

論文96-33A-6-24

세도파로 광스위치의 설계 규칙

(Design Rules of Three-Waveguide Optical Switches)

任 盈 俊 *, 金 昌 敏 *

(Young Joon Im and Chang Min Kim)

요 약

서로 인접한 세 개의 도파로가 동일한 구조와 등간격을 가질 때, Coupled 모드 이론을 이용하여 네 가지의 광스위칭 현상을 해석하였다. 광이 1) 가운데 도파로 2) 바깥 도파로 각각에 입사된 경우에 대하여 스위칭 현상을 해석하였으며, 각각의 경우에 대해서 인가 전계로 발미암아 세 도파로의 굴절율이 1) 대칭적 2) 반대칭적으로 detuning될 때 광스위칭이 가능한 조건을 도출하였다. 이들 네 가지 경우 중에서 세 가지만이 스위칭이 가능함을 알 수 있었으며, 이를 스위칭 다이어그램으로 나타내었다.

Abstract

Four types of three waveguide optical switches are analyzed by means of the coupled mode theory. Assuming that three proximate waveguides of an optical switch are identical and equally spaced, we examine the switching behavior for both cases where an incident beam is launched into 1) the outer waveguide, 2) the center waveguide. For each beam-launching case, switching voltage is applied so that three waveguides' refractive indices be detuned 1) symmetric, 2) anti-symmetric. It is concluded that only three types of optical switches out of four can perform the switching operation. We derive the switching conditions for each of three possible types and draw the corresponding switching diagrams.

I. 서 론

방향성 결합기는 집적 광학의 초기 단계에서부터 모든 광소자의 필수 불가결한 소자로서 관심을 끌어왔다. 일반적으로 방향성 결합기는 광결합이 일어날 수 있을 만큼 충분히 가까이 위치된 두 개의 도파로로써 구성되어진다. 방향성 결합기는 광 분파기/합파기, 스위칭/변조기 등의 소자로서 이용되어져 왔으며, 다양한 형태와 재료에 대하여 이론과 실험을 통해서 해석되어져 왔다. 제작된 광결합길이는 설계된 값과 차이가 있을 수 있기 때문에 reversed $\Delta\beta$ 방법이 제안되어 졌다.

최근에, 두도파로 방향성 결합기를 대신하는 세도파로 방향성 결합기가 제안되어졌으며^{[1]-[8]}, 세도파로 결합기는 normal 모드^{[1]-[5]} 또는 coupled 모드^{[6]-[7]}로 해석 가능하다.

또한, 세도파로 방향성 결합기에 전극을 올림으로써 능동소자로서 사용되어질 수 있음이 제안되어졌다^{[9]-[11]}. H. Ogiwara는 광도파로 3×3 스위치 설계의 유용성을 증명하였으며^[9], H. A. Haus는 향상된 성능을 가지는 광 sampler를 설계하였다^[10]. S. Ruschin은 세도파로 광스위치 구조에서 바깥 도파로 입사광에 대하여 각 도파로의 굴절율을 대칭적으로 detuning시켜 스위칭 조건을 찾으려 했으나 완전한 조건을 찾지 못하였다^[11]. L. Molter-Orr는 바깥 도파로 입사광에 대하여 굴절율을 반대칭적으로 detuning시킨 경우와 가운데 도파로 입사광에 대하여 굴절율을 대칭적으로 detuning시킨 경우를 해석하였으나 그 결과는 일부 틀

* 正會員, 서울 市立大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Seoul City Univ.)

接受日字: 1996年1月27日, 수정완료일: 1996年5월17日

리고 일부 불완전하다^[12]. R. G. Peall에 의하여 처음으로 세도파로 광스위치가 실험적으로 입증되어졌다^[13].

본 논문에서는 동일한 구조와 등간격으로 이루어진 세도파로 광스위치를 다루었다. 세도파로가 광스위치로서 동작하기 위해서는 도파로 위에 얹은 전극의 전계를 도파로에 가함으로써 세 도파로의 굴절율을 대칭적 또는 반대칭적으로 detuning시킬 필요가 있다. 전형적인 세도파로 광스위치의 구성은 그림 1과 같이 이루어진다.

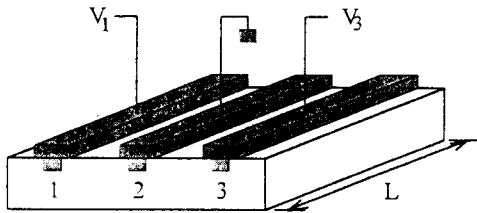


그림 1. z-cut Ti:LiNbO₃ 세도파로 광스위치
Fig. 1. Schematic diagram of z-cut Ti:LiNbO₃ three-W/G optical switch.

