

論文98-35D-6-8

두도파로 및 세도파로 방향성 결합기의 Crosstalk

(Crosstalks of Two-Waveguide and Three-Waveguide Directional Couplers)

金永文*, 金昌敏*

(Young-Moon Kim and Chang-Min Kim)

요약

두도파로 구조와 세도파로 구조를 갖는 방향성 결합기의 crosstalk를 해석하고, 각 구조에 따른 장단점을 비교 평가하였다. 결합모드, 정상모드의 관계를 바탕으로 각 결합기 구조에 따른 crosstalk식을 유도하였으며, 유한 차분법, 빔 전송법 등 모의전산을 통하여 유도식의 타당성을 검증하였다. 실용적인 측면에서 두도파로 방향성 결합기의 경우가 세도파로 결합기 어느 구조보다 crosstalk 측면, 광 결합길이 측면에서 볼 때 가장 유리함을 알 수 있었다.

Abstract

The crosstalks of two-waveguide & three-waveguide directional couplers are analyzed. Advantages and disadvantages for each coupler are compared and discussed. Based on the relationship between the coupled mode and the normal mode, the mathematical expressions are derived in terms of the crosstalks for each directional coupler. Numerical techniques such as the finite-difference method and the beam propagation method are employed to testify the validity of the derived equations. The calculation results show that two-waveguide directional coupler is superior to any types of three-waveguide couplers from the practical viewpoint of the crosstalk and the coupling length.

I. 서론

일반적으로 방향성 결합기(DC : Directional Coupler)는 광 결합이 일어날 수 있을만큼 가까이에 위치한 두개의 평행한 도파로(WG : Waveguide)로써 구성되며, 주로 광 스위칭/변조기, 광 분파기/합파기 등의 기본 소자로 이용되어져 왔다. 최근들어 광 분배기/합파기와 몇몇 응용에서는 두도파로 결합구조 대신에 세도파로 방향성 결합기가 제안되었다.^{[1]-[6]}

한쪽 도파로에 입사된 광파위는 결합길이만큼 진행

한 후 다른쪽 도파로로 완전하게 결합되어지는 것이 요구되는데, 실제로는 작은 양의 파워가 광이 입사된 도파로에 여전히 남아있게 된다. 이는 결합모드 이론의 측면에서 볼 때 이웃한 도파로 사이에 존재하는 전계의 중첩에 기인하는 것이다. 이것이 우리가 원하지 않는 crosstalk이며, 많은 스위칭 소자가 들어가는 시스템의 설계시 제약 요소가 된다. 이러한 이유로 지금까지 방향성 결합기의 crosstalk 원인과 그것의 영향에 대한 연구보고가 있어 왔다.^{[7]-[9]} T. K. Findakly는 reversed $\Delta\beta$ 방향성 결합기의 taper 영역에서의 결합효과에 의해 발생하는 crosstalk와 이를 최소화하기위한 방법을 연구하였고^[7], V. R. Chinni는 흡수 손실에 의해 발생하는 crosstalk에 관

* 正會員, 서울시立大學校 電子工學科
(Dept. of Electronics Eng., The University of Seoul)
接受日字:1998年2月19日, 수정완료일:1998年4月23日

해 연구하였으며^[8], S. Lin은 소자 결합으로부터의 광의 산란에 기인하는 crosstalk를 연구하였다^[9]. 특히, K. L. Chen은 입사된 파가 결합영역에서 각각의 normal 모드에 결합되는 양이 서로 다름으로 인해 발생하는 crosstalk 문제를 연구하였다^[4]. 두도파로 방향성 결합기의 crosstalk, 그리고 세도파로 방향성 결합기의 바깥 입사 경우에 대한 crosstalk를 함께 다루었고, 두 인접 도파로의 전계의 중첩적분에 비례함을 보였다. 그러나 세도파로 방향성 결합기에서 가운데 입사시의 crosstalk에 대한 고려가 없었으며, 각 방향성 결합기에 대해서 도출된 결과들의 타당성을 검증하기 위한 비교가 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 두도파로 구조와 세도파로 구조를 갖는 DC의 crosstalk 문제를 다루었다. 그리고 세도파로의 경우 가운데 입사 및 바깥 입사의 경우에 대하여 각각 해석하였다. 결합모드(coupled mode)와 정상모드(normal mode) 사이의 관계식을 바탕으로 각 결합기 구조에 따른 crosstalk를 이웃한 두 전계의 중첩인자, 또는 각 도파로의 전파 상수의 함수로 도출하였다. 도출된 식의 타당성을 검증하기 위하여 FDM, BPM 등의 모의 전산을 수행하였으며, 이론과 수치해석의 결과가 잘 일치함을 확인하였다. 해석의 편의를 위해 각각의 도파로는 손실이 없고 동일한 구조를 가지며 단일 모드만을 허용한다고 가정 하였다.

해석 결과 일반적으로 두도파로 DC가 세도파로 DC 어느 입사 경우에 비해서도 더 작은 crosstalk를 보여, 더욱 바람직한 스위칭을 함을 알 수 있었다. 세도파로 DC의 경우, 바깥 입사의 경우가 가운데 입사의 경우보다 대체로 더 작은 crosstalk를 보이고 있으나, 광 결합길이는 2배에 이르고 있다. 동일한 구조의 DC에서는 강도파(strongly guiding)의 경우가 약도파(weakly guiding)에 비하여 더욱 낮은 crosstalk를 보이고 있으나, 광 결합길이는 늘어나고 있다.

