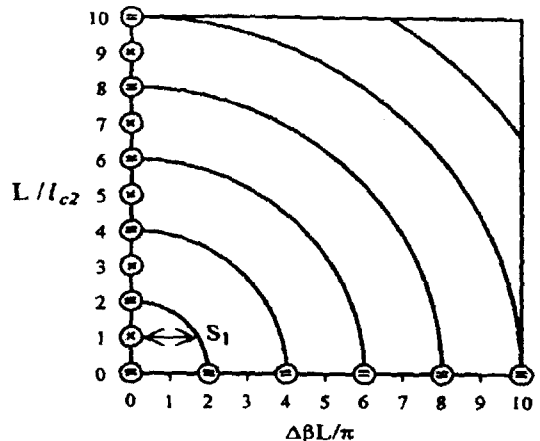


그림 2. 가운데 도파로에 입사, Δβ₁=Δβ₃=Δβ인 경우의 스위칭 다이어그램

Fig. 2. Switching diagram for Δβ₁=Δβ₃=Δβ when center WG is excited.

그림 3은 가운데 도파로의 출력 파워의 변화와 $L=L_c$ 일 때 스위칭 동작을 보여주고 있다.

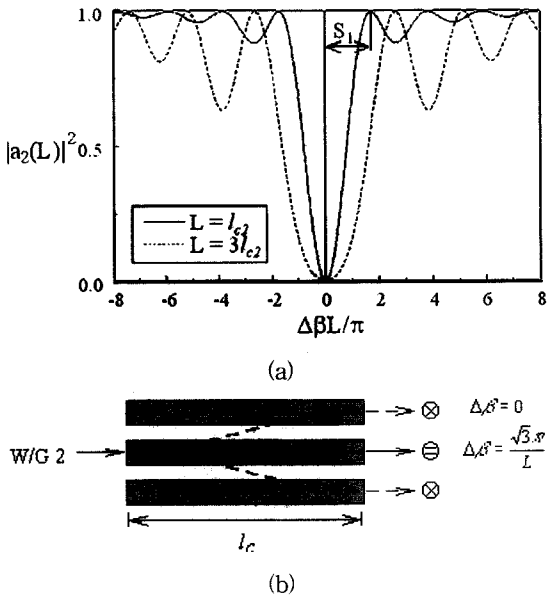


그림 3. $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 인 경우의 스위칭

(a) $|a_2(L)|^2$ vs. $\Delta\beta L/\pi$

(b) $L=L_c (= l_c/\sqrt{2})$

Fig. 3. Switching operation for $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = \Delta\beta$

(a) $|a_2(L)|^2$ vs. $\Delta\beta L/\pi$

(b) $L=L_c (= l_c/\sqrt{2})$

III. Ti:LiNbO₃ 광도파로 및 결합기의 설계

1. 단일모드 광도파로의 설계

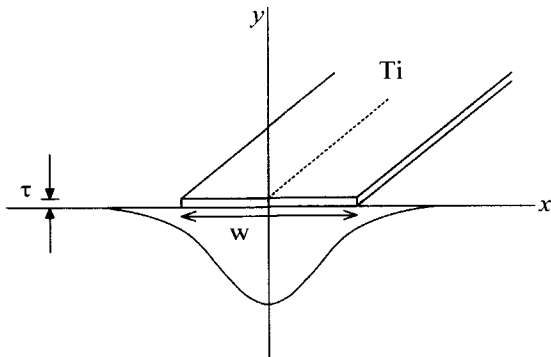


그림 4. Ti:LiNbO₃ 채널형 광도파로 형태

Fig. 4. Ti:LiNbO₃ Channel type optical WG.

그림 4의 채널형 광도파로의 굴절을 분포는 수평방향으로는 Gaussian 함수의 적분형으로, 깊이방향으로는 Gaussian 함수로 가정한다. 확산 재료 Ti가 700Å일 경우, 두께가 확산깊이에 비해 무시할 수 있을 정도로 작고 확산시간이 Ti가 모두 없어지는 시간보다 훨씬 길다면 이러한 가정은 무난하다^[14].

$$\Delta n(x, y) = \Delta n_0 \exp\left[-\left(\frac{y}{d_y}\right)^2\right] \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x + \frac{w}{2}}{d_x}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x - \frac{w}{2}}{d_x}\right) \right] / \operatorname{erf}\left(\frac{w}{2d_x}\right) \quad (16)$$

여기서

$$\Delta n_0 = \frac{dn}{dc} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\tau}{d_y} \operatorname{erf}\left(\frac{w}{2d_x}\right) \quad (17)$$

$$d_x = 2\sqrt{D_x t}, \quad d_y = 2\sqrt{D_y t} \quad (18)$$

$dn/dc=0.764$ 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, 6시간동안 확산시키는 경우 식 (18)에 의해 $d_x=3.2\mu\text{m}$ 이고 $d_y=3.2\mu\text{m}$ 이다^[14].