스위칭 해석에서 먼저 광이 어느 도파로로 입사하는가에 따라 두 가지 경우로 나누고, 세 도파로의 굴절율이 인가전압에 의하여 대칭 또는 반대칭으로 detuning되는 두 경우로 다시 나누어서 해석을 하였다.

바깥 도파로에 광이 입사되어진 경우에 해석의 결과는 다음과 같다.

- 1) 굴절율을 대칭적으로 detuning시키면 스위칭이 가능한 소자의 길이가 존재하지 않는다.
 - 2) 굴절율을 반대칭적으로 detuning시키면 스위칭이 가능한 소자의 길이가 불연속적으로 존재한다.
- 가운데 도파로에 광이 입사되어진 경우에 해석의 결과는 다음과 같다.
- 3) 굴절율을 대칭적으로 detuning시키면 스위칭이 가능한 소자의 길이가 불연속적으로 존재한다.
 - 4) 굴절율을 반대칭적으로 detuning시키면 스위칭이 가능한 소자의 길이가 연속적으로 존재하며, 이 경우의 스위칭 다이어그램은 reversed $\Delta\beta$ 두도파로 광스위치^[14]와 동일한 형태를 가진다.

스위칭이 가능한 세 가지 경우에 대하여, 스위칭 조건을 찾아내고 스위칭 다이어그램으로 나타내었다.

II. 세도파로 coupled 모드 방정식

이후의 해석은 2-D 구조에서 행하여지며, 이 결과는 실효 굴절율 방법을 이용하여 3-D에도 적용되어질 수 있다.

세도파로 coupled 모드 방정식은 다음과 같이 기술되어진다 [부록].

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} A_1(z) &= -j\kappa_1 A_2(z) e^{j\Delta\beta_1 z} \\ \frac{d}{dz} A_2(z) &= -j\kappa_1 A_1(z) e^{-j\Delta\beta_1 z} - j\kappa_3 A_3(z) e^{-j\Delta\beta_3 z} \\ \frac{d}{dz} A_3(z) &= -j\kappa_3 A_2(z) e^{j\Delta\beta_3 z} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

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

이며, β_i 는 각 도파로의 전파상수이다.

그림 2와 같이 동일한 구조와 등간격을 갖는 세도파로에 대해서 논의하기로 하자.

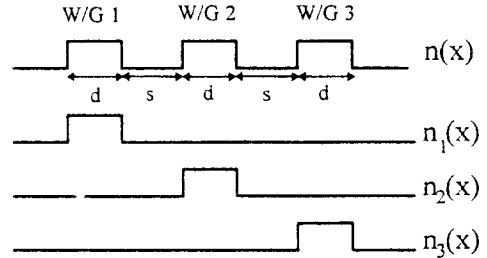


그림 2. 동일 구조와 등간격을 가지는 세도파로의 굴절율 분포
Fig. 2. Index distribution of identical and equally-spaced three waveguides.

세 도파로가 동일한 구조를 가지며, 등간격으로 놓여 있으므로 $\kappa_1 = \kappa_3 = \kappa$ 로 놓는다.

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


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

이제 식 (1)은 다음과 같이되어진다.

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

그림 1에서 보여주는 바와 같이 전극에 의해서 각 도파로에 전계가 가해지면, 그림 2의 전체 굴절율 분포는 전기 광학 효과로 인해 변화가 생긴다. 광스위칭 현상을 해석하기 위해서 다음과 같이 세 가지로 분류하기로 한다. **A)** 전압이 가해지지 않은 경우 : $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = 0$, **B)** 굴절율을 대칭적으로 detuning시킨 경우 : $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = \Delta\beta$, **C)** 굴절율을 반대칭적으로 detuning시킨 경우 : $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$.

A) $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = 0$

( : 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,

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

B) $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = \Delta\beta$

( : 굴절율을 대칭적으로 detuning)

식 (4)의 해는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \end{bmatrix} = e^{-j\frac{\Delta\beta}{2}z} \begin{bmatrix} c_1 + \frac{1}{2} e^{-j\frac{\Delta\beta}{2}z} & c_2 & c_1 - \frac{1}{2} e^{-j\frac{\Delta\beta}{2}z} \\ c_2 & 2c_1 & c_2 \\ c_1 - \frac{1}{2} e^{-j\frac{\Delta\beta}{2}z} & c_2 & c_1 + \frac{1}{2} e^{-j\frac{\Delta\beta}{2}z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(0) \\ a_2(0) \\ a_3(0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{1}{2} \cos x'z - j \frac{\Delta\beta}{4x'} \sin x'z \\ c_2 &= -j \frac{x'}{x'} \sin x'z \\ x'^2 &= \frac{\Delta\beta^2 + 8x^2}{4} \end{aligned} \quad (8)$$

