

Rib형 광 방향성 결합기의 결합효율

Coupling Efficiency of Optical Directional Coupler with Rib-Type

李元錫*, 扈光春**, 金暎權*

(Won-Seock Lee*, Kwang-Chun Ho**, and Yung-Kwon Kim*)

요약

유효 유전체 해석법에 기초한 정확한 모드 전송선로 해석법이 rib형 광 방향성 결합기의 설계 특성을 분석하기 위하여 소개되고 발전되었다. 이 접근법은 모든 가능한 전송 성분을 고려한 정확한 수치 해석적 알고리즘을 제공하며 유효 굴절을 방법과 섭동 이론 같은 근사적 해석법의 정확도를 평가하기 위한 비교 해석법으로 이용될 수 있다. 결국, rib형 광 결합기의 최대 전력전송 특성을 평가하기 위하여 그 동작 주파수, rib형 도파로들 사이의 간격 그리고 전송 층의 두께에 따른 전력 결합효율의 변화를 분석하였다.

Abstract

A rigorous modal transmission-line theory (MTLT) based on effective dielectric method (EDM) is introduced and developed for the design of optical directional couplers with rib-type. This approach provides a rigorous numerical algorithm that takes all the possible guided components into consideration, and thus may serve as an appropriate reference to access the accuracy of such simplified methods as effective index method (EIM) and perturbation theory. Consequently, to search the optical parameters for maximum power coupling of the optical couplers, we evaluate the operating wavelength, the interval S between rib guides and the thickness t of a cladding layer.

1. 서론

최근, 2개의 전파모드를 결합시키기 위한 rib형 광 결합기에 대한 관심이 광 소자 분야에서 날로 증가하고 있다. 이 광 전송구조는 낮은 산란 손실과 반도체 레이저와의 좋은 상호 결합특성때문에 광 통신 분야에서 널리 이용되고 있다. 그 전송 특성을 해석하고

모델링하기 위하여 많은 해석법들이 제안되고 이용되어 왔다. 그 중에서도 Marcatili에 의하여 처음 제안된 수치해석 기술인 유효 굴절률 해석법 (Effective Index Method: EIM, Corrected EIM: CEIM)[1, 2]은 그 전파모드가 전송채널 (guiding layer)에 잘 한정된 구조에서 좋은 결과를 제공하는 해석법이다. 그러나, 오늘날 대부분의 광 집적 소자들은 전파모드가 전송구조의 모든 채널에 분포하는 단일 모드 전송구조에 기초하고 있다. 그런 전송구조에 대하여 Marcatili의 해석법은 좋은 결과를 제공하지 못한다. 이를 위하여, 전파모드 형태의 시도 함수 (trial function)를 이용한 유사 요소 해석법 (Vector Finite Element Method: VFEM,

* 建國大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Konkuk Univ.)

** 漢拏大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Halla Institute of Technology)

接受日: 1999年3月10日, 修正完了日: 1999年6月8日

Scalar Finite Element Method: SFEM)[3]과 주파수 영역에서 Green 함수를 사용한 스펙트럼 해석법 (Spectral Technique: ST)[4]들이 제안되었고 현재에도 발전되고 있다. 비록, 이들 기존의 방법들이 전형적인 rib형 전송 구조의 그 광학적 특성을 분석하기에 충분히 정확하다고 하지만, rib형 광 결합기의 그 결합 특성을 세부적으로 평가하기에는 부족하다고 할 수 있다.

이를 위하여, 본 논문에서는 rib형 광 방향성 결합기를 설계할 때 효율적으로 적용이 가능한 유효 유전체 방법 (Effective Dielectric Method: EDM)[5]을 기반으로 하는 정확한 모드 전송선로 해석법 (Modal Transmission-Line Theory: MTLT)[6, 7]을 적용하여 그 결합기의 결합 효율을 분석하였다. 이 결합된 접근법 (EDM+MTLT)은 rib형 광 결합기의 그 결합효율을 분석할 때 비교적 정확한 수치 해석적 알고리즘을 제공하며, 앞으로 발전될 다른 이론들과의 적절한 수치 해석적 참고자료로 이용될 수 있을 것이다.