광통신 소자의 설계에 있어 단일모드 조건을 만족하면서 광의 집속도를 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, V - b 곡선 및 실험을 통하여 단일모드 조건을 만족함을 확인하였다.

2. 가운데 도파로 입사시 세 도파로 결합기의 결합길이

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

대칭 두 도파로 방향성 결합기의 광결합길이는 even 파 odd 모드간의 맥동주기의 반으로 나타낸다.

$$l_c = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o} = \frac{\lambda}{2(N_e - N_o)} \quad (19)$$

여기서 β 는 전파상수를, N 은 mode index를 나타낸다.

가운데 도파로 입사된 세 도파로 방향성 결합기의

결합길이는 식(8)에 의하면 $l_c = l_s / \sqrt{2}$ 이다.

z-cut LiNbO₃ 기판에 1.3 μm 의 TM-mode가 입사되는 경우 Ti 스트립의 폭 5 μm , 두께 700Å, 기판의 굴절율을 $n_s = 2.15$ 로 놓을 때, FEM을 통하여 표 I과 같은 모드 굴절율, 두 도파로 결합길이 l_c 및 세도파로 결합기의 결합길이 l_{c2} 를 얻게된다.

표 1. 방향성 결합기의 결합 길이

Table 1. Coupling length of directional coupler.

W ₁	s	W ₂	Even mode index N_e	Odd mode index N_o	Coupling length	
					l_c	l_{c2}
5 μm	6 μm	5 μm	2.15304	2.15298	9744 μm	6890 μm

S : Ti 내부화산된 도파로간의 간격

표 I의 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 patterning을 하였다. 식각액으로는 Ti etchant (H₂O : HF : HNO₃ = 27 : 1 : 2)를 사용하였다. 그런 다음 1025°C에서 6시간의 Ti 내부화산을 통하여 채널형 광도파로를 제작하였다. 제작된 도파로에 PECVD를 이용하여 1.2 μm 두께의 SiO₂막을 증착하고, 상단에 Al로 전극을 제작하였다. 그리고 도파로 안으로 광을 효율적으로 입사시키기 위해 단면 연마(End Polishing)을 수행하였다. 그림 5은 세 도파로 광스위치의 도파로와 전극의 mask pattern을 나타내는 그림이다.

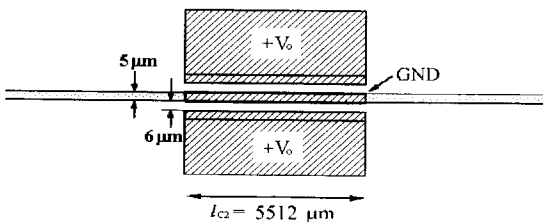


그림 5. 세도파 결합기와 전극 패턴
Fig. 5. Patterns for three-WG and electrode.

설계치의 결합길이는 6890 μm 로 나타났으나, 실제 도파 실험에서는 l_{c2} 의 80%인 5512 μm 에서 스위칭이 비교적 잘 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 도파로 모델링시 $dn/dc = 0.764$ 로 놓은 것에 다소 오차가 있었던

것으로 사료된다.

IV. 광 스위치 특성 측정 및 결과

1. 단일 모드 광도파로의 출력광 패턴

그림 6에는 z-cut Ti:LiNbO₃ 도파로 위에 제작된 전극의 출력단 패턴이 나타나 있다.



그림 6. 제작된 전극의 출력단 패턴
Fig. 6. Fabricated electrode Pattern.

제작된 광도파로의 모드 특성을 측정하기 위한 장치가 그림 7에 도시되어 있다.

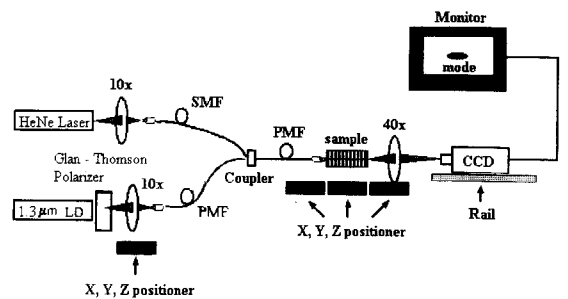


그림 7. 광도파로 특성 측정 장치
Fig. 7. Measurement system for optical W/G characterization.