II. 두도파로 방향성 결합기의 Crosstalk

그림 1은 전형적인 두도파로 방향성 결합기를 나타낸다. 클래드 영역과 기판 영역의 굴절률은 각각 n_g 와 n_s 이다. 도파로의 폭은 d 이고, 도파로 사이의 간격은 s 이다. 각각의 도파로는 동일한 구조를 가지며, 단일 모드만을 허용한다고 가정한다. 그러면 결합 영역에서 두 개의 normal 모드(ψ_e : even 모드, ψ_o :

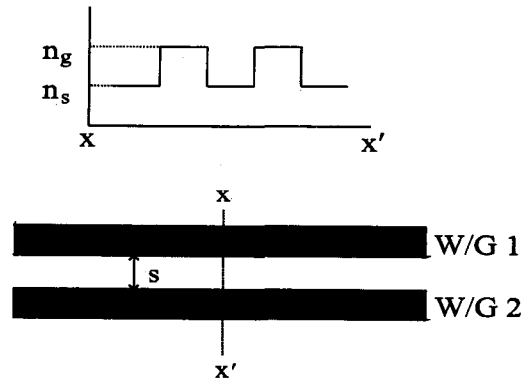


그림 1. 단일 모드만을 허용하는 동일한 구조의 두 평행 도파로로 구성된 방향성 결합기

Fig. 1. Directional coupler composed of two identical parallel WGs that support only the fundamental mode.

odd 모드)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi_e &= \frac{1}{\sqrt{2}} [E_1 + E_2] \\ \psi_o &= \frac{1}{\sqrt{2}} [E_1 - E_2] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $E_i(x)$ 는 i 번째 도파로의 modal field이고 다음과 같이 정규화되었다고 하자.

$$\int E_i^2 dx = 1 \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

그러면, normal mode의 field는 식 (1)에 따라 다음과 같이 정규화된다.

$$\int \psi_e^2 dx = \int \psi_o^2 dx = 1 \quad (3)$$

한편, 도파로 1에 입사된 파가 도파로 2로 완전 결합이 이루어지기 위한 결합 영역의 길이 l_c 는 다음과 같다.

$$l_c = \frac{\pi}{(\beta_e - \beta_o)} \quad (4)$$

Radiation mode를 무시하면 도파로 1으로 입사된 파(E_1)는 결합 영역에서 두 개의 normal 모드에 균등하게 결합되어 l_c 만큼 진행한 후 완전 결합이 이루어져 E_2 로 바뀌게 된다. 이는 E_1 이 두 normal 모드에 결합되는 양이 같을 경우에 발생하나, 실제로는 두 도파로간 전계의 중첩으로 인하여 두 normal 모드에 결합되는 양이 미세하게 다르게 된다. 따라서 E_1 을

다음과 같이 나타내기로 한다.

$$E_1 = u\psi_e + v\psi_o \quad (5)$$

여기서 u 와 v 는 E_1 의 각 normal 모드간 결합정도를 나타내는 계수이다.

도파로 1과 2는 동일한 구조를 가지고 있으므로 식 (5)의 형태와 ψ_e , ψ_o 의 대칭성, 반대칭성을 고려하면 E_2 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_2 = u\psi_e - v\psi_o \quad (6)$$

식 (2)의 조건에 따라 다음과 같은 관계가 얻어진다.

$$\int E_i^2 dx = u^2 + v^2 = 1 \quad (7)$$

또한, E_1 과 E_2 의 중첩적분을 χ 로 놓으면 다음식과 같다.

$$\chi \equiv \int E_1 E_2 dx = u^2 - v^2 \quad (8)$$

식 (7)와 (8)로부터

$$\begin{aligned} u^2 &= \frac{1}{2}(1 + \chi) \\ v^2 &= \frac{1}{2}(1 - \chi) \end{aligned} \quad (9)$$

도파로 1에 입사된 광은 길이 L 만큼 진행한 후 전체 field는 E_T 가 되고, 이는 $L = l_c$ 에서 도파로 2의 종단으로 cross-over된다.

$$E_T = ue^{-i\beta_e L}\psi_e + ve^{-i\beta_o L}\psi_o \quad (10)$$

E_T 는 모두 E_2 로 바뀌어야 하나 여전히 도파로 1에 남아 있는 양이 있을 수 있다. 이 잔여량은 DC의 성능을 나타내는 지수가 되며, 이를 Crosstalk(C.T.)라고 하고 다음과 같이 정의되어진다.

$$C.T. = \frac{\left| \int E_1 E_T dx \right|^2}{\left| \int E_1^2 dx \right|^2} = |u^2 e^{-i\beta_e L} + v^2 e^{-i\beta_o L}|^2 \quad (11)$$

$L = l_c$ 에서 C.T.를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C.T. &= \frac{1}{4} |(1 + \chi)e^{-i\beta_e l_c} + (1 - \chi)e^{-i\beta_o l_c}|^2 \\ &= \frac{1}{4} |(1 + \chi)e^{-j(\beta_e - \beta_o)l_c} + (1 - \chi)|^2 \quad (12) \\ &= \chi^2 \end{aligned}$$

식 (12)의 결과가 의미하는 바는 두 도파로간 local 모드의 중첩이 작을수록 C.T.도 작아져서 더욱 바람직한 스위칭을 얻을수 있음을 의미한다.