본 논문은 다음과 같이 구성하였다. Rib형 광 방향성 결합기의 최적 설계를 위한 그 변수들을 찾기 위하여 유효 유전체 방법과 모드 전송선로 해석법을 2장에서 언급하였고, 3장에서 동작 파장 λ , rib형 전송 채널들 사이의 간격 S , 그리고 rib형 전송 채널과 함몰된 채널 사이의 cladding 두께 t 에 따른 결합 특성을 수치 해석적으로 분석하였다. 마지막으로, 본 논문의 종합적 목적과 설명을 4장에 요약하였다.

II. 모드의 결합 효율

Rib형 광 전송구조로 형성된 방향성 결합기는 rib형 도파관들 사이의 간격 S 와 그 전송 폭 W 에 따라 전송 굴절률이 변화하며 이에 의존하여 전송 모드들 사이의 결합효율이 증가하거나 감소한다. 이러한 변수들에 의존하는 rib형 광 결합기가 그림 1에 자세하게 나타나있다. 그림에서 보듯이, 3-D 방향성 결합기는 두께 $d=0.2\text{ mm}$, 굴절률 $n_3=3.38$ 의 전송 채널과 두께 t , 굴절률 $n_2=3.17$ 의 cladding층으로 구성되었으며, 기관과 rib형 도파관은 cladding층과 같은 굴절

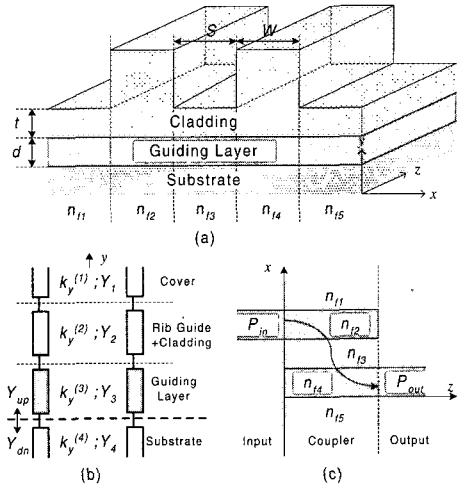


그림 1. Rib형 광 방향성 결합기: (a) 3-D 전송 구조, (b) y-축 방향으로 구성된 등가 전송선로, (c) 유효 굴절률에 기초한 2-D 전송 구조.

Fig. 1. Optical directional coupler of rib-type: (a) 3-D guiding structure, (b) equivalent transmission-line network along with y-axis, (c) 2-D guiding structure based on effective refractive index.

률을 갖도록 설계되었다. 여기서, rib형 도파관들 사이의 폭은 $W=2.4\text{ mm}$ 이고 그 높이는 $h=4.0\text{ mm}$ 이다. 그 rib형 광 결합기에 존재하는 모드는 본질적으로 TEM 모드와 유사한 모드로서 전파 방향에 따라 준(quasi)-TE 모드와 준-TM 모드로 분류되며, 만일 고려되어 지는 전파방향이 z-축이라면 우리는 이 모드들을 각각 E_{pq}^y 형, E_{pq}^x 형 hybrid형 모드라 정의한다.

그림 1에서 보듯이 파장 $\lambda=1.55\text{ mm}$ 의 모드가 rib형 방향성 결합기의 y-축을 따라 입사한다고 가정하자. 이때, y-축 방향에서의 전파상수는 다음과 같다.

$$k_y^{(j)2} + k_x^2 + k_z^2 = k_y^{(j)2} + \beta^2 = k_0^2 \epsilon_j \quad (1)$$

여기서, ϵ_j 는 j-번째 전송 채널의 그 유전율을 나타내며, β 는 xz-평면상의 그 전파 상수이다. 그때, 아래와 같은 모드 전송선로 해석법의 횡 방향 공진 조

건을 이용하면, 그 전파 상수 β 가 결정된다[7].