가시광선 영역인 0.6328 μm 레이저를 이용하여 IR Vidicon 카메라에 나타난 모드를 찾아 정렬시킨 다음, 1.3 μm 레이저 다이오드의 출력광을 PMF(Polarization Maintaining Fiber)를 통하여 광도파로에 결합시킨다. 40배 대물렌즈를 이용하여 광도파로의 출력광의 상이 IR Vidicon 카메라의 검출기 표면에 맺히도록 한다. 광도파로를 지지하고 있는 positioner와 도파로에 입력되

는 fiber ferrule의 tilt를 잘 조정하고, 도파로와 대물렌즈의 거리를 조절하여 도파로에서의 출력광세기가 최대가 되는 결합조건을 얻었다.

그림 8에는 단일 도파로에 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 의 광을 입사시킬 때 IR Vidicon카메라로 잡은 도파로 모드가 나타나 있다.

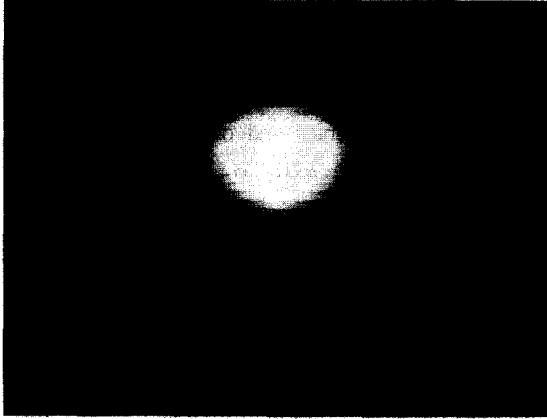


그림 8. $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 입사시 단일 도파로의 near field pattern

Fig. 8. Near field pattern for $\lambda=1.3\mu\text{m}$ input-beam.

2. 광스위칭시의 출력광 모드 패턴 및 스위칭 동작

그림 2에 의하면 첫 번째 광 스위칭이 일어날 조건은 다음과 같다.

$$\Delta\beta \frac{l_{cl}}{\pi} = \sqrt{3} \quad (20)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta\beta &\approx k_n(\delta n) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{2} n^3 r_{33} E \right) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} n^3 r_{33} \left(\Gamma \frac{V_o}{S} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

으로 표현된다. $\delta n = (1/2)n^3 r_{33} E$ 로써 E 는 도파로 1에 유기된 전계의 크기이며 이는 근사적으로 $E = I(V_o/S)$ 로 나타낸다. S 는 두 전극간의 간격이며, I 는 선계와 도파로의 중첩인자이며, 실험 경험에 의하면 0.2~0.3 정도이다. 식 (20)을 식 (21)에 대입해서 정리하면 다음과 같이 전극 길이와 입력 전압 사이의 관계식을 얻을 수 있다.

$$V_o = \frac{\sqrt{3} \lambda \cdot S}{n^3 r_{33} \Gamma l_{cl}} \quad (22)$$

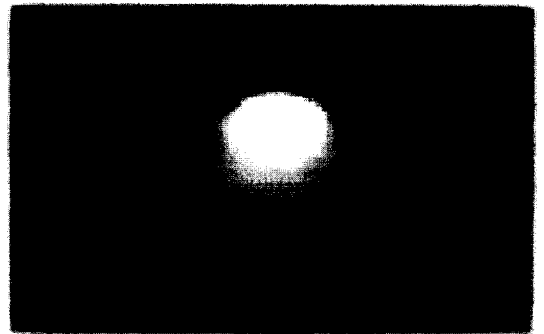
$\Gamma = 0.25$, $S = 6\mu\text{m}$, $l_{cl} = 5512\mu\text{m}$ 를 식 (22)에 대입

하면 $V_o = 32\text{V}$ 정도의 스위칭 전압이 예상된다.

그림 9에는 가운데 도파로 입사, 대칭 detuning 시킬 때 광스위칭의 실험 결과가 보여지고 있다.



(a)



(b)

그림 9. 광 스위칭시 가운데 도파로의 출력광 패턴 (a) $V_o = 0\text{V}$ (b) $V_o = 30\text{V}$

Fig. 9. Output power pattern of center WG at switching.

(a) $V_o = 0\text{V}$ (b) $V_o = 30\text{V}$

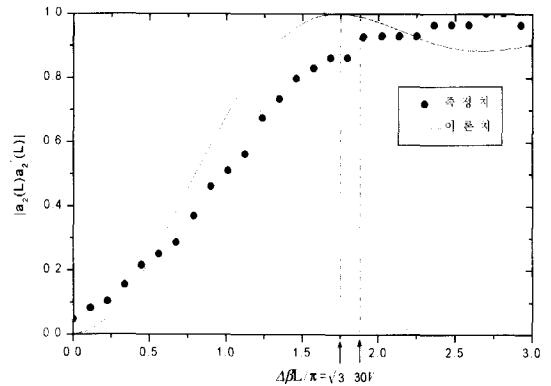


그림 10. 가운데 도파로의 출력 power 패턴

$\Delta\beta L/\pi = 3.0$ 은 실제 인가전압 50V에 해당됨

Fig. 10. output power pattern of center WG.