III. 세도파로 방향성 결합기의 Crosstalk

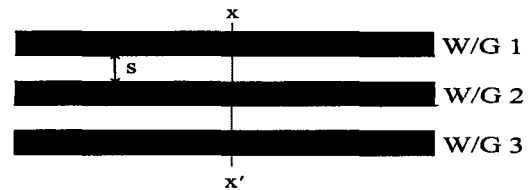
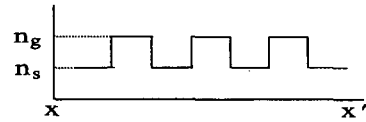


그림 2. 단일 모드만을 허용하는 동일한 구조의 세 평행 도파로로 구성된 방향성 결합기

Fig. 2. Directional coupler composed of three identical parallel WGs that support only the fundamental mode.

그림 2는 세도파로 방향성 결합기를 나타낸다. 도파 영역과 기판 영역의 굴절률은 각각 n_g 와 n_s 이다. 도파로의 폭은 d 이고, 도파로 사이의 간격은 s 이다. 각각의 도파로는 동일한 구조를 가지며 단일 모드만을 허용한다고 가정하면, 결합 영역에서 세 개의 normal 모드는 다음과 같다^[11]

$$\begin{aligned} \psi_a &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} E_1 + E_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} E_3 \right] \\ \psi_b &= \frac{1}{\sqrt{2}} [E_1 - E_3] \\ \psi_c &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} E_1 - E_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} E_3 \right] \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $E_i(x)$ 는 i 번째 도파로의 modal field이고, 두 도파로의 경우와 마찬가지로 $\int E_i^2(x) dx = 1$ 로 정규화 한다.

1. 바깥 도파로 입사의 경우

그림 2에서 도파로 1에 입사된 파가 도파로 3으로 완전 결합이 이루어지기 위한 결합 영역의 길이 l_d 는 다음과 같고, 이것은 가운데 입사의 경우 결합 길이의 두배가 된다^[11].

$$l_d = \frac{2\pi}{(\beta_a - \beta_c)} \quad (14)$$

두도파로의 경우와 마찬가지로 도파로 1으로 입사된 파 \$E_1\$은 결합 영역에서 다음과 같이 세 개의 normal 모드에 결합된다.

$$E_1 = u\Psi_a + v\Psi_b + r\Psi_c \quad (15)$$

여기서 \$u, v\$와 \$r\$은 \$E_1\$의 각 normal 모드간 결합정도를 나타내는 계수이다.

각각의 도파로들은 동일한 구조를 갖고 있으므로 식 (15)와 각 normal mode의 대칭성, 반대칭성에 따라 \$E_2\$와 \$E_3\$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_2 &= c[u\Psi_a - r\Psi_c] \\ E_3 &= u\Psi_a - v\Psi_b + r\Psi_c \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 \$c\$는 정규화 상수이다.

\$E_1\$의 정규화 조건으로부터 다음과 같은 관계가 얻어진다.

$$\int E_1^2 dx = u^2 + v^2 + r^2 = 1 \quad (17)$$

또한, \$E_1\$과 \$E_3\$의 중첩적분이 매우 작다고 하면

$$\int E_1 E_3 dx = u^2 - v^2 + r^2 \cong 0 \quad (18)$$

과 같고, 식 (17)와 (18)으로부터 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$u^2 + r^2 = v^2 = \frac{1}{2} \quad (19)$$

한편, \$E_2\$의 정규화 조건과 식 (19)로부터 \$c\$는 \$\sqrt{2}\$임을 알 수 있다.

\$E_1\$과 \$E_2\$의 중첩적분을 \$\chi\$로 놓으면 다음식과 같다.

$$\chi \equiv \int E_1 E_2 dx = \sqrt{2}(u^2 - r^2) \quad (20)$$

따라서 식 (19)과 (20)로부터

$$\begin{aligned} u^2 &= \frac{1}{4}(1 + \sqrt{2}\chi) \\ v^2 &= \frac{1}{2} \\ r^2 &= \frac{1}{4}(1 - \sqrt{2}\chi) \end{aligned} \quad (21)$$

\$E_1\$이 길이 \$L\$만큼 진행한 후 전체 field는 \$E_T\$가 되고, 이는 \$L = l_{cl}\$에서 도파로 3의 종단으로 cross-over된다.

$$E_T = ue^{-i\beta_a L}\Psi_a + ve^{-i\beta_b L}\Psi_b + re^{-i\beta_c L}\Psi_c \quad (22)$$

\$L = l_{cl}\$에서 C.T.(Crosstalk)를 구하면 다음과 같다.

$$C.T. = \frac{|\int E_1 E_T dx|^2}{|\int E_1^2 dx|^2} = |u^2 e^{-i\beta_a l_{cl}} + v^2 e^{-i\beta_b l_{cl}} + r^2 e^{-i\beta_c l_{cl}}|^2 \quad (23)$$

