

論文97-34D-1-7

Input/Output Bending 영역에서의 Parasitic Coupling을 고려한 방향성 결합기 광 스위치의 설계 법칙

(Design Rules of Directional Coupler Optical Switches in Consideration of Parasitic Couplings in the Input/Output Bending Sections)

金 東 珏 * , 金 昌 敏 *

(Dong Gak Kim and Chang Min Kim)

요 약

방향성 결합기의 입/출력부 bending 영역에 존재하는 parasitic coupling의 영향을 고려한 광 스위치의 설계 법칙을 논하였다. Coupled-mode 방정식을 이용하여 bending 영역의 parasitic coupling 현상을 해석하였으며 해를 전달행렬로 표현하였다. 입력부, 주결합부, 출력부를 포함한 전체 전달 행렬을 구하였으며, parasitic coupling이 방향성 결합기 광 스위치의 설계에 미치는 영향을 살펴보았다. Parasitic coupling의 세기에 따른 광 결합길이의 보정치와 인가전압의 보정치를 구하였으며, 그 결과를 스위칭 다이어그램을 통하여 나타내었다. 바람직한 crosstalk를 얻기 위해서는 parallel 영역의 길이는 입/출력부의 parasitic coupling의 영향에 따라 결합길이 $l_c (= \pi/2 \kappa_0)$ 보다 작아지도록 보정되어야 함을 밝혔다. 그러나, weak parasitic coupling의 경우에는 스위칭 전압은 변화될 필요없이, parasitic coupling을 고려하지 않은 경우와 동일한 전압값을 유지함을 알 수 있다.

Abstract

Design rules of directional coupler optical switches are discussed in consideration of parasitic couplings in the bending sections. The parasitic coupling phenomenon is analyzed based on the coupled-mode theory and the solutions are represented in the form of the transfer matrix. The modified switching conditions due to the parasitic coupling are derived and the resultant switching diagrams are illustrated. It is revealed that the parallel section's length needs to be adjusted less than the coupling length $l_c (= \pi/2 \kappa_0)$ to obtain the desired crosstalk and that the adjustment depends on the strength of the parasitic coupling. However, it is discovered that, for weak parasitic coupling, the switching voltage does not need to be altered but may maintain the same value as if no parasitic coupling is taken into account.

I. 서 론

방향성 결합기는 광 IC의 기본적 구성요소로서 크게 주목 받아왔다. 이는 coupling이 존재할 수 있는 정도

로 떨어진 평행한 두 도파로로 구성되어지며, 다양한 구조와 재료에 의해 power 분배/결합기, 스위치/변조 기로써 응용되고 있다. 방향성 결합기는 제작된 소자의 광 결합길이가 이상적인 광 결합길이와 같지 않은 경우 소자의 소멸비가 나빠지는 문제가 있다. 이를 극복하기 위하여 교번 $\Delta\beta$ 방향성 결합기가 제안되었다^[1]. 대부분의 방향성 결합기는 주결합부가 parallel한 두 도파로로 구성되어 있고, 입/출력부는 두 도파로 간격

* 正會員, 서울시立大學校 電子工學科

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

接受日字: 1996年8月8日, 수정완료일: 1996年11月25日

이 점진적으로 변하는 non-parallel한 구조 즉, bending 영역으로 구성되어 진다. 이따금 주결합부가 non-parallel한 구조를 분파기^[2], 방향성 결합기^[3], 필터^[4] 등의 용도로써 제안된 경우도 있었다. Non-parallel한 두 도파구조가 주결합부의 용도로 쓰이던^[3] [4], 혹은 parallel 방향성 결합기의 bending 영역으로 쓰이던^[5] [6] 이들의 해석은 모두 coupled-mode 이론에 의하여 이루어져 왔다.

주결합부가 parallel 구조를 갖는 방향성 결합기를 설계할 때 대부분 입/출력부의 bending 영역에서 발생하는 parasitic coupling은 무시하고, 주결합부의 이상적인 결합길이를만 관심의 대상으로 삼아 왔다. 그러나 입/출력부에서 발생하는 parasitic coupling은 소자 구성상 피할 수 없는 현상이며, 이는 소자의 소멸비를 악화시키는 요인이 된다. 따라서 입/출력부의 parasitic coupling의 크기를 미리 고려하여 이상적인 결합길이를 보정하는 것은 소자의 소멸비를 크게 끌어올리는 바람직한 방안이다.