C) $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$

( : 굴절율을 반대칭적으로 detuning)

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

$$\begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + \frac{x^2}{x'^2} & c_2 & c_3 - \frac{x^2}{x'^2} \\ c_2 & 2c_3 + \frac{\Delta\beta^2}{x'^2} & -c_2^* \\ c_3 - \frac{x^2}{x'^2} & -c_2^* & c_1 + \frac{x^2}{x'^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(0) \\ a_2(0) \\ a_3(0) \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} c_1 &= (1 - \frac{x^2}{x'^2}) \cos x'z - j \frac{\Delta\beta}{x'} \sin x'z \\ c_2 &= -j \frac{x'}{x'} \sin x'z + \frac{x\Delta\beta}{x'^2} (\cos x'z - 1) \\ c_3 &= \frac{x^2}{x'^2} \cos x'z \\ x'^2 &= \Delta\beta^2 + 2x^2 \end{aligned} \quad (10)$$

III. 스위칭 I

그림 3에서와 같이 바깥 도파로(도파로 1)에 광을 입사시킨 경우에 어떻게 스위칭이 일어나는가에 대하여 알아보기로 하자.

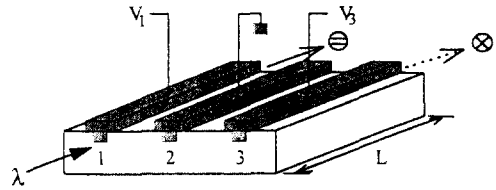


그림 3. 스위칭 I

광이 바깥 도파로에 입사되는 경우


Fig. 3. Switching operation I.

Input beam is launched into the outer W/G.

앞으로는 논의를 용이하게 하기 위하여, 처음 광이 입사된 도파로에서 다른 도파로로 완전히 전달되는 경우를 \otimes 상태로 나타내기로 하고, 광이 입사된 도파로로 다시 출력되는 경우를 \ominus 상태로 나타내기로 하자. 초기 조건은 다음과 같다.

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

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

( : 전압이 가해지지 않은 경우)

이는 전계가 가해지지 않은 경우이며, 식 (5)를 사용하여 해석된다.

1) \otimes 상태

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

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

식 (12)는 다음의 경우에 만족되어진다.

$$L = (2m-1) \frac{\pi}{\sqrt{2x}} = (2m-1)l_{c1}, \quad m=1, 2, \dots \quad (13)$$

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

$$l_{c1} = \frac{\pi}{\sqrt{2x}} = \sqrt{2}l_c \quad (14)$$

식 (14)에서 $l_c (= \pi/2x)$ 는 대칭적인 두도파로 결합기의 결합 길이이다. l_{c1} 의 아래첨자 1은 광이 쏘아진 도파로의 번호를 나타낸다.

2) ⊖ 상태

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

$$a_1 a_1^* = 1, \quad a_2 a_2^* = a_3 a_3^* = 0 \quad \text{at } z=L \quad (15)$$

식 (15)는 다음의 경우에 만족되어진다.

$$L = (2m) \frac{\pi}{\sqrt{2x}} = 2ml_{c1}, \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (16)$$

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

( : 굴절율을 대칭적으로 detuning)

이는 전계가 가해져서 각 도파로 굴절율을 대칭적으로 detuning시킨 경우이며, 이 해석을 위해서 식 (7)이 사용되어진다.

1) ⊗ 상태

이 상태는 식 (12)가 만족되어야 하며, 다음의 두 경우에 대해서 이를 만족한다.

$$\frac{\Delta\beta L}{2\pi} = 2n-1, \quad \frac{\Delta\beta^2 + 8x^2}{4\pi^2} L^2 = (2m)^2, \quad m \geq n \quad (17)$$

$$\frac{\Delta\beta L}{2\pi} = 2n, \quad \frac{\Delta\beta^2 + 8x^2}{4\pi^2} L^2 = (2m-1)^2, \quad m > n \quad (18)$$

여기서, n, m=1, 2, 3, ...

2) ⊖ 상태

식 (15)를 만족해야 하며, 다음의 두 경우에 대해서 이를 만족한다.

$$\frac{\Delta\beta L}{2\pi} = 2n-1, \quad \frac{\Delta\beta^2 + 8x^2}{4\pi^2} L^2 = (2m-1)^2, \quad m > n \quad (19)$$

$$\frac{\Delta\beta L}{2\pi} = 2n, \quad \frac{\Delta\beta^2 + 8x^2}{4\pi^2} L^2 = (2m)^2, \quad m > n \quad (20)$$

여기서, n, m=1, 2, 3, ...