위 식에 식 (21)를 대입해서 정리하면 아래와 같다.

$$C.T. = \frac{1}{16} \left| (1 + \sqrt{2}\chi) + 2e^{\frac{i}{2}(\beta_a - \beta_b)l_{cl}} e^{-\frac{i}{2}(2\beta_b - \beta_a - \beta_c)l_{cl}} + (1 - \sqrt{2}\chi)e^{i(\beta_a - \beta_b)l_{cl}} \right|^2 \quad (24)$$

여기서 \$2\beta_b - \beta_a - \beta_c\$는 매우 작으므로 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$e^{-\frac{i}{2}(2\beta_b - \beta_a - \beta_c)l_{cl}} \cong 1 - \frac{i}{2}(2\beta_b - \beta_a - \beta_c)l_{cl} \quad (25)$$

식 (14)와 (25)을 식 (24)에 대입하면 다음과 같은 결과식을 얻는다.

$$C.T. = \left| \frac{\pi(2\beta_b - \beta_a - \beta_c)}{2(\beta_a - \beta_c)} \right|^2 \quad (26)$$

한편, 부록 A에 세도파로 DC의 각 normal 모드 전파 상수에 관한 근사식을 유도하였다. 유도된 식 (A12)를 대입하면 식 (26)은 \$\chi\$에 관하여 다음과 같이 간단하게 정리된다.

$$C.T. = \frac{\pi^2 \chi^2}{2} \quad (27)$$

그러나 식 (A12) 근사식의 오차로 말미암아, 식 (27)의 결과치는 식 (26)에 비하여 2배정도의 오차를 보이므로 본고에서는 식 (26)만을 사용하기로 한다.

2. 가운데 도파로 입사의 경우

그림 2에서 도파로 2(가운데)로 입사된 파가 도파로를 따라 진행하면서 도파로 1과 3으로 완전히 결합되기 위한 길이 \$l_{cl}\$는 다음과 같다.^[1]

$$l_{cl} = \frac{\pi}{(\beta_a - \beta_c)} \quad (28)$$

도파로 2로 입사된 파 \$E_2\$는 결합 영역에서 normal 모드에 결합되는데, 외부 입사의 경우와 마찬가지로

각 normal 모드에 결합되는 양이 다르므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_2 = \sqrt{2}[u\Psi_a - r\Psi_c] \quad (29)$$

마찬가지로 E_1 과 E_3 도 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} E_1 &= u\Psi_a + v\Psi_b + r\Psi_c \\ E_3 &= u\Psi_a - v\Psi_b + r\Psi_c \end{aligned} \quad (30)$$

그러면, 외부 입사의 경우와 같이 식 (29)와 (30)의 계수들은

$$\begin{aligned} u^2 &= \frac{1}{4}(1 + \sqrt{2}\chi) \\ v^2 &= \frac{1}{2} \\ r^2 &= \frac{1}{4}(1 - \sqrt{2}\chi) \end{aligned} \quad (31)$$

과 같고, 여기서 χ 는 E_1 과 E_2 의 중첩 적분이다.

도파로 2로 입사된 파가 길이 L 만큼 진행한 후 전체 field는 E_T 가 된다.

$$E_T = \sqrt{2}[ue^{-i\beta_2 L}\Psi_a - re^{-i\beta_2 L}\Psi_c] \quad (32)$$

$L = l_2$ 에서 E_T 는 도파로 1과 3으로 균등 분배될 것이 예상되며, C.T.(Crosstalk)를 구하면 다음과 같다.

$$\text{C.T.} = \frac{|\int E_2 E_T dx|^2}{|\int E_2^2 dx|^2} = 4|u^2 e^{-i\beta_2 l_2} + r^2 e^{-i\beta_2 l_2}|^2 \quad (33)$$

위 식에 식 (31)을 대입해서 정리한 후 식 (28)의 조건을 대입하면 다음과 같이 간단한 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{C.T.} &= \frac{1}{4} |(1 + \sqrt{2}\chi)e^{-i(\beta_a - \beta_c)l_2} + (1 - \sqrt{2}\chi)|^2 \\ &= 2\chi^2 \end{aligned} \quad (34)$$

IV. 수치 해석 결과

II, III장에서 유도된 C.T. 관련식들의 타당성을 검증하기 위하여, 슬랩 도파로로 구성된 DC를 예로 들어 FDM과 BPM을 통하여 수치 해석하고자 한다. 두 도파로, 세도파로 각각에 대해 단일모드만을 허용하는 범위에서 도파로의 굴절율을 두 경우로 나누어 해석하

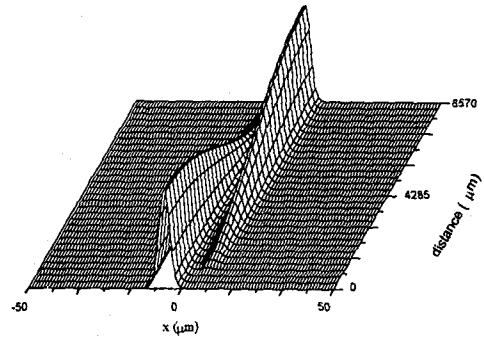
였다. 수치 해석을 위하여 가정한 도파로 파라미터 및 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda &= 1.3\mu\text{m}, \quad w = 5\mu\text{m}, \quad n_s = 2.20 \\ \beta &= k_0 N, \quad b = (N^2 - n_s^2)/(n_g^2 - n_s^2) \end{aligned} \quad (35)$$