본 연구에서는 non-parallel한 두 도파로가 방향성 결합기의 입/출력부 bending 영역을 형성할 때, 이 영역에서 발생하는 parasitic coupling현상을 해석하고 이 parasitic coupling이 방향성 결합기 광 스위치의 성능에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 해석은 coupled-mode 방정식을 바탕으로 하고, 입/출력부, 주결합부 각 영역에서의 해를 전달행렬을 통하여 표현하였다. Bending 부위에서 radiation loss가 없다는 가정 하에, 입/출력부의 bending 각도에 따른 parasitic coupling의 양을 검토하였다. Parasitic coupling의 정도에 따른 주결합부의 광 결합길이의 보정치에 대하여 살펴보았으며, 광 결합길이의 보정에 따른 인가 전압의 보정치도 다루었다.

II. Parasitic Coupling

방향성 결합기의 입/출력부는 서서히 벌어지는 두 도파로로 구성되며, 이 영역에서의 parasitic coupling에 의한 power 전달은 광 스위치 성능에 영향을 미치게 된다.

1. 출력부의 Parasitic Coupling

방향성 결합기의 출력부는 그림 1에서 보듯이 bending 손실을 줄이기 위하여 두 도파로 사이의 거리가

점진적으로 변화하는 형태를 갖는다. 그림 1(a)는 출력단이 선형적으로 변화하는 경우이고, 그림 1(b)는 s-curve 형태로 변화하는 경우이다. 그림 1(b)의 구조는 $z=0, L_{out}$ 에서 미분이 0 이므로 smooth transition을 가지며, bending으로 말미암은 radiation loss를 극소화할 수 있는 구조이다. 두 경우 모두 parasitic coupling 현상을 설명하는데 좋은 예가 될 수 있다.

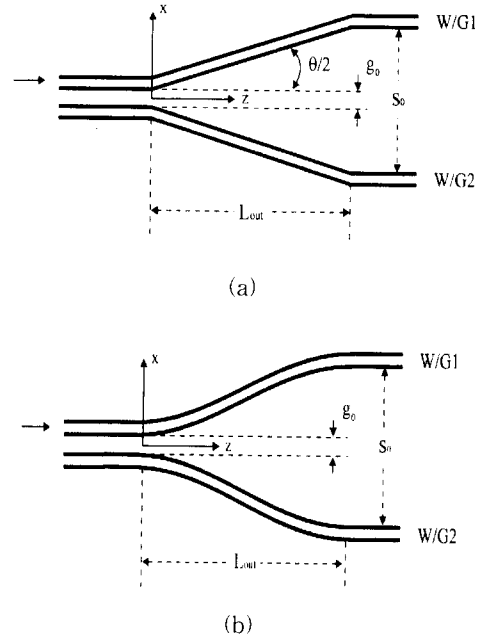


그림 1. 대칭구조를 갖는 방향성 결합기의 출력부
(a) linear 구조, $g(z) = g_0 + 2\tan(\theta/2)z$
(b) s-curved 구조, $g(z) = g_0 + (s_0 - g_0)\sin^2(\pi z/2L_{out})$

Fig. 1. Output section of a symmetric directional coupler.

(a) linear, $g(z) = g_0 + 2\tan(\theta/2)z$
(b) s-curved, $g(z) = g_0 + (s_0 - g_0)\sin^2(\pi z/2L_{out})$

본 논문에서는 편의상 그림 1(a)의 선형 구조에 대하여 해석을 진행하고자 한다. 동일 방향으로 전파할 경우에 coupled mode 방정식은 다음과 같다.^[3]

$$\frac{dA(z)}{dz} = -j\kappa_{12}(z)B(z)e^{-j\Delta\beta z} \quad (1a)$$

$$\frac{dB(z)}{dz} = -j\kappa_{21}(z)A(z)e^{j\Delta\beta z} \quad (1b)$$

여기서

$$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 \quad (2)$$

이다. $A(z)$ 와 $B(z)$ 는 각각 도파로 1과 2($W/G1$, $W/G2$)의 전계의 정규화 mode 진폭이며, $\kappa_{12}(z)$ 와 $\kappa_{21}(z)$ 는 결합계수이다. 도파로 1과 2는 동일한 구조이며 단일모드만을 허용한다고 가정한다. β 는 각 도파로의 전파상수이며 무손실을 가정한다.