$$Y_{up} + Y_{dn} = 0 \quad (2)$$

여기서, Y_{up} 과 Y_{dn} 은 y -축 상의 임의의 위치에서 각각 위와 아래로 본 그 어드미턴스를 나타내며, 그림 1(b)에서 보듯이 y -축을 따라 구성된 등가 전송선로의 그 전파상수와 특성 어드미턴스는 다음과 같다

$$Y_j = \begin{cases} k_y^{(j)}/\omega \mu_0 & : \text{quasi-TE modes} \\ \omega \epsilon_0 \epsilon_j / k_y^{(j)} & : \text{quasi-TM modes} \end{cases} \quad (3)$$

결국, xy -평면 상에서 y -축 방향으로 계산된 식 (2)의 고유치 문제에 기초한 각 영역들의 그 유효 굴절율 ($n_{f,i}$)을 이용하여 우리는 그림 1(a)의 3-D 방향성 결합기를 그림 1(c)의 근사적 등가 2-D 구조로 대체할 수 있다. 이 2-D로 등가화된 전송구조는 일반적으로 평면 광 방향성 결합기에서 가정 (즉, y -축에서의 그 모드 변화는 없다.)하는 조건하에서 분석될 수 있다

그림 1(c)에서 보듯이 모드는 상향 전송채널을 통하여 입사하고 결합 길이 $z=z_0$ 를 진행한 후에 하향 전송채널을 통하여 출력된다고 가정하였다. 그때, xz -평면 상에 2차원적 구조로 등가화된 rib형 광 결합기에서 전파하는 중첩모드 (supermodes)들의 그 결합특성을 해석하기 위하여 아래에 주어진 결합기의 전파상수 k_z 를 결정하여야 한다.

$$k_z = k_0 \sqrt{n_{i,eff}^2 - (k_{xi}/k_0)^2} \quad (4)$$

이 방향성 결합기의 중첩모드인 우/기 (even/odd) 모드들의 그 전파상수 $k_{z,ev}$ 와 $k_{z,od}$ 는 식 (2)에 정의된 횡 방향 공진조건에 의하여 또한 결정할 수 있다. 단지, 적용되는 전송 선로의 특성 값 (전파상수, 특성 임피던스)들이 x -축 방향의 성분들로 구성된다는 것을 제외하면 앞서와 같다

이와 같이 계산된 중첩모드들의 전파상수에 기초한 입력 경계면에서의 그 준-TE 모드의 필드 분포가

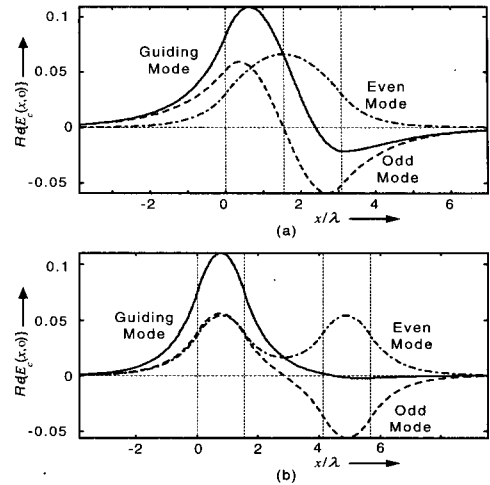


그림 2. 입력 경계면에서 준-TE 모드의 전계 분포: rib형 도파로 사이의 간격 (a) $S=0$ mm, (b) $S=4$ mm인 경우. 여기서, cladding의 두께 $t=0.4$ mm이다.

Fig. 2. Field distribution of quasi-TE mode at input boundary: (a) the interval between rib-guides is $S=0$ mm, and (b) $S=4$ mm, where the thickness of cladding is $t=0.4$ mm.

그림 2에 자세하게 나타나있다. 그림에서 보듯이 $S=4$ mm인 경우 거의 모든 중첩모드의 전송 에너지가 상향채널을 통하여 입사되는 반면, $S=0$ mm인 경우 방향성 결합기의 결합효율을 현저히 저하시키는 주요 원인인 상당한 양의 중첩모드가 하향채널에 존재한다. 이는 광 결합기를 통하여 전파하는 전송 모드는 우/기 필드가 결합되어 나타나며, rib형 도파로들 사이의 간격 S 의 변화에 따라 민감하게 영향을 받는다는 것을 의미한다. 그러므로, 상향 전송채널을 통하여 입사된 모드의 전력이 하향 전송채널을 통하여 최대한 출력되기 위하여 최적화된 간격 S 의 선택이 요구된다. 이에 대한 상세한 분석은 3장에서 언급될 것이다.