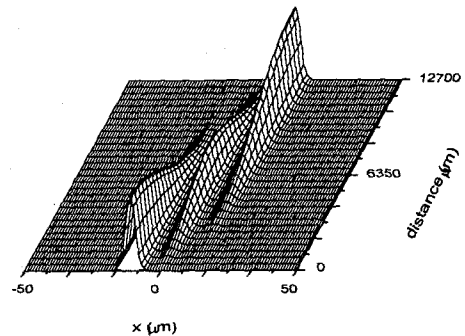
w : 각 도파로 폭, n_s : 클래드 굴절율, n_g : 코어 굴절율,
 β : 전파 상수

도파로의 굴절율은 i) $n_g=2.2025$ (도파 A, $b=0.558$), ii) $n_g=2.2038$ (도파 B, $b=0.645$)를 사용하였으며, 두 경우 모두 단일모드만을 허용하고 있다. 도파로 간격 $s=2.5\sim 7\mu\text{m}$ 로 변화시키며 crosstalk를 살펴보았다.

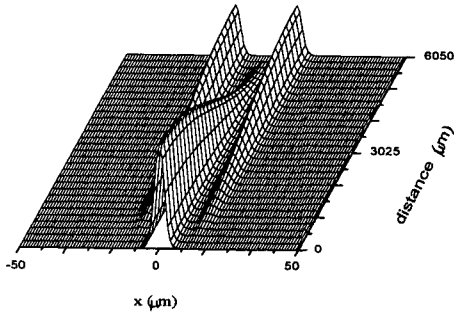
먼저 FDM을 이용한 수치해석 방법은 다음과 같다. 두도파로 DC와 세도파로 DC 가운데 입사의 경우에는, 1차원 FDM을 이용해서 도파로 1과 2의 고유 모드 E_1, E_2 를 각각 구하고 이들의 중첩 적분 χ 를 구한후 식 (12)와 식 (34)에 대입해서 crosstalk를 구한다. 세도파로 DC 바깥 도파로 입사시에는 FDM을 이용해서 세 개의 normal 모드에 대한 전파 상수($\beta_a, \beta_b, \beta_c$)를 구한후 이들을 식 (26)에 대입해서 crosstalk를 구한다.



(a)



(b)



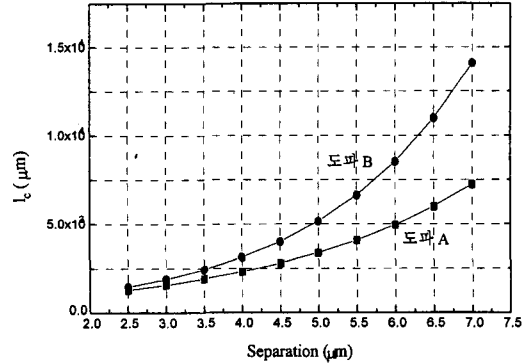
(c)

그림 3. BPM에 의한 평행 도파로 간의 빔 전파 모습 ($\lambda = 1.3\mu\text{m}$, $d = 5\mu\text{m}$, $s = 6\mu\text{m}$, $b = 0.558$)
 (a) 두도파로 DC (b) 세도파로 DC : 바깥 도파로 입사시 (c) 세도파로 DC : 가운데 도파로 입사시

Fig. 3. Figures of beam propagation along parallel WGs of DC ($\lambda = 1.3\mu\text{m}$, $d = 5\mu\text{m}$, $s = 6\mu\text{m}$, $b = 0.558$) (a) Two-WG DC (b) Three-WG DC : outer WG fed (c) Three WG DC : center WG fed

BPM에 의한 수치해석은 우선 FDM을 이용해서 E_1, E_2 를 구한다. 두도파로 DC와 세도파로 DC 바깥 도파로 입사의 경우에는 E_1 을 초기 전계로 해서 결합 길이 l_c 만큼 진행한후의 전계 E_T 를 구한후, E_1 과 E_T 의 중첩적분을 계산해서 식 (11)에서 정의된 crosstalk를 구한다. 세도파로 DC에서 가운데 입사의 경우는 E_2 를 초기 field로 해서 마찬가지로 crosstalk를 구할 수 있다. 그림 3은 BPM으로 구한 두도파로 DC 및 세도파로 DC의 빔 전파 모습을 그린 것이다.