다음의 치환을 사용하여

$$A(z) = R(z) \exp(-j\delta z), \quad B(z) = S(z) \exp(j\delta z) \quad (3)$$

라 놓으면 식 (1)은 다음과 같이된다.

$$\frac{dR}{dz} - j\delta R = -j\kappa_{12}S \quad (4a)$$

$$\frac{dS}{dz} + j\delta S = -j\kappa_{21}R \quad (4b)$$

여기서

$$\delta = \frac{(\beta_2 - \beta_1)}{2} = \frac{\Delta\beta}{2} \quad (5)$$

이다. 도파로 1과 2가 동일한 구조이고 손실이 없는 경우를 가정하였으므로, $\delta = 0$, $\kappa_{12}(z) = \kappa_{21}(z) = \kappa(z)$ 이 된다^[7]. 이 경우에 식 (4)의 해는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} R(z) \\ S(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi(z) & -j \sin \psi(z) \\ -j \sin \psi(z) & \cos \psi(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(0) \\ S(0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서

$$\psi(z) = \int_0^z \kappa(z) dz \quad (7)$$

이며, ψ 를 위상각으로 부르기로 한다.

그림 1(a)는 slab 도파로로 구성된 방향성 결합기의 출력부의 치수 파라미터를 보이고 있다. 각 도파로는 step-index를 갖는 단일모드 도파로이며, 두 도파로는 쌍둥이 도파로이다. 따라서 각 도파로의 전파상수 β_1 과 β_2 는 동일한 값을 갖게 되고, 즉 $\Delta\beta = 0$ 이고, 결합계수 $\kappa(z)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[8].

$$\kappa(z) = \frac{2k^2 p e^{-p\kappa(z)}}{\beta \left(d + \frac{2}{p} \right) (k^2 + p^2)} \quad (8)$$

여기서 $g(z)$ 는 임의의 z 에서의 두 도파로의 사이거리 (gap)이며, d 는 도파로 폭이다. 또한 β 와 h 는 각각 z 방향과 x 방향의 전파상수이고, p 는 evanescent field

의 감쇠 상수이다. n_2 가 core의 굴절율이고, n_1 이 clad의 굴절율일 때, h 와 p 는 TE모드의 경우에 다음과 같다.

$$h = \sqrt{n_2^2 k_0^2 - \beta^2} \quad (9a)$$

$$p = \sqrt{\beta^2 - n_1^2 k_0^2} \quad (9b)$$

그림 1(a)의 출력부에서의 인접한 두 도파로의 사이거리 $g(z)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(z) = g_0 + 2 \tan(\theta/2) z \quad (10)$$

여기서 g_0 는 주결합부에서 두 도파로간의 gap이다. 식 (8), (10)을 식 (7)에 대입하면, 방향성 결합기의 출력부에 대한 위상각은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi_{out} &= \int_0^{L_{out}} \kappa(z) dz = \kappa_0 \int_0^{L_{out}} e^{-2p \tan(\theta/2) z} dz \\ &= \frac{\kappa_0}{2p \tan(\theta/2)} (1 - e^{-2p \tan(\theta/2) L_{out}}) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$\kappa_0 = \frac{2k^2 p e^{-p\kappa_0}}{\beta \left(d + \frac{2}{p} \right) (k^2 + p^2)} \quad (12)$$

이다. κ_0 는 주결합부의 결합계수이고, $\theta/2$ 는 bending 각도이다.

도파로 1에 광을 입사시키고 즉, $A(0)=1.0$, $B(0)=0.0$ 으로 놓고 식 (6)을 이용하면 도파로 2에 전달되는 power를 구할 수 있다.

$$P_{trans} = \sin^2 \psi_{out} \quad (13)$$

그림 2는 전파거리에 따라 도파로 1로부터 도파로 2로 이행되는 power를 보였다. 그림 2에는 bending angle $\theta/2$ 에 따른 두 도파로 사이의 에너지 이동을 나타내고 있다. i) $\theta/2=0.0^\circ$ 일 때는 이상적인 방향성 결합기로서 동작하며, l_c 의 정수배의 거리를 주기로 power가 두 도파로 사이를 오가고 있다. ii) $\theta/2$ 가 미세하게 증가하면 beat는 있되 그 주기는 점점 멀어지고 있다. iii) Strong parasitic coupling 영역에서는 beat 주기가 사라지고 한 도파로로 에너지가 일단 이전되면 그곳에 머무는 것을 관찰할 수 있다. iv) $\theta/2$ 가 실제 입/출력부의 bending에 사용되는 각도인 parasitic coupling 영역에서는 방향성 결합이 일어나는 대신 미량의 에너지가 이전되는 것을 볼 수 있다.

