

세 채널 Rib형 결합기를 이용한 광 편파기 설계

Design of Optical Polarizer using Three-channel Rib-type Couplers

洪權義*, 李元錫**, 扈光春***

Kwon-Eui Hong*, Won-Seock Lee**, Kwang-Chun Ho***

요 약

유효 유전체 해석법에 기초한 정확한 모드 전송선로 이론이 세 채널 rib형 광 방향성 결합기의 편파된 빔 분리를 분석하기 위하여 소개되고 발전되었다. 또한, 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 보이기 위하여 상용 소프트웨어인 BeamPROP를 이용하여 그 결과들을 비교 검토하였다. 분석결과, 하나의 채널을 통하여 rib형 광 방향성 결합기에 입사된 혼성(hybrid) 모드들은 임의의 편파거리를 진행한 후에 상, 하 채널을 통하여 잘 분리됨을 알 수 있었다.

Abstract

A rigorous modal transmission-line theory (MTLT) based on effective dielectric method (EDM) is introduced and developed to analyze the polarization beam-splitting of optical rib-type directional coupler with three guiding layers. Furthermore, to confirm the validity of approach proposed in this paper, we compare our results with those ones of BeamPROP, which is a commercial software package used widely. Consequently, the numerical results reveal that the hybrid modes incident into a guidingchannel of rib-type coupler .are split well through upper and lower guiding channels in a polarization length.

Key word : Hybrid-Modes, Rib-Type Polarizer, Modal Transmission-Line Theory

* : 金浦大學 電子情報系列 電子專攻

(Dept. of EI Eng., Kimpo College)

** : 한백 電子(R&D Center, HanBack Electronics)

接受日:2002年 2月20日, 修正完了日:2002年 7月 2日

*** : 漢城大學校 情報通信工學科

(Dept. of IC Eng., Hansung Univ.)

※ 본 연구는 김포대학 연구 진흥비 지원에 의해 수행된 연구 결과임.

I. 서 론

오늘날 광통신용 소자의 설계 및 그 특성해석을 위하여 CMT (Coupled-Mode Theory)[1] 이나 BPM (Beam Propagation Method)[2] 과 같은 근사적 해석법

들이 널리 사용되고 있으며, 그 시뮬레이션 툴들이 상용화되어 있다. 비록, 결합력이 약한 등방성 결합기의 설계 및 특성해석에 이들 해석법들은 정확한 결과를 제공하지만, 광 rib형 구조의 다 채널

(Multi-channel) 결합기(3개 이상의 채널로 구성된 결합기)처럼 3개 이상의 전송 모드를 지원하는 전송 채널의 그 결합 특성을 정확하게 분석하고, 설계하기란 매우 어려운 일이다.

이를 위하여, 본 논문에서는 수치해석 시 다른 상용 해석법들보다 간결하고 쉽게 다채널 광 rib형 방향성 결합기의 광학적 특성 및 그 최적 설계조건을 얻을 수 있는 정확한 모드 전송선로 이론 (Rigorous Modal Transmission-Line Theory: MTLT)을 소개하고자 한다.

더욱이, 본 논문에서 제안한 MTLT의 그 타당성을 입증하기 위하여 널리 사용되고 있는 상용 소프트웨어인 BeamPROP[3]를 이용하여 세 채널 광 rib형 방향성 결합기의 그 결합특성을 비교 검토하였다.

결국, 제안한 해석법을 이용하여 한 채널을 통하여 입사된 혼성 모드 (즉, E_{nm}^x, E_{nm}^y 모드)들이 임의의 편파거리 (polarization length)를 진행한 후에 광 rib형 방향성 결합기의 상, 하 채널을 통하여 분리되는 혼성모드 편파기를 설계하고 그 특성을 분석하였다.

II. 편파기 모드의 전송 특성

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 세 채널 Rib형 광 결합기가 그림 1(a)에 자세하게 나타나있다.

그림에서 보듯이, 3-D 방향성 결합기는 두께 $d = 0.2 \mu\text{m}$, 굴절률 $n_f = 3.38$ 의 전송 채널과, 굴절률 $n_a = 3.17$ 의 cladding 층으로 구성되었으며, 기판 (substrate)과 rib형 도파관은 cladding층과 같은 굴절률을 갖도록 설계하였다. 여기서, rib형 도파관들 사이의 폭은 $W = S = 2.4 \mu\text{m}$, 그 높이는 $h = 4 \mu\text{m}$ 로 선택하였다.

그때 rib형 광 결합기에 존재하는 모드는 본질적으로 전파 방향에 따라 준 (quasi)-TE 모드와 준-TM 모드로 분류되며, 만일 고려되어 지는 전파방향이 z -축이라면 우리는 이 모드들을 각각 E_{nm}^x 형, E_{nm}^y 형 혼성모드라 정의한다.