$\Delta\beta L/\pi = 3.0$ corresponds to the switching voltage of 50 V.

가운데 도파로에 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ 의 광이 입사되었고, 출력광도 가운데 도파로에서 측정되었다. 그림 9(a)는 전압 무인가시 광결합에 의하여 나타난 출력 광세기 패턴이고, 그림 9(b)는 $V_0 = 30\text{V}$ 가 인가되었을 때 나타난 결과이다. 예상전압은 32 V 정도였으며, 실제 스위칭 전압은 30 V로 나타났다. 그림 10에는 가운데 도파로에서 측정된 출력 전력 패턴을 이론치와 비교하여 나타내고 있다

DC 스위칭 작용을 테스트하는데 있어, 전극에 걸어진 인가 전압은 0~50V 사이에서 변화시켜 주었다. 그림 10에서 무인가 전압 시 광 출력은 0이 되어야 함에도 유한 값을 갖는다는 사실은 광결합 길이가 오차를 보이고 있음을 의미한다. 그 결과 실제 스위칭 전압 30 V에서의 스위칭이 다소 불완전하게 나타나고 있으며, 그 이상의 인가 전압에 대해서도 광 출력이 미세하게나마 증가하는 현상이 나타나고 있다. 그러나 경향은 대체적으로 유사성을 띄고 있음을 알 수 있으며 소멸비($= 10 \log P_{on}/P_{off}$)는 약 30dB로 측정되었다.

VII. 결 론

동일한 구조, 등간격을 갖는 세 단일모드 도파로 방향성 결합기로 구성되고 가운데 도파로 입사로 동작되는 광스위치를 제안하였고, 이의 검증을 위하여 소자를 설계, 제작하였다. z-cut LiNbO₃ 기판상에서 Ti를 내부 확산시켜 단일모드 광도파로를 제작하였으며, TM 모드 입사를 위하여 1.2 μm 두께 SiO₂ 완충 박막을 올린 후 CPW 전극을 구성하였다. 가운데 도파로에 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ 의 광이 입사되었으며, 굴절율은 대칭적으로 detuning 시켜가며 광스위칭 현상을 확인하였다. 제안된 이론을 실험으로 검증하였으며, 제작된 광스위치의 스위칭 전압은 30V, 소멸비는 30dB로 측정되었다.

참 고 문 헌

- [1] Herwig Kogelnik, "Switched Directional Couplers with Alternating $\Delta\beta$ ", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-12, no. 7, pp. 396-401, July 1976.
- [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] 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.
- [6] H. Ogiwara, "Optical waveguide 3×3 switch: Theory of tuning and control", *Appl. Opt.*, vol. 18, no. 4, pp. 510-515, Feb. 1979.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 임영준, 김창민, "세 도파로 광스위치의 설계 규칙, *대한전자공학회 논문지*", 제33권 A편, 제6호, pp. 197-205, 1996년 6월
- [12] 김영문, 서정훈, 허창열, 김창민, "바깥도파로 입사된 Ti:LiNbO₃ 세 도파로 광스위치의 설계 및 제작", *대한전자공학회 논문지*", 제36권 D편, 제6

호, pp.539-548, 1999년 6월

- [13] C. M. Kim, and Young Joon Im, "Switching Operations of Three-Waveguide Optical Switches", *IEEE J. Selected Topics Quantum Electronics.*, vol. 6, no. 1, Jan./Feb. 2000.

- [14] 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

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, FEM등 수치해석등임

韓 榮 鐸(正會員)

1972년 12월 24일생. 1998년 2월 서울시립대학교 전자공학과 졸업. 1999년 3월 ~ 현재 동 대학원 전자전기공학부 석사과정. 주관심분야는 도파/집적광학, 광 스위치/변조기, 광통신시스템, FDM, FEM, BPM, SOR등 수치해석등임

金 昌 敏(正會員)

1950년 4월 10일생. 1975년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사. 1982년 2월 동대학원 전자공학과 공학석사. 1989년 8월 U. of Florida Dept. of EE 공학박사. 1983년 5월 ~ 현재 서울시립대학교 전자전기공학부 교수. 주 관심분야는 도파/집적광학, 진행파전극, 진행파전극/고속광변조기, 저분산 광섬유, 광통신시스템, FDM, FEM, BPM, SOR등 수치해석. 현재 서울시립대학교 전자전기공학부 교수