그때, 입/출력 단에서 발생한 준-TE/TM 모드들은

$$\begin{aligned} E_{(in,out)}(x,z) &= V_{(in,out)}(z)e_{(in,out)}(x), \\ H_{(in,out)}(x,z) &= -I_{(in,out)}(z)h_{(in,out)}(x) \end{aligned} \quad (5)$$

와 같이 모드 전송선로 표현식[7]으로 주어지고, 방향성 결합기에서 전파하는 그 전송 모드인 중첩모드는 아래와 같이 우 모드와 기 모드의 합으로 표현된다 [7].

$$\begin{aligned} E_c(x, z) &= V_{ev}(z)e_{ev}(x) + V_{od}(z)e_{od}(x), \\ H_c(x, z) &= -[I_{ev}(z)h_{ev}(x) + I_{od}(z)h_{od}(x)] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, V_v 와 I_v 는 각각 입력모드에 의존하여 결정되는 우 ($v = ev$) /기 ($v = od$) 모드의 모드전압과 모드전류를 나타낸다.

결국, 입력 경계면에서 발생한 중첩모드는 rib형 결합기에서 결합길이 (coupling length) $z=z_0$ 를 진행한 후에 출력되며, 그 입/출력 경계면에서 필드의 직교조건 (field orthogonality condition)[7]과 전력 정규화조건 (power normalization condition)[7]을 식 (5)와 (6)에 적용하면 아래와 같은 결합효율을 정의할 수 있다.

$$\eta_{\xi} = \text{Re} \left[\frac{k_{z,out}(\xi)}{k_{z,in}(\xi)} \right] \cdot \frac{|\Psi_{out}(z_0)|^2}{|\Psi_{in}(0)|^2} \quad (7)$$

여기서, 전송 모드가 준-TE 모드 ($x = te$)인 경우 $Y=V$ (모드 전압), 준-TM 모드 ($x = tm$)인 경우 $Y=I$ (모드 전류)을 나타내며, $k_{z,in}$ 과 $k_{z,out}$ 는 각각 입력 영역과 출력영역에서의 그 전파상수를 표시한다. 모드의 전파 방향 (z -축)에 따른 위의 식 (7)을 묘사하는 그 등가 전송선로가 그림 3에 도시되어 있다.

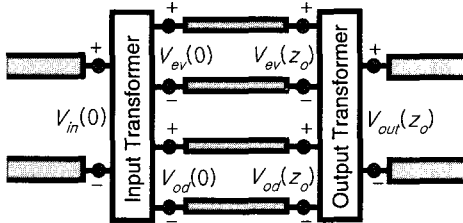


그림 3. 그림 1(c)에 나타난 2-D 방향성 결합기의 그 등가 전송선로.

Fig. 3. Equivalent transmission-line network of 2-D coupler shown in Fig. 1(c).

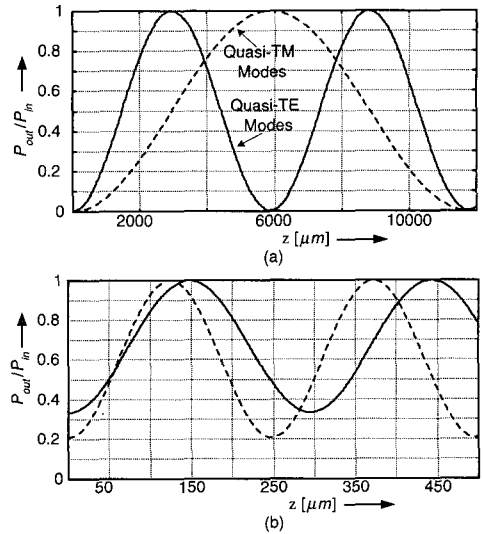


그림 4. 전파 거리에 따른 준-TE/TM 모드의 결합효율: (a) $S=4$ mm, (b) $S=0$ mm. 여기서, $t=0.4$ mm .

Fig. 4. Coupling efficiencies of quasi-TE/TM modes as a function of distance: (a) $S=4$ mm, (b) $S=0$ mm, where $t=0.4$ mm.