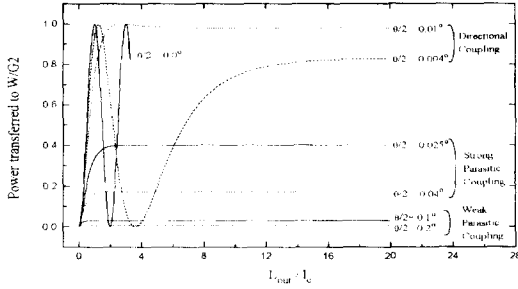


그림 2. 광이 W/G1에 입사 될 때 전파거리에 따라 W/G2에 전달되는 power $s_0=6\mu\text{m}$, $d=5\mu\text{m}$, $n_1=2.20$, $n_2=2.203$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $\kappa_0 = 0.256/\text{mm}$, $l_c = 6.116\text{mm}$
 Fig. 2. Transferred power to the W/G2 along the propagation $s_0=6\mu\text{m}$, $d=5\mu\text{m}$, $n_1=2.20$, $n_2=2.203$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $\kappa_0 = 0.256/\text{mm}$, $l_c = 6.116\text{mm}$.

본 논문에서는 parasitic coupling 영역에 관심을 두고 있다. 왜냐하면 입/출력단에서 나타나는 미량의 이 전된 에너지는 방향성 결합기의 소멸비 성능을 결정짓는 요인이기 때문이다. 특히 parasitic coupling의 양은 입/출력부의 길이가 광 결합길이 l_c 보다 충분히 길 때는 거의 상수가 된다는 점을 유의하도록 한다.

2. 입력부의 Parasitic Coupling

그림 3에서는 slab 도파로로 구성된 방향성 결합기의 입력부가 그려져 있다. 이제 parasitic coupling에 의해 전달되는 power를 살펴보고자 한다.

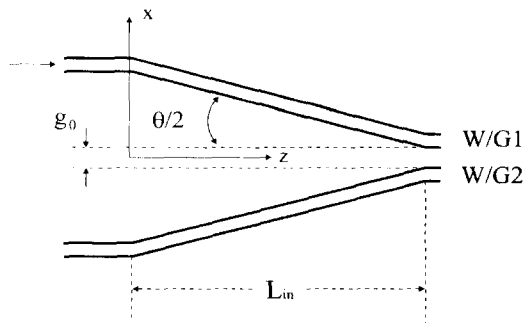


그림 3. 방향성 결합기의 입력부
 Fig. 3. Input section of a directional coupler.

입력부에서의 인접한 두 도파로의 사이거리 $g(z)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(z) = g_0 - 2\tan(\theta/2)(z - L_{in}) \quad (14)$$

따라서 $\kappa(z)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\kappa(z) = \kappa_0 e^{2p\tan(\theta/2)(z - L_{in})} \quad (15)$$

여기서 κ_0 는 주결합부의 결합계수로 식 (12)의 κ_0 와 동일하다. 식 (15)를 식 (7)에 대입하면 방향성 결합기의 입력부에 대한 위상각은 다음과 같이된다.

$$\begin{aligned} \psi_{in} &= \kappa_0 \int_0^{L_{in}} e^{2p\tan(\theta/2)(z - L_{in})} dz \\ &= \frac{\kappa_0}{2p\tan(\theta/2)} (1 - e^{-2p\tan(\theta/2)L_{in}}) \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)은 식 (11)과 동일한 결과이다. 따라서 입력부와 출력부가 symmetric 할 때 입력부에서의 energy coupling 현상은 출력부와 동일함을 알 수 있다.

3. Main Coupling 영역의 결합길이 보정

방향성 결합기에서 실질적인 power 전달은 main coupling 영역에서의 coupling에 의한 power 전달 외에, 입/출력부에서 존재하는 parasitic coupling에 의한 power 전달을 고려해야 한다. 입/출력부와 주결합부를 포함한 전체 방향성 결합기에서 도파로 2에 전달되는 광 power를 식 (6)을 이용하여 살펴보고자 한다. 그림 4에는 입력부와 출력부가 동일한 구조를 가지며 평행한 두 도파로가 동일한 구조를 갖는 방향성 결합기가 그려져 있다.

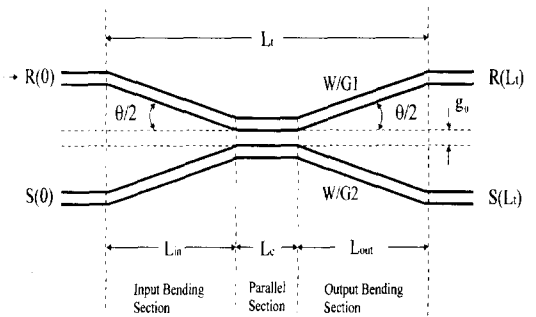


그림 4. 방향성 결합기 입력부와 출력부는 동일한 구조로 가정, $L_{in} = L_{out}$, L_c : 결합영역의 소자길이
 Fig. 4. Symmetric directional coupler with identical input and output sections, L_c : Length of a parallel section.