1과 2에서 살펴본 바와 같이 ⊖ 상태와 ⊗ 상태가 존재하지만 동일한 길이에 대해서 ⊖ 상태와 ⊗ 상태

가 함께 존재하지는 않는다. 따라서, 스위칭을 위해 사용하기에는 부적당하다. Ruschin의 논문에서 이미 식 (17)에서 (20)까지를 구한 바가 있으며, 이는 완전한 스위칭이 아닌 거의 스위칭이 일어나는 조건에 해당된다^[11].

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

( : 굴절율을 반대칭적으로 detuning)

이는 전계가 가해짐에 따라 각 도파로의 굴절율을 반대칭적으로 detuning시킨 경우이며, 이 경우에는 식 (9)을 사용하여 해석되어진다.

1) ⊗ 상태

광이 다른 도파로로 완전히 옮겨가기 위해서는 식 (12)가 만족되어야 하는데, 이를 만족하는 해는 존재하지 않는다.

2) ⊖ 상태

⊖ 상태는 식 (15)가 만족되어야 하며, 다음의 해를 얻을 수 있다.

$$\sqrt{\Delta\beta^2 + 2x^2} L = 2m\pi \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (21)$$

식 (21)은 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta\beta L}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{L}{l_{c1}}\right)^2 = (2m)^2 \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (22)$$

그림 4는 식 (13), (16), (22)의 스위칭 조건을 스위칭 다이어그램으로 나타내고 있다.

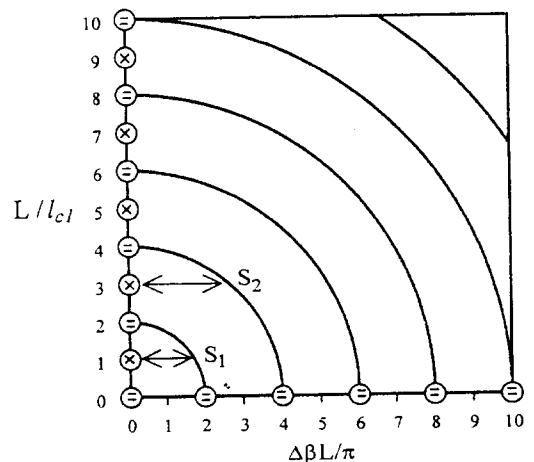
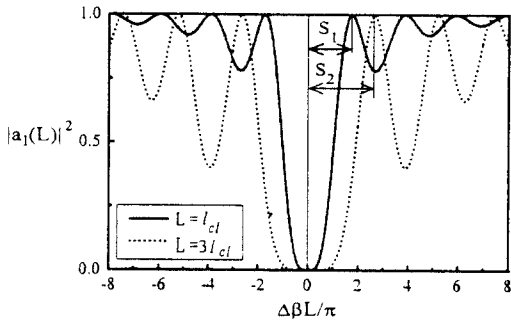


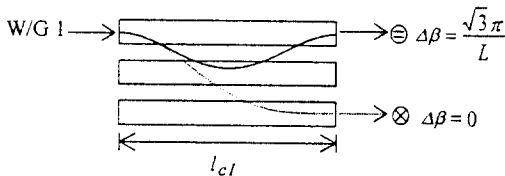
그림 4. 도파로 1에 광을 입사시켰을 때, $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 인 경우의 스위칭 다이어그램

Fig. 4. Switching diagram for $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$, when W/G 1 is excited.

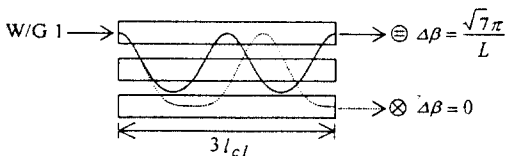
그림 4에서 S_1, S_2 는 스위칭 일어나는 처음 두 경우를 나타내고 있다. 그림 5(a)는 도파로 1의 출력 파워의 변화이며, 그림 5(b), (c)는 각각 $L = l_{cl}, 3l_{cl}$ 일 때 스위칭 동작을 보여주고 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 인 경우 스위칭 (a) $\Delta\beta L/\pi$ 에 대한 $|a_1(L)|^2$, (b) $L=l_{cl}(\sqrt{2}l_c)$, (c) $L=3l_{cl}$

Fig. 5. Switching operation for $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$, $|a_1(L)|^2$ vs. $\Delta\beta L/\pi$ (b) $L=l_{cl}(\sqrt{2}l_c)$, (c) $L=3l_{cl}$.

IV. 스위칭 II

이 장에서는 그림 6에서와 같이 가운데 도파로(도파로 2)에 광을 입사시켰을 때, 어떻게 스위칭 동작이 일어나는지 알아보기로 하겠다.