III. 수치 해석

입력 경계면에서 입사된 모드는 전송 채널들의 굴절률을 결정하고 그 굴절률에 의존하는 중첩모드를 결합 영역에 생성한다. 생성된 중첩모드는 임의의 결합길이

$$L_c = \frac{\pi}{K_{z,ev} - K_{z,od}} \quad (8)$$

을 진행한 후에 다른 채널을 통하여 최대전력을 전송한다. 그림 4는 그림 1에 주어진 rib형 광 방향성 결합기의 동작 파장이 $\lambda=1.55$ mm 일 때 전파하는 준-TE/TM 모드들의 그 결합효율을 보여준다. 이 결합효율은, 그림 1(c)에 보여준 2-D 전송구조를 구성하는 유효 굴절률 $n_f/2$ 의 기준 채널에서 모드가 입사하고 유효 굴절률 $n_f/4$ 의 보조 채널에서 모드가 출력된다는 가정하에서 얻은 결과이다. 그림에서 보듯이, 준-TE 모드는 $L_c=2938$ mm에서 최대 전력전송이 발생하

였으며, 준-TM 모드는 $L_c=5891\text{ mm}$ 에서 그와 같은 현상이 나타났다.

그때, cladding 층의 두께를 $t=0.4\text{ mm}$ 로 고정시키고 rib형 전송 채널들의 간격 S 에 따른 결합길이의 변화를 다른 해석법들과 비교를 위하여 표 1, 2에 요약하였다. 표에서 보듯이, 준-TE 모드의 경우 $S=0\text{ mm}$ 에서 입사된 전력은 결합길이 $L_c=147\text{ mm}$ 에서 기준 채널로부터 보조 채널로 전송되었으며, 그때 결합효율은 약 60%로 나타났다. 한편, $S=4\text{ mm}$ 전송 구조에서는 $L_c=2938\text{ mm}$ 에서 99%이상 완전 전력 결합이 발생하였다. 유사하게, 준-TM 모드의 경우도 $S=4\text{ mm}$ 일 때 99%이상의 최대 전력 전송이 이루어졌다. 즉, 결합효율에 대한 광 전력 전송은 rib형 전송 채널들의 간격 S 에 따라 민감하게 변하며, 같은 전송 효율을 얻기 위한 결합길이는 준-TM 모드가 준-TE 모드보다 상당히 길게 나타났다.

표1.준-TE 모드에 대한 결합길이의 비교 (단위: μm).
(Table 1. Comparison of coupling lengths for quasi-TE modes.)

간격 Method	s=0	s=1	s=2	s=3	s=4
EIM	147	309	656	1388	2922
VFEM	147	309	666	1185	2310
	135	342	677	1330	2590
ST	-	325	672	1392	2927
EDM+MYLT	147	310	658	1394	2938

표 2. 준-TM 모드에 대한 결합길이의 비교 (단위: μm).

(Table 2. Comparison for quasi-TM modes.)

간격 Method	s=0	s=1	s=2	s=3	s=4
EIM	124	324	855	2254	5934
CEIM	112	-	-	-	-
SFEM	108	375	918	2220	5236
VFEM	112	369	941	2570	6410
EDM+MTLT	124	323	851	2240	5891

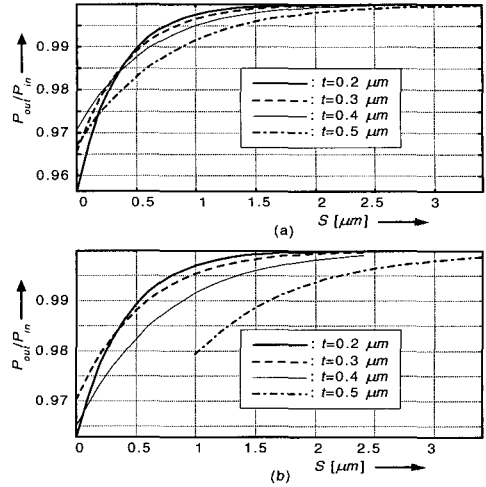


그림 5. 광학 변수 S 와 t 의 변화에 따른 모드의 결합효율: (a) 준-TE, (b) 준-TM.