그림 4와 같은 대칭형 구조의 방향성 결합기의 도파로 1에서 도파로 2로 전달되는 power P_{trans} 는 다음과 같다.

$$P_{trans} = S(L_t)S^*(L_t) = \sin^2 \psi_t \quad (17)$$

여기서

$$\psi_t = \int_0^{L_{in}} \kappa(z) dz + \int_0^{L_c} \kappa_0 dz + \int_0^{L_{out}} \kappa(z) dz \quad (18)$$

이다. 총 위상각 ψ_t 를 입/출력부와 주결합부 영역으로 나누어 적분하면 다음과 같다.

$$\psi_t = \kappa_0 L_c + 2\psi_b \quad (19)$$

여기서

$$\psi_b = \psi_{in} = \psi_{out} \quad (20)$$

이다. Parasitic coupling을 무시한 경우에 완전 광 결합이 이루어지기 위해서는 주결합부 영역의 위상각 $\kappa_0 L_c$ 가 $(2n+1)\pi/2$ 의 값을 갖는다. 그러나 현실적으로 입/출력 bending 영역에서의 coupling은 존재하며, 이로 인해 $(2n+1)\pi/2$ 로부터 벗어나 오차가 발생된다. 따라서 parasitic coupling을 고려한 전체 위상각 ψ_t 가 $(2n+1)\pi/2$ 의 값을 갖도록 L_c 는 보정되어야 한다. 소자 설계시 채택되는 위상각은 대부분 $\pi/2$ ($n=0$)이므로 $\psi_t = \pi/2$ 을 대상으로 살펴보기로 한다.

$$\text{Parasitic coupling 고려시: } \kappa_0 L_c + 2\psi_b = \frac{\pi}{2} \quad (21a)$$

$$\text{No parasitic coupling 시: } \kappa_0 L_c = \frac{\pi}{2} (\psi_b = 0) \quad (21b)$$

l_c 는 parasitic coupling이 없는 경우($\psi_b=0$)의 이상적인 결합길이이다. 현실적으로 parasitic coupling은 존재하므로 L_c 는 다음과 같이 보정되어야 한다.

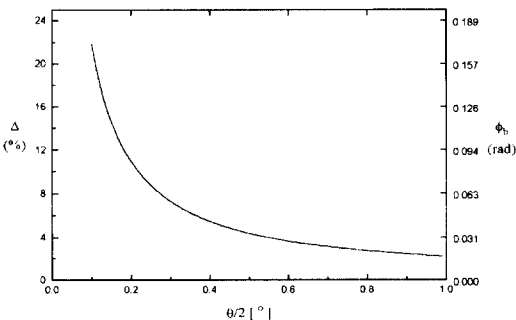


그림 5. $L_{out} = L_{in} = 20 l_c$ 에서 $\theta/2$ 에 대한 Δ 와 ψ_b 의 변화. $g_0=6\mu\text{m}$, $d=5\mu\text{m}$, $n_1=2.20$, $n_2=2.203$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $\kappa_0 = 0.256/\text{mm}$, $l_c = 6.116\text{mm}$

Fig. 5. Δ and ψ_b as a function of $\theta/2$ for $L_{out} = L_{in} = 20 l_c$ $g_0=6\mu\text{m}$, $d=5\mu\text{m}$, $n_1=2.20$, $n_2=2.203$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $\kappa_0 = 0.256/\text{mm}$, $l_c = 6.116\text{mm}$.

$$L_c = l_c (1 - \Delta) \quad (22)$$

여기서

$$\Delta = \frac{4\psi_b}{\pi} \quad (23)$$

이다. Δ 는 결합길이의 정규화 보정치이다. 식 (11), (16) 등에 의하여 ψ_b 즉 Δ 값을 구하면, 식 (22)에 의해 광 결합길이 l_c 로부터 보정된 결합길이를 얻을 수 있다. 그림 5에는 한 slab 도파로를 예로 들어 입/출력부의 bending 각도 $\theta/2$ 에 따른 parasitic coupling의 양 ψ_b , 그리고 결합길이의 보정치 Δ 의 관계가 그려져 있다.

III. 스위칭 조건

방향성 결합기 광 스위치에 대한 기존의 스위칭 해석은 모두가 입/출력 bending 영역의 parasitic coupling을 고려하지 않은 경우이다. 본 장에서는 방향성 결합기 광 스위치를 입력부와 주결합부, 그리고 출력부로 나누어 전달행렬을 구하고 이를 이용하여 입/출력부의 parasitic coupling을 고려한 스위칭 조건을 해석하였다. 그림 6에는 방향성 결합기 광 스위치의 그림이 있으며, 광 스위칭을 일으키는 전극은 주결합부에 놓여 있다.