초기 조건은 다음과 같다.

$$a_1 = 0, \quad a_2 = 1, \quad a_3 = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (23)$$

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

( : 전압이 가해지지 않

은 경우)

전계가 가하여지지 않은 경우이며, 식 (5)가 해석을 위해 사용되어진다.

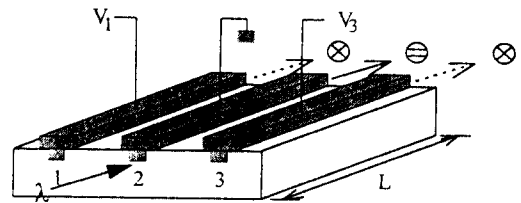


그림 6. 스위칭 II

광이 가운데 도파로에 입사되는 경우

Fig. 6. Switching operation.

Input beam is launched into the center W/G.

1) \otimes 상태

\otimes 상태는 $z=L$ 에서 다음 식을 만족해야 한다.

$$a_1 a_1^* = a_3 a_3^* = \frac{1}{2}, \quad a_2 a_2^* = 0 \quad \text{at } z = L \quad (24)$$

식 (24)는 다음과 같은 경우에 만족되어진다.

$$L = (2m-1) \frac{\pi}{2\sqrt{2}x} = (2m-1)l_{c2} \quad (m=1,2,3,\dots) \quad (25)$$

식 (25)에서 $m=1$ 일 때, 처음으로 \otimes 상태가 되며, 따라서, 결합 길이는 다음과 같다.

$$l_{c2} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}x} = \frac{1}{\sqrt{2}} l_c \quad (26)$$

l_{c2} 의 아래 첨자 "2"는 광이 입사된 도파로의 번호를 나타낸다.

2) \ominus 상태

\ominus 상태는 $z=L$ 에서 다음 식을 만족해야 한다.

$$a_1 a_1^* = a_3 a_3^* = 0, \quad a_2 a_2^* = 1 \quad \text{at } z = L \quad (27)$$

식 (27)은 다음과 같은 경우에 만족되어진다.

$$L = (2m) \frac{\pi}{2\sqrt{2}x} \quad (m=1,2,3,\dots) \quad (28)$$

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

( : 굴절율을 대칭적으로 detuning)

이 경우에 해석을 위해서 식 (7)이 사용되어진다.

1) \otimes 상태

이는 다음의 식을 만족해야 한다.

$$a_1 a_1^* + a_3 a_3^* = 1, \quad a_2 a_2^* = 0 \quad \text{at } z = L \quad (29)$$

이 경우는 만족하는 해가 존재하지 않는다.

2) \ominus 상태

\ominus 상태가 되기 위해서는 다음 식을 만족해야 한다.

$$a_1 a_1^* = a_3 a_3^* = 0, \quad a_2 a_2^* = 1 \quad \text{at } z = L \quad (30)$$

식 (30)을 만족하는 해는 다음과 같다.

$$\frac{\sqrt{\Delta\beta^2 + 8\chi^2}}{2} L = m\pi \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (31)$$

식 (31)은 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{L}{l_{c2}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\beta L}{\pi}\right)^2 = (2m)^2, \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (32)$$

식 (25), (28), (32)의 스위칭 조건을 그림 7의 스위칭 다이어그램으로 나타낼 수 있다.

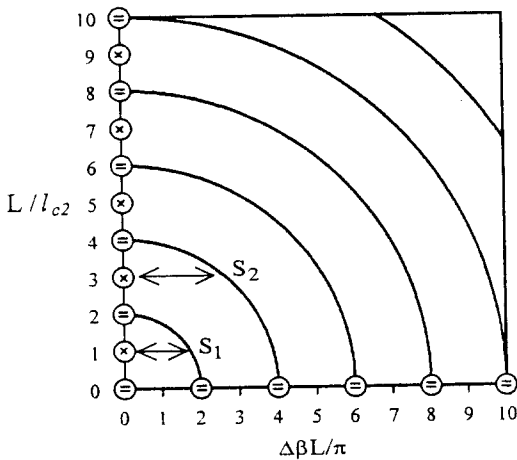
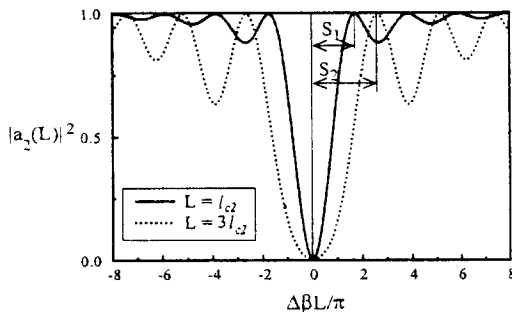
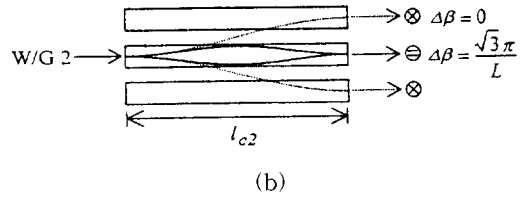