Fig. 5. Coupling efficiency of modes along the variation of optical parameters S and t : (a) quasi-TE, (b) quasi-TM

실제, rib형 광 방향성 결합기를 설계할 때 전력 전송 효율과 최대 전력 전송을 위한 결합길이는 표 1, 2에 잘 나타나 있듯이 상호 보완적인 관계를 가지므로, 요구되는 전송 조건에 따라 그 조건에 맞는 결합기를 설계 생산하는 것이 합리적이다. 그러므로, 본문에서 제안한 해석법 (EDM+MTLT)에 의하여 얻어진 결과들은 다른 해석법들로부터 산출된 결과들과 근사적으로 잘 일치 하였으며, 특히 EIM으로 구한 결과들과 유사하였다.

더욱이, 광 집적소자를 설계할 때 중요한 요인 중의 하나는 전력전송을 극대화하면서 어떻게 소자를 소형화, 경량화하는나 하는 것이다. 이를 실현하기 위하여 우리는 cladding 층의 두께 t 를 변화시키며 rib형 전송 채널들의 간격 S 에 따른 전력 전송을 분석하였다. 분석 결과, 준-TE/TM 모드는 $t=0.1\text{ mm}$ 이하에서는 전과특성이 좋지 않았으며, $t=0.2\text{ mm}$ 와 $S=2\text{ mm}$ 에서 두 모드는 최대 효율과 최소 결합 길이를 갖는 최적 설계 치를 나타내었다. 그에 대한 종합적 결과가 그림 5에 도시되었으며, 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) $t=0.2 \mu\text{m}$ 의 경우, $S=2 \mu\text{m}$ 에서 전송 효율은 거의 100%로 수렴하다가 $S=3.6 \mu\text{m}$ 보다 큰 간격에서부터 효율은 급격히 떨어졌다.
- 2) $t=0.3 \mu\text{m}$ 의 경우, $S=4.75 \mu\text{m}$ 에서부터 효율이 떨어지는 것을 제외하고는 1)의 경우와 유사하였다.
- 3) $t=0.4, 0.5 \mu\text{m}$ 의 경우, 간격의 증가에 관계 없이 $S=2 \mu\text{m}$ 이상부터 거의 100%로 수렴 하였다.

이상에서 언급하였듯이, cladding의 두께 t 가 작을 수록 결합 효율은 향상되며, 방향성 결합기에서 최대 전력전송에 필요한 결합 길이도 줄어들었다. 이와 병행하여 rib형 광 채널간의 간격을 나타내는 파라미터 S 도 마찬가지로 감소하였다. 즉, 결합 길이와 층들의 길이와 폭이 작아진다는 것은 광 집적소자를 경량화하고 소형화하기 위한 중요한 요인이 된다. 본 논문에서 선택한 최대 전력전송 조건을 만족하면서 동시에 층들의 크기와 길이가 최소가 되는 최적설계 변수는 각각 $t=0.2 \text{ mm}$, $S=2.0 \text{ mm}$ 이었다. 이는 기존의 해석법[5, 6]에서 제안한 수치보다 다소 감소한 값들이었다.

마지막으로, 최적설계를 위하여 선택한 $t=0.2 \text{ mm}$, $S=2.0 \text{ mm}$ 에서 rib형 전송 채널을 통하여 전송되는 증첩모드의 그 3-D 필드분포를 준-TE/TM 모드에 대하여 각각 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이, 입력 파장이 1.28 mm 인 준-TE 모드의 경우 (그림 6(a)) 결합길이는 약 1650 mm 로 나타났으며, 입력 파장이 1.32 mm 인 준-TM 모드의 경우 (그림 6(b)) 결합길이는 약 1300 mm 로 나타났다. 이는 rib형 방향성 결합기를 설계할 때 그 광학적 변수들을 적절히 잘 선택하면 주파수 변화에 대한 무의존성 광 대역 rib형 결합기의 설계가 가능함을 나타내는 것이다.