그림 4(a)는 두도파로 DC의 crosstalk를 나타낸다. 도파로 사이의 간격 s 가 커짐에 따라 crosstalk가 지



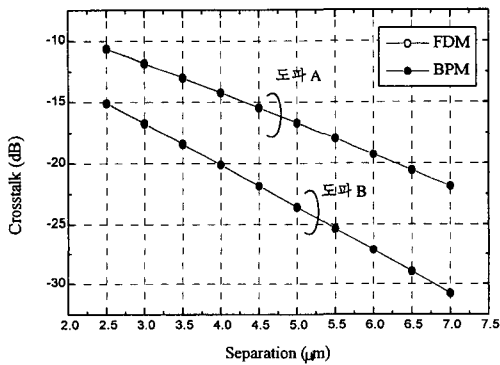
(b)

그림 4. 두 도파로 방향성 결합기의 crosstalk : 도파 A ($b = 0.558$), 도파 B ($b = 0.645$)
 (a) Crosstalk (b) 광결합 길이

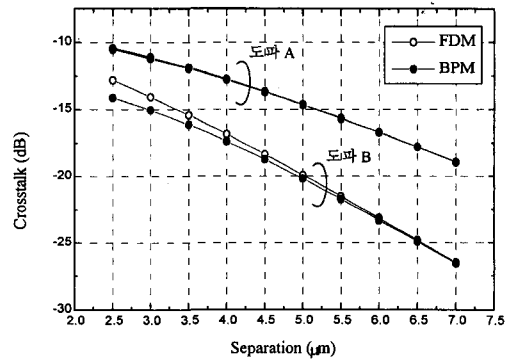
Fig. 4. Crosstalk of two WG DC : Case A ($b = 0.558$), Case B ($b = 0.645$).
 (a) Crosstalk (b) Corresponding coupling length

수적으로 감소하고 있으며, 강도파의 경우가 약도파에 비하여 더욱 낮은 crosstalk를 보이고, 따라서 더욱 우수한 스위칭을 얻을수 있다. FDM에 의한 결과치와 BPM에 의한 결과치가 거의 일치하고 있다. 그림 4(b)는 도파로간 간격에 따른 광 결합길이를 보이고 있다. 강도파일수록 이웃 도파로간 중첩 전계가 감소하여 결합길이 l_c 가 증가함을 염두에 둘 필요가 있다.

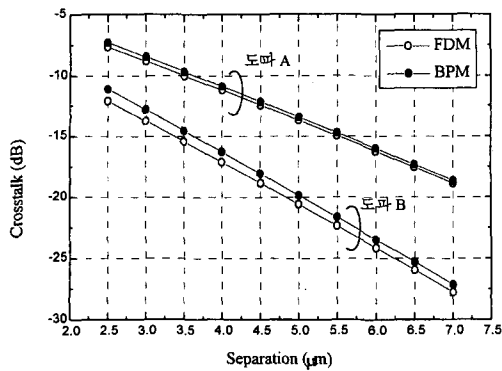
그림 5는 세도파로 DC의 crosstalk를 나타낸다. FDM에 의한 결과와 BPM에 의한 결과는 다소 차이를 보이고 있으나 그 오차가 1dB 이하로 비교적 작음을 알수 있다. 그림 5(a)는 광을 바깥 도파로에 입사시키는 경우이고, 그림 5(b)는 광을 가운데 도파로에



(a)



(a)



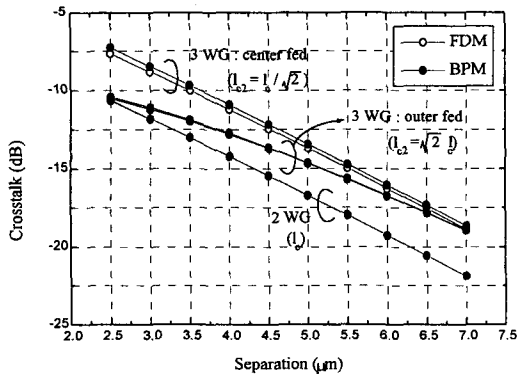
(b)

그림 5. 세도파로 방향성 결합기의 crosstalk : 도파 A (b = 0.558), 도파B (b = 0.645)
(a) 바깥 도파로 입사시 ($l_d = l_c/\sqrt{2}$) (b) 가운데 도파로 입사시 ($l_d = \sqrt{2}l_c$)

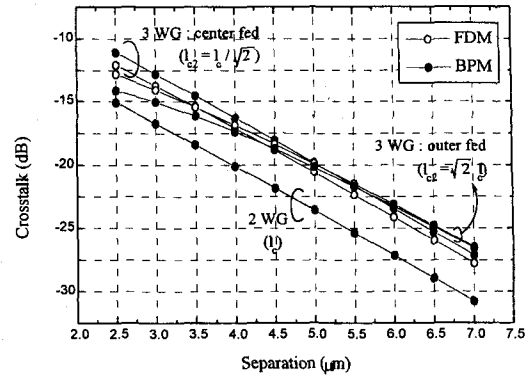
Fig. 5. Crosstalk of three WG DC : Case A (b = 0.558), Case B (b = 0.645).
(a) Outer WG fed ($l_d = l_c/\sqrt{2}$) (b) Center WG fed ($l_d = \sqrt{2}l_c$)

입사시키는 경우이다. 두 경우 두도파로 DC와 비슷한 경향을 보이고 있으며, 강도파일수록 더욱 낮은 crosstalk를 보이고 있다. 그림 5(a), (b)의 두 그림을 비교하여 보면 대체로 바깥 입사가 가운데 입사에 비하여 낮은 crosstalk를 보이고 있다. 좀더 상세한 비교는 그림 6에서 다루기로 한다.