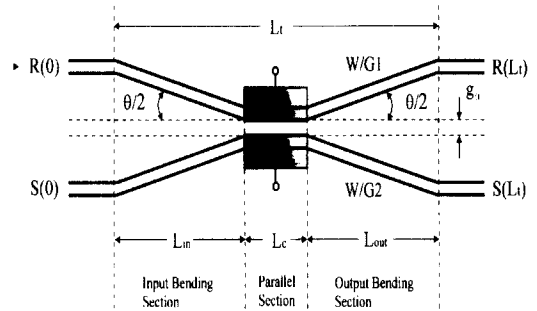


그림 6. 방향성 결합기 광 스위치
Fig. 6. Schematic diagram of directional coupler optical switch.

도파로 1과 2가 쌍둥이 도파로이고 손실이 없는 즉, $\Delta\beta = 0$, $\kappa_{12}(z) = \kappa_{21}(z) = \kappa(z)$ 인 경우, 입/출력부에서의 전달행렬 $[I]$, $[O]$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[I] = [O] = \begin{bmatrix} \cos \psi_b & -j \sin \psi_b \\ -j \sin \psi_b & \cos \psi_b \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서 ϕ_b 는 식 (16)또는 (20)과 동일하다.

방향성 결합기의 main coupling section에 대한 전달 행렬 [M]은 식 (4)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos \kappa' L_c + j \frac{\delta}{\kappa} \sin \kappa' L_c & -j \frac{\kappa_0}{\kappa} \sin \kappa' L_c \\ -j \frac{\kappa_0}{\kappa} \sin \kappa' L_c & \cos \kappa' L_c - j \frac{\delta}{\kappa} \sin \kappa' L_c \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기서

$$\kappa'^2 = \kappa_0^2 + \delta^2 \quad (26)$$

이다.

방향성 결합기 광 스위치에 대한 전체 전달행렬 [T]는 위에서 구한 세 행렬의 곱으로 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} R(L_c) \\ S(L_c) \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} R(0) \\ S(0) \end{bmatrix} \quad (27)$$

여기서

$$[T] = [O][M][I] = \begin{bmatrix} c_1 & -jc_2 \\ -jc_2 & c_1^* \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$c_1 = \cos \kappa' L_c \cos 2\phi_b - \frac{\kappa_0}{\kappa} \sin \kappa' L_c \sin 2\phi_b - j \frac{\delta}{\kappa} \sin \kappa' L_c \quad (29a)$$

$$c_2 = \frac{\kappa_0}{\kappa} \sin \kappa' L_c \cos 2\phi_b + \cos \kappa' L_c \sin 2\phi_b \quad (29b)$$

이다. 전체 전달행렬 [T]는 unitary matrix 이며 이는 lossless system 을 의미한다. 이 결과는 입/출력부의 bent point에서의 radiation loss를 0 으로 가정하였음에 기인하고 있다.

도파로 1로 광을 입사하였을 때 즉, $R(0) = 1.0$, $S(0) = 0.0$ 에 대해 스위칭 조건을 살펴보기로 한다. 논의를 용이하게 하기 위하여 광이 한 도파로에서 다른 도파로로 완전히 전달되었을 때 스위칭 상태를 \otimes 로 표기하기로 한다. 또한 동일한 도파로의 출력단에서 광이 검출되는 상태를 \ominus 로 표기한다. 식 (27)로부터 스위칭 조건은 다음과 같다.

$$\otimes : |c_1| = 0 \quad (30)$$

$$\ominus : |c_2| = 0 \quad (31)$$

달리 표현하면,

$$\otimes : \delta = 0, \kappa_0 L_c + 2\phi_b = (2n+1)\frac{\pi}{2}, (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (32)$$

$$\ominus : \frac{\kappa_0}{\sqrt{\kappa_0^2 + \delta^2}} \tan \sqrt{\kappa_0^2 + \delta^2} L_c = -\tan 2\phi_b \quad (33)$$

와 같다. 이제 다음과 같은 변수를 도입하기로 한다.

$$x = \frac{2\delta L_c}{\pi}, \quad y = \frac{L_c}{l_c} \quad (34)$$

여기서 x와 y는 각각 정규화 전압과 정규화 결합길이라 불린다. 식 (32), (33)을 x와 y를 이용하여 표현하면 다음과 같이된다.

$$\otimes : x = 0, y = (2n + 1) - \Delta, (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (35)$$

$$\ominus : \sqrt{\frac{y}{y^2 + x^2}} \tan \frac{\pi}{2} \sqrt{y^2 + x^2} = -\tan \frac{\pi \Delta}{2} \quad (36)$$

여기서 Δ 는 식 (23)에서 정의된 결합길이의 정규화 보정치이다. 그림 5에서 입/출력부의 bending각도 $\theta/2$ 가 작아짐에 따라 Δ 가 증가함을 유의한다. 식 (35), (36)에서 실용적인 경우인 $n=0$ 에 대하여 스위칭 다이어그램을 살펴보기로 하겠다.