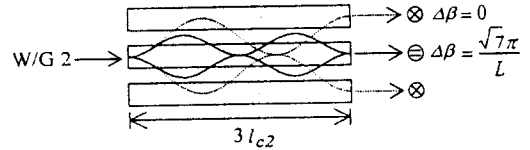
그림 7. 도파로 2에 광을 입사시킬 때, $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 인 경우의 스위칭 다이어그램
Fig. 7. Switching diagram for $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = \Delta\beta$, when W/G 2 is excited.



(a)



(b)



(c)

그림 8. $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 인 경우의 스위칭 (a) $|a_2(L)|^2$ vs. $\Delta\beta L/\pi$, (b) $L = l_{c2} (= l_{c2}/\sqrt{2})$, (c) $L = 3l_{c2}$

Fig. 8. Switching operation for $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_3 = \Delta\beta$ (a) $|a_2(L)|^2$ vs. $\Delta\beta L/\pi$, (b) $L = l_{c2} (= l_{c2}/\sqrt{2})$, (c) $L = 3l_{c2}$

그림 7의 S_1, S_2 는 스위칭이 일어나는 처음 두 경우이며, 그림 8(a)는 도파로 2의 출력 파워의 변화이며, 그림 8(b), (c)는 각각 $L = l_{c2}, 3l_{c2}$ 에 대한 스위칭 동작을 보여주고 있다.

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

(: 굴절율을 반대칭적으로 detuning)

이 경우에 대해서는 해석에 있어서 식 (9)가 필요로 하게 된다.

1) \otimes 상태

식 (29)를 만족해야 하며, 그 해는 다음과 같다.

$$-\frac{\Delta\beta^2}{2\chi^2} = \cos(\sqrt{2\chi^2 + \Delta\beta^2} L) \quad (33)$$

식 (33)은 다음의 형태로 나타낼 수 있다.

$$-\left(\frac{2\Delta\beta L}{\pi}\right)^2 \left(\frac{L}{l_{c2}}\right)^2 = \cos \frac{\pi}{2} \sqrt{\left(\frac{2\Delta\beta L}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{L}{l_{c2}}\right)^2} \quad (34)$$

2) \ominus 상태

\ominus 상태는 식 (30)을 만족해야 한다.

$$\sqrt{\Delta\beta^2 + 2\chi^2} L = 2m\pi \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (35)$$

식 (35)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{2\Delta\beta L}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{L}{l_{c2}}\right)^2 = (4m)^2 \quad (36)$$

도파로 2에 광을 입사시켰을 때, $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 에 대한 스위칭 다이어그램을 식 (25), (28), (34), (36)의 스위칭 조건으로부터 얻을 수 있다. 그림 4와 7의 스위칭 다이어그램에서는 \otimes 상태가 불연속적으로 존재하는 반면에 그림 9의 스위칭 다이어그램에서는 \otimes 상태가 연속적으로 존재하고 있다.

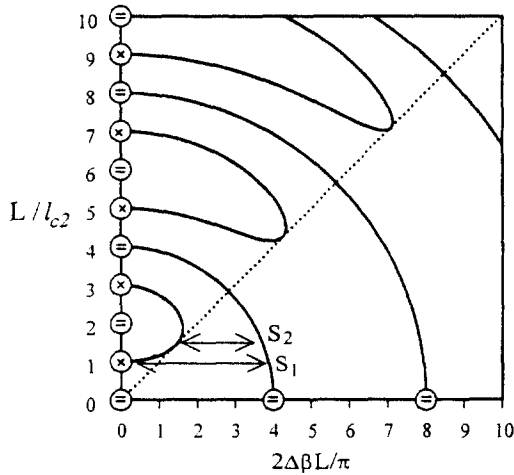
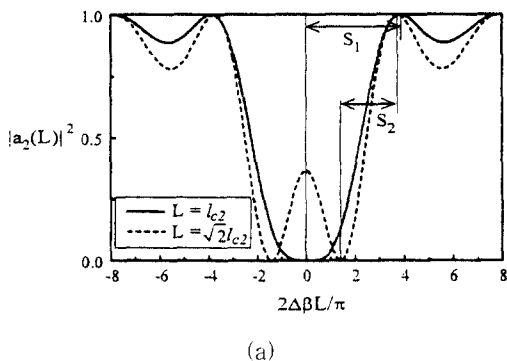
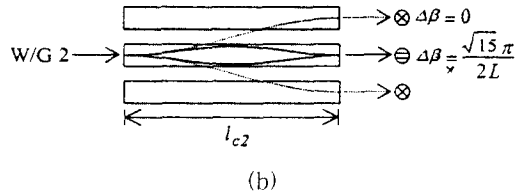


그림 9. 도파로 2에 광을 입사시켰을 때, $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 인 경우 스위칭 다이어그램
Fig. 9. Switching diagram for $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$, when W/G 2 is excited.