그림 5에서는 도파로간 간격에 따른 광 결합길이를 그리지 않았다. 그 이유는 두도파로 DC와 동일한 경향을 보이고 있기 때문이다. 한편 그림 5(a) 바깥 입사의 광 결합길이 $l_d = \frac{1}{\sqrt{2}} l_c$, 그림 5(b) 가운데 입사의 광 결합길이 $l_d = \sqrt{2} l_c$ 임을 유의할 필요가 있다.



(a)



(b)

그림 6. 두도파로 및 세도파로 방향성 결합기의 crosstalk
(a) 도파 A의 경우 (b = 0.558) (b) 도파 B의 경우 (b = 0.645)

Fig. 6. Crosstalk of two WG and three WG DCs.
(a) Case A (b = 0.558) (b) Case B (b = 0.645)

두도파로와 세도파로 DC의 crosstalk를 비교하기 위해 위에서 구한 값들을 다시 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 도파 A의 경우이고, 그림 6(b)는 도파 B의 경우이다. 그림 6(a) 도파 A의 경우는 두도파로 결합기, 세도파로의 가운데 입사, 바깥 입사의 crosstalk 경향이 DC 구조에 따라서 확연히 구별된다. 그림 6(b) 도파 B의 경우는 도파 A에 비하여 crosstalk 경향이 다소 모호하기는 하나, 대체로 도파 A의 경우와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 세가지 구조의 도파로 간격에 따른 crosstalk 경향을 논의하기 위하여 도파 A의 경우를 잠시 예로 들기로 한다. 첫째, 두도파로 DC의 경우는 세도파로 DC에 비하여 더 작은, 특히 가운데 입사 경우에 비해서는 6dB 정도 작은 crosstalk를 보여 더욱 바람직한 스위칭의 구현 가능성을 보이고 있다. 둘째, 세도파로 DC 바깥 입사의 경우는 가운데 입사에 비하여 i) 도파로 간격이 좁을시 ($s = 2.5\mu m$)는 crosstalk가 낮으나 결합길이가 2배로 되어야하며 ii) 도파로 간격이 넓을시 ($s = 7\mu m$)는 crosstalk가 비슷하나 결합길이는 그대로 2배가 되어야함을 알 수 있다.

V. 결론

두도파로 및 세도파로 방향성 결합기의 crosstalk를

논하였다. 먼저 모드해석을 바탕으로 각 방향성 결합기 구조의 crosstalk를 수식으로 도출하였다. 수식적 결과를 검증하기 위하여 FDM, BPM등의 모의 전산을 수행하였으며, 이론과 수치해석의 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

각 구조에 따른 crosstalk의 경향을 분석한 결과는 다음으로 요약될 수 있다. i) 도파로 사이의 간격이 커짐에 따라 crosstalk는 지수적으로 감소하고 있다. 강도파의 경우가 약도파에 비하여 crosstalk는 더 작아지나 결합길이는 더 길어야 한다. ii) 두도파로 방향성 결합기는 동일한 구조의 경우, 어느 세도파로 DC에 비하여도 crosstalk가 낮고, 결합길이 측면에서도 별로 뒤지지 않는다. iii) 세도파로 방향성 결합기 구조에서 바깥 입사의 경우는 가운데 입사에 비하여, 도파로 간격에 따라 다르기는 하나 대체로 낮은 crosstalk를 보이고 있다. 바깥 입사의 경우가 더욱 우수한 성능을 보이고는 있으나 광 결합길이는 2배임을 고려할 필요가 있다.

방향성 결합기 설계시 대표적인 도파로 간격은 5~6 μ m 근처에서 설정되는 점을 고려하여 그림 6을 다시 검토하면, 두도파로 방향성 결합기의 경우가 세도파로 방향성 결합기 어느 구조에 비해서도 crosstalk 측면에서나, 광 결합길이 측면에서도 유리함을 알 수 있다.

부 록

A. 세도파로 방향성 결합기의 normal 모드에 대한 전파 상수 유도

동일한 구조의 세도파로를 고려해보자. 각 도파로의 유효굴절률 분포는 각각 $n_1(x)$, $n_2(x)$, $n_3(x)$ 이다. 기판 영역의 굴절률은 n_0 이다. 따라서 세 도파로 DC의 굴절률 분포는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$n^2(x) = \Delta n_1^2(x) + \Delta n_2^2(x) + \Delta n_3^2(x) + n_0^2 \quad (A1)$$

여기서, $\Delta n_i^2(x) = n_i^2(x) - n_0^2$ ($i=1, 2, 3$)이다.

i 번째 도파로에 존재하는 field E_i 는 다음과 같이 파동 방정식을 만족한다.

$$\frac{d^2 E_i}{dx^2} + [k_0^2 n_i^2 - \beta_0^2] E_i = 0 \quad (A2)$$

여기서 β_0 는 개별 도파로에 존재하는 모드의 전파 상

수이고, $k_0 (= \omega \sqrt{\mu \epsilon_0})$ 는 자유공간의 파수(wave number)이다. 그리고 E_i ($i=1, 2, 3$)는 자층의 적분 값이 1로 정규화 되었다. 한편, 결합 영역의 normal 모드는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Psi = \sum_{i=1}^3 A_i E_i \quad (A3)$$