1. Weak Parasitic Coupling

그림 7에는 종래의 parasitic coupling을 무시한 경우 ($\Delta=0.0$)를 기준으로 하여 몇 개의 weak parasitic coupling에 대한 스위칭 curve가 그려져 있다.

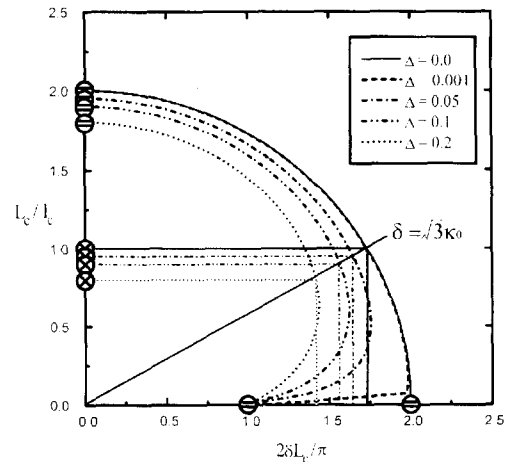


그림 7. Weak Parasitic Coupling 경우 스위칭 다이어그램 ($n=0$) 정규화 보정치 Δ 의 변화에 따른 \otimes 및 \ominus 상태의 변화

Fig. 7. Switching diagram for weak parasitic coupling The \otimes and \ominus states with the parameter of Δ .

Δ 가 증가(parasitic coupling이 증가)함에 따라서 \otimes 상태와 \ominus 상태의 만나는 점의 (x, y) 가 원점방향으로 선형적으로 작아지고 있음을 알 수 있다.

Δ 가 작은 값을 갖는 경우 식 (35), (36)은 다음의 간결한 식으로 대체될 수 있다.

$$\otimes: x = 0, y = 1 - \Delta \quad (37)$$

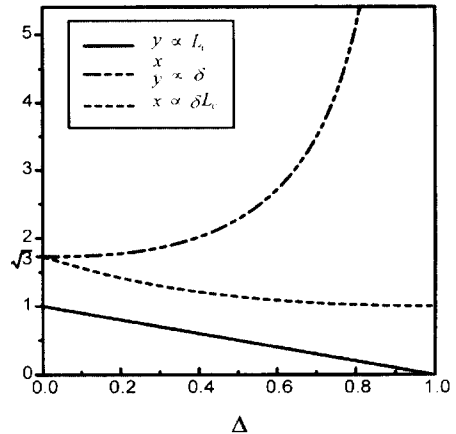
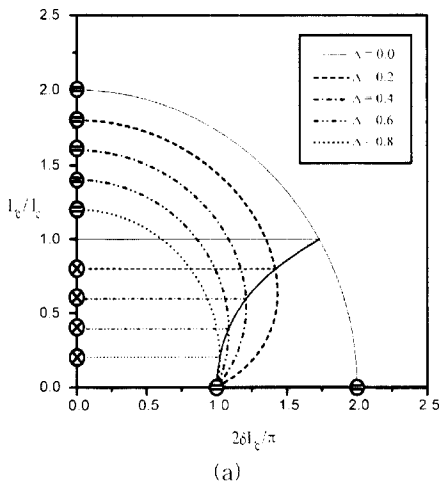
$$\ominus: x = \sqrt{3}(1-\Delta), y = (1-\Delta) \quad (38)$$

$y = 1 - \Delta, y = x/\sqrt{3}$ 을 식 (36)에 대입하고 Taylor 급수를 전개하면 좌변=우변이 성립함을 알 수 있다. Δ 가 작은 값을 가질 경우 \otimes 상태와 \ominus 상태의 해는 식 (37), (38)로부터 가능하다.

요약하면 bending 각도가 작아질수록 parasitic coupling의 양이 많아지며 따라서 보정치 Δ 는 커진다. 식 (37), (38)로부터 Δ 가 커지면 주결합부의 길이 L_c 는 작아지나, 인가전압 δ 는 보정치와 거의 동일한 값을 갖게 된다. 그 이유는 그림 7에서 보는 바와 같이 L_c/l_c 와 $2\delta L_c/\pi$ 이 $y = x/\sqrt{3}$ ($\delta = \sqrt{3}\kappa_0$)의 slope로 동시에 줄어들고 있기 때문이며, 따라서 인가전압과 관련된 parameter δ 는 Δ 에 관계없이 거의 상수를 유지하게 된다.