IV. 결 론

유효 유전체 방법 (EDM)을 결합한 모드 전송선로 해석법 (MTLT)을 적용하여 함몰된 도파층을 갖는 rib형 광 방향성 결합기의 전력전송 특성을 수치 해석하였다. 해석결과 cladding의 두께 t 와 rib형 전송 채널들의 간격 S 가 각각 $t=0.4 \text{ mm}$, $S=4 \text{ mm}$ 일때, 준-TE 모드의 경우 그 전력은 $L_c=2938 \text{ mm}$ 에서 99%이상 전송

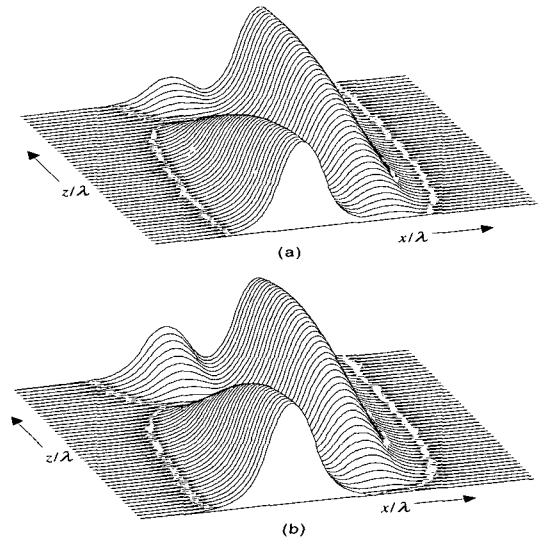


그림 6. Rib형 도파로에서의 준-TE/TM 모드들의 전력 전송.

Fig. 6. Power transfer of quasi-TE/TM modes at rib-type waveguides.

되었고, 준-TM 모드의 경우는 $L_c=5891 \text{ mm}$ 에서 그 같은 전송 특성을 보여주었다. 또한, 광 집적소자 설계시 중요한 요소들인 소형화, 경량화, 최대 전력전송을 위한 $t=0.2 \text{ mm}$, $S=2 \text{ mm}$ 가 수치 해석을 통하여 결정되었다. 결국, 본 논문에서 제안한 유효 유전체 방법 (EDM)을 결합한 MTLT는 rib형 광 방향성 결합기의 그 결합 특성을 해석하고 설계하는데 있어 유용한 해석법으로 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] A. J. Marcetili, and A. A. Hardy, The azimuthal effective index method, *IEEE J. Quantum Electronics*, QW-24, pp. 766~774, 1988.
- [2] Z. Mao, W. P. Huang, Analysis of Optical Rib Waveguides and Couplers with Buried Guiding Layer, *IEEE J. Quantum Electronics*, Vol. 28, No. 1, pp. 176~183, January 1992.
- [3] Working Group 1, COST 216, Comparison of different modeling techniques for longitudinally invariant integrated optical waveguides, in *IEE Proc*,

Vol. 136, pp. 273~280, 1989.

- [4] W. P. Huang, H. A. Haus, and H. N. Yoon, Analysis of buried channel waveguides and couplers: Scalar solutions and polarization correction, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 8, pp. 642~648, 1990.
- [5] S.-T. Peng and A. Oliner, Guidance and Leakage Properties of a Class of Open Dielectric Waveguides: Part I-Mathematical Formulations, *IEEE Trans. MTT-29*, No. 9, pp. 843~855, 1981.

- [6] 호광춘, 이원석, 김영권, "비선형 방향성 결합기의 전력전송," *春季 마이크로파 및 電波學術大會 論文集*, Vol. 21, No. 1, 1998년 5월.
- [7] 호광춘, 김준환, 김영권, "광통신용 광 결합기의 모드 전송선로 해석법," *대한전자공학회 논문*, Vol. 35-D, 7권, pp. 25~31, 1998.

— 저 자 소 개 —



李元錫 (學生會員)

1997년 2월 호서대학교 전자공학과 졸업. 1999년 2월 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).

주관심분야: 광통신용 소자설계 및 특성해석

盧光春 (正會員)

제 2권 제 1호 논문 98-01-17 참조.

현재 한라대학교 전자공학과 전임강사.

金 暎 權 (Senior Member)

제 2권 제 1호 논문 98-01-17 참조.

현재 건국대학교 전자공학과 교수.