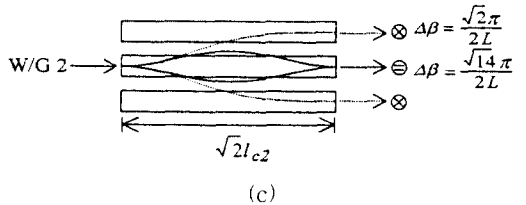
그림 9의 곡선을 reversed $\Delta\beta$ 두도파로 광스위칭 다이어그램과 비교하여 보면, 그 형태가 동일함을 알 수 있다. \otimes 상태가 되도록 하는 전압과 \ominus 상태가 되도록 하는 전압이 항상 존재하므로, 정확한 L/lc_2 가 요구되지 않는다. 다른 파장에서 스위치를 동작시키고자 할 경우 변화된 결합 길이를 필요로 하게 되는데, 단지 공급되어지는 전압을 바꾸어 줌으로써 완전한 스위칭 동작이 가능하다.



(a)



(b)



(c)

그림 10. $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$ 인 경우의 스위칭
(a) $|a_2(L)|^2$ vs. $2\Delta\beta L/\pi$, (b) $L = lc_2$, (c) $L = \sqrt{2}lc_2$
Fig. 10. Switching operation for $\Delta\beta_1 = -\Delta\beta_3 = \Delta\beta$
(a) $|a_2(L)|^2$ vs. $2\Delta\beta L/\pi$, (b) $L = lc_2$, (c) $L = \sqrt{2}lc_2$

그림 9의 스위칭 S_1 는 $L = lc_2$ 의 경우에 해당한다. 스위칭 S_2 는 임의의 L에 대하여 가능하며, 그 예로서 $L = \sqrt{2}lc_2$ 에 대하여 나타내고 있다. 그림 10은 $L = lc_2$ 와 $L = \sqrt{2}lc_2$ 에 대한 도파로 2의 출력 파워의 변화를 보여주고 있다. 또한, 각 도파로의 굴절율이 반대칭적으로 detuning되어짐에도 불구하고, 그림 9의 어떠한 \otimes 상태에 대하여서도 출력 파워는 도파로 1과 도파로 3으로 동일하게 나누어짐을 보여주고 있다.

V. 결론

동일한 구조를 가지고 동일한 간격으로 이루어진 도파로로 구성되어진 세도파로 광스위치를 해석하였다. 광이 입사된 단자에 따라 두 가지로 나누어 해석하였고, 각 경우에 대하여 세도파로 굴절율 분포를 대칭적으로 detuning시킨 경우와 반대칭적으로 detuning시킨 경우로 다시 나누어서 스위칭 동작에 대해서 알아보았다. 스위칭 조건이 모든 경우에 대하여 유도되어졌으며, 각각의 스위칭 다이어그램을 보였다.

- 1) 도파로 1에 광을 입사시키고, 굴절율을 대칭적으로 detuning시킨 경우에 어떠한 소자의 길이에 대해서도 완전한 스위칭이 불가능하다.
- 2) 도파로 1에 광을 입사시키고, 굴절율을 반대칭적으로 detuning시킨 경우에 불연속적인 소자의

길이에 대해서 완전한 스위칭이 가능하다.

- 3) 도파로 2에 광을 입사시키고 굴절율을 대칭적으로 detuning시킨 경우에 불연속적인 소자의 길이에 대해서 완전한 스위칭이 가능하다.
- 4) 도파로 2에 광을 입사시키고 굴절율을 반대칭적으로 detuning시킨 경우에 연속적인 소자의 길이에 대해서 완전한 스위칭이 가능하다. 이 경우의 스위칭 다이어그램은 reversed $\Delta\beta$ 두도파로 광스위치의 스위칭 다이어그램과 같은 형태를 가진다. 따라서, 소자의 길이나 결합길이에 변동이 생기더라도 공급되어지는 전압을 변화시킴으로써 완전한 스위칭 동작이 가능하다.