2. Strong Parasitic Coupling

그림 8(a)에는 몇 개의 strong parasitic coupling에 대한 switching curve가 그려져 있다. Weak parasitic coupling의 경우와 달리 \otimes 상태와 \ominus 상태의 만나는 점 즉, switching state는 $(1, 0)$ 를 향하여 curve를 그리고 있다.



(b)

그림 8. Strong Parasitic Coupling 경우 스위칭 다이어그램(n=0) (a) 정규화 보정치 Δ 의 변화에 따른 \otimes 및 \ominus 상태의 변화 (b) Δ 에 따른 x, y 및 (x/y) 의 변화

Fig. 8. Switching diagram for strong parasitic coupling (a) The \otimes and \ominus states with a parameter of Δ (b) x, y and (x/y) as a function of Δ .

그림 8(b)에는 Δ 에 따른 x, y 및 (x/y) 의 변화가 그려져 있다. 정의에 의하여 L_c 와 δ 가 각각 y 와 (x/y) 에 비례하므로, 정규화 보정치 Δ 에 따라 주결합길이 L_c 와 정규화 전압 δ 가 어떻게 변화하는가를 관찰할 수 있다.

IV. 결론

방향성 결합기 광 스위치의 입/출력부에서 존재하는 parasitic coupling의 영향을 고려한 스위칭 조건을 해석하였다. Coupled mode 방정식을 기초로 하여 입/출력 관계를 전달행렬을 통하여 표현하였다. 해석은 입/출력부의 bent point에서 radiation loss가 없다는 가정 하에 수행되었다. 입/출력부의 parasitic coupling의 영향을 무시한 종전의 광 결합길이 l_c 는 bending 각도, 또는 기생 coupling의 양에 따라 보정되어야 함을 밝혔다. 광 결합길이의 정규화 보정치 Δ 를 정의한 후, Δ 의 변화에 따른 스위칭 조건을 유도하였다.

Bending 각도 $\theta/2$ 가 작아질수록 parasitic coupling의 양은 많아지며 보정치 Δ 는 커진다. Δ 를 parameter로 하여 \otimes 상태와 \ominus 상태의 변화하는 모

습을 추적하였다. i) Weak parasitic coupling의 경우 Δ 가 커짐에 따라 결합부의 길이 L_c 는 l_c 로부터 비례적으로 작아져야 하나, 인가전압 관련 parameter δ 는 Δ 에 관계없이 보정전과 거의 동일한 값을 유지해야 함을 알 수 있었다. ii) Strong parasitic coupling의 경우에는 Δ 가 커짐에 따라 L_c 는 비례적으로 작아지며, δ 는 예상대로 증가함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] H. Kogelnik and R. V. Schmidt, "Switched directional couplers with alternating $\Delta\beta$," *IEEE J. Quantum Electron.* vol. QE-12, pp. 396-401, 1976.
 [2] W. K. Burns, A. F. Milton, A. B. Lee, and E. J. West, "Optical modal evolution 3-dB coupler," *Applied Opt.*, vol 15, pp. 1053-1065, 1976.
 [3] Talal Findakly and Chin-Lin Chen, "Optical directional couplers with variable spacing,"

Applied Opt., vol. 17, no. 5, pp. 769-773, March, 1978.

[4] R. C. Alferness and P. S. Cross, "Filter Characteristics of Codirectionally Coupled Waveguides with Weighted Coupling," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-14, pp. 843-847, 1978.
 [5] Paul Pedersen and J. L. Nightingale, "Simplified Method of Calculating Power Transfer between Nonparallel Dielectric Waveguides," *Applied Opt.*, vol. 28, pp. 984-986, 1 March 1989.
 [6] A. Hardy, M. Osinski, and W. Streifer, "Application of coupled-mode theory to nearly parallel waveguide systems," *Electron. Lett.*, vol. 22, 1249-1250, 1986.
 [7] H. Nishihara et al, *Optical Integrated Circuits*, Ch. 3, McGraw-Hill, 1989.
 [8] Amnon Yarive, *Optical Electronics*, Ch. 13, Saunders College Publishing, 1991.

저 자 소 개



金東珏(正會員)

1972년 9월 20일생. 1995년 서울시립대학교 전자공학과 졸업. 1995년 3월 ~ 현재 동 대학원 전자공학과 석사과정 재학중. 주관심분야는 도파/집적광학, 광섬유, FDM, FEM, BPM 등 수치해석 등임

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 등임