위의 normal 모드도 파동 방정식을 만족하므로 식 (A3)을 다음의 파동 방정식에 대입하면

$$\frac{d^2 \Psi}{dx^2} + [k_0^2 n^2 - \beta^2] \Psi = 0 \quad (A4)$$

아래 식과 같다.

$$\sum_{i=1}^3 A_i \left\{ \frac{d^2 E_i}{dx^2} + [k_0^2 n^2 - \beta^2] E_i \right\} = 0 \quad (A5)$$

여기서 β 는 세도파로의 normal 모드에 대한 전파 상수이다. 위 식에 식 (A2)를 대입해서 정리하면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^3 A_i [(\beta^2 - \beta_0^2) - k_0^2 (n^2 - n_i^2)] E_i = 0 \quad (A6)$$

식 (A6)에 E_1 을 곱해서 적분하면

$$A_1(\beta^2 - \beta_0^2) + A_2[(\beta^2 - \beta_0^2)x - 2\beta_0 x] = 0 \quad (A7)$$

이 된다. 여기서 x 는 E_1 과 E_2 의 중첩적분이고, $\int E_i^2 dx = 1$ 이란 가정하에 결합계수 x 는 다음과 같다.

$$x = \frac{k_0^2}{2\beta_0} \int \Delta n_1^2 E_1 E_2 dx \quad (A8)$$

식 (A7)을 유도하는데 있어서 도파로 1과 3은 비교적 멀리 떨어져 있으므로 E_1 과 E_3 의 중첩적분을 포함하는 항은 무시하였다. 또한 다음의 적분도 무시하였다.

$$\begin{aligned} \int \Delta n_i^2 E_1 E_1 dx &\approx 0 \quad i=2, 3 \\ \int \Delta n_3^2 E_1 E_2 dx &\approx 0 \end{aligned} \quad (A9)$$

마찬가지로 식 (A6)에 E_2 와 E_3 를 각각 곱해서 적분하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} A_1[(\beta^2 - \beta_0^2)x - 2\beta_0 x] + A_2(\beta^2 - \beta_0^2) + A_3[(\beta^2 - \beta_0^2)x - 2\beta_0 x] &= 0 \\ A_2[(\beta^2 - \beta_0^2)x - 2\beta_0 x] + A_3(\beta^2 - \beta_0^2) &= 0 \end{aligned} \quad (A10)$$

A_i 에 대한 nontrivial 해를 얻기 위해서, β 는 다음의 행렬식을 만족해야 한다.

$$\begin{vmatrix} \beta^2 - \beta_0^2 & (\beta^2 - \beta_0^2)x - 2\beta_0 x & 0 \\ (\beta^2 - \beta_0^2)x - 2\beta_0 x & \beta^2 - \beta_0^2 & (\beta^2 - \beta_0^2)x - 2\beta_0 x \\ 0 & (\beta^2 - \beta_0^2)x - 2\beta_0 x & \beta^2 - \beta_0^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (A11)$$

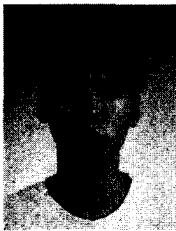
위 식을 풀면 β 에 관한 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \beta_a &\approx \beta_0 + \sqrt{2x} - 2xx \\ \beta_b &\approx \beta_0 \\ \beta_c &\approx \beta_0 - \sqrt{2x} - 2xx \end{aligned} \quad (A12)$$

참 고 문 헌

- [1] H. A. Haus and C. G. Fonstad, Jr., "Three-waveguide couplers for improved sampling and filtering", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-17, no. 12, pp. 2321-2325, Dec. 1981.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] K. L. Chen, Ph. D. dissertation, Univ. California, Berkeley, Ch. 4, 1985.
- [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] 임영준, 김창민, "세도파로 광스위치의 설계 규칙", 대한전자공학회 논문지, 제33권 A편, 제6호, pp. 197-205, 1996년 6월
- [7] T. K. Findakly and F. J. Loenberger, "On the crosstalk of reversed- $\Delta\beta$ directional coupler switches", J. Lightwave Tech., vol. 6, no. 1, pp. 36-40, Jan. 1988.
- [8] V. R. Chinni, T. C. Huang, P. K. A. Wai and C. R. Menyuk, "Crosstalk in a lossy directional coupler switch", J. Lightwave Tech., vol. 13, no. 7, pp. 1530-1535, July 1995.
- [9] S. Lin, W. Feng, J. C. Powellson, R. J. Feuerstein, L. J. Bintz, D. Tomic and A. R. Mickelson, "Scattering induced crosstalk in active directional couplers", J. Lightwave Tech. vol. 14, no. 9, pp. 2012-2025, Sep. 1996.

저 자 소 개



金永文(正會員)
1972년 8월 31일생. 1994년 2월 서울시립대학교 전자공학과 졸업. 1994년 3월 ~ 현재 동 대학원 전자공학과 석사과정. 주관심분야는 도파/집적광학, 고속 광변조기, BPM, FEM 등 수치해석등임

金昌敏(正會員) 第35卷 D編 第3號 參照
현재 시립대학교 전자전기공학부 교수