부 록

세도파로 구조에서의 모드 결합

세도파로 구조에서의 전체 전계는 근사적으로 다음과 같이 표현되어 질 수 있다.

$$E(x) = \sum_{i=1}^3 A_i(z) E_i(x) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (A1)$$

여기서 E_i , A_i , β_i 는 각 도파로의 전계분포, 전계의 크기, 전파상수이다. 위의 식에서 각각의 도파로는 단지 기본 모드만이 전파된다고 가정하였다. 진행파의 상호작용만을 기술한다면, 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.^[15]

$$\frac{d}{dz} A_i(z) e^{j(\omega t - \beta z)} = \frac{j}{4\omega} \frac{\partial}{\partial t} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta P(x, t) E_i(x) dx \quad (A2)$$

여기서,

$$\Delta P(x, t) = e^{j\omega t} \sum_{j=1}^3 A_j(z) E_j(x) (n^2(x) - n_j^2(x)) e^{-j\beta_j z} \quad (A3)$$

ΔP 는 광결합으로 인한 섭동 분극을 나타낸다. 식 (A2)는 다시 다음과 같이된다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} A_i(z) = & -jx_{ij} A_j(z) e^{j(\beta_j - \beta_i)z} - jx_{ik} A_k(z) e^{j(\beta_k - \beta_i)z} \\ & - jM_i A_i(z) \quad (i = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (A4)$$

여기서,

$$x_{ij} = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \int_{-\infty}^{\infty} [n^2(x) - n_j^2(x)] E_i(x) E_j(x) dx, \quad i \neq j \quad (A5)$$

$$M_i = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \int_{-\infty}^{\infty} [n^2(x) - n_i^2(x)] E_i^2(x) dx \quad (A6)$$

이다. 식 (A4)에서 i, j, k는 순차적으로 교환된다.

도파로 1과 도파로 3간의 직접적인 광결합이 없다고 가정하면, $\kappa_{13} = \kappa_{31} = 0$ 으로 놓을 수 있다. 또한, M_1, M_2, M_3 은 광결합이 작은 경우 무시할 만하다. 그리고 $n(x)$ 가 실수인 도파 구조에서는 다음과 같이 놓을 수 있다^[16].

$$x_{12} = x_{21} = x_1 \quad (A7)$$

$$x_{23} = x_{32} = x_3 \quad (A8)$$

따라서, 식 (A4)는 다음과 같이 다시 정리되어 진다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} A_1(z) = & -jx_1 A_2(z) e^{j\Delta\beta_1 z} \\ \frac{d}{dz} A_2(z) = & -jx_1 A_1(z) e^{-j\Delta\beta_1 z} - jx_3 A_3(z) e^{-j\Delta\beta_3 z} \\ \frac{d}{dz} A_3(z) = & -jx_3 A_2(z) e^{j\Delta\beta_3 z} \end{aligned} \quad (A9)$$

여기서,

$$\Delta\beta_1 = \beta_1 - \beta_2 \quad (A10)$$

$$\Delta\beta_3 = \beta_3 - \beta_2$$

이며, $\Delta\beta_1$ 과 $\Delta\beta_3$ 은 도파로 위에 얹은 전극에 의해 변화되어진다.

참 고 문 헌

- [1] J. P. Donnelly, N. L. Demeo, and G. A. Ferrante, "Three-guide 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, July 1986.
- [8] F. D. Pasquale 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. 11, pp. 1120-1128, Nov. 1984.
- [12] L. Molter-Orr and H. A. Haus, "Multiple coupled waveguide switches using alternating $\Delta\beta$ 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] H. Kogelnik and R. V. Schmidt, "Switched directional couplers with alternating $\Delta\beta$," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-12, pp. 396-401, July 1976.
- [15] A. Yariv, "Coupled mode theory for guided wave optics," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-9, no. 9, pp. 919-933, Sep. 1973.
- [16] D. Marcuse, *Light Transmission Optics*. New York: Van Nostrand, 1982.

저 자 소 개



任 盈 俊(正會員)

1971년 3월 25일생. 1995년 2월 서울시립대학교 전자공학과 공학사. 1995년 3월 ~ 현재 동 대학원 전자공학과 석사과정 재학 중. 주관심분야는 도파/집적광학, FDM, FEM, BPM 등 수치해석



金 昌 敏(正會員)

1950년 4월 10일생. 1975년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사. 1982년 2월 동 대학원 전자공학과 공학석사. 1989년 8월 U. of Florida Dept. of EE 공학박사. 1983년 5월 ~ 현재 서울시립대학교 전자전기공학부 부교수. 주관심분야는 도파/집적광학, 진행파전극/고속 광변조기, 저분산 광섬유, 광통신 시스템, FDM, FEM, BPM, SOR 등 수치해석