그림 1(a)에서 파장 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 의 모드가 rib형 방향성 결합기의 y -축을 따라 입사한다고 가정하자. 이 때, y -축 방향에서의 전파상수는 다음과 같다.

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

여기서, $\epsilon_j = n_j^2$ 는 j -번째 전송 층의 그 유전율을 나타내며, β 는 yz -평면상의 그 전파 상수이다. 그때, 아래와 은 모드 전송선로 이론의 횡 방향 공진 조건을 이용하면, 그 전파 상수 β 가 결정된다[4].

$$\left| Z_{up}(\beta) + Z_{dn}(\beta) \right| = 0 \quad (2)$$

여기서, $Z_{up}(\beta)$ 과 $Z_{dn}(\beta)$ 은 x -축 상의 임의의 위치에서 각각 위와 아래로 본 그 임피던스를 나타내며, 그 축을 따라 구성된 등가 전송선로의 그 전파상수와 특성 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_j = \begin{cases} \frac{\omega \mu_0}{k_x^{(j)}} & \text{for } E_{nm}^x \text{ mode} \\ \frac{k_x^{(j)}}{\omega \epsilon_0 \epsilon_j} & \text{for } E_{nm}^y \text{ mode} \end{cases} \quad (3)$$

결국, xy -평면 상에서 y -축 방향으로 계산된 식 (2)의 고유치 문제에 기초한 각 영역들의 그 유효 굴절률 (n_{eff})을 이용하여 우리는 그림 1(b)의 등가 2-D 구조로 얻을 수 있다. 결국, 등가화된 이 2-D 전송구조를 이용하여 평면 광 방향성 결합기와 같이 혼성 모드들 간의 결합특성을 분석할 수 있다.

이때 파장 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 동작하는 E_{nm}^x 모드에 대한 그 분산 곡선(dispersion curve)이 그림 2에 자세하게 주어졌다. 그림에서 보듯이 가운데 채널의 두께 t 가 $0.6 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 일 때 오직 3개의 모드가 여기되어 전파한다. 그러므로, 본 논문에서는 오직 3개의 중첩모드들 사이의 결합특성을 분석하기 위하여 입력 혼성모드의 편파특성이 가장 좋은 (전력전송이 최대가 되는) 두께 $2.4 \mu\text{m}$ 에 대하여 그 결합효율을 분석하였다. 물론, 다른 광학적 특성을 갖는 (예를 들어, 광 필터나 광 분배기 같은) 광 소자를 설계할 때 가운데 도파관의 두께 t 를 다른 값으로 설정할 수 있다. 그때에는 그 광 전송특성에 영향을 미치는 모든 가능한 전파 모드의 개수가 변하며, 그 수는 그림 2의 분산곡선으로부터 결정된다.

III. 편파기 모드의 결합 효율

그림 1(b)에서 보듯이 방향성 결합기를 통하여 전파하는 필드는 x -축 상의 변화가 없고, 입력 모드는 3

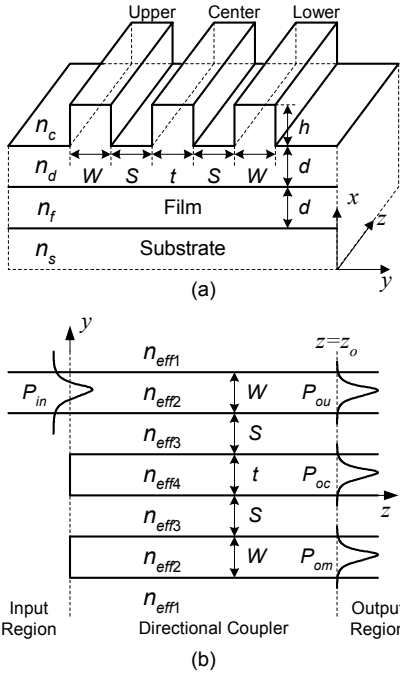


그림 1. Rib형 광 방향성 결합기:
(a) 3-D 전송 구조, (b) 유효 굴절률에 기초한 2-D 전송 구조.

Fig. 1 Optical directional coupler of rib-type: (a) 3-D guiding structure, (b) 2-D guiding structure based on effective refractive index.

개의 평행 전송 채널중의 한 채널을 통하여 입사 되어 그 중 한 채널을 통하여 전송된다고 가정하였다. 그때, 식(2)에 주어진 등가 전송선로의 횡 방향 공진조건을 전파상수 k_z 에 대하여 적용하면 입/출력 단에서의 E_{nm}^x 모드에 대한 정확한 횡 방향 전계 성분은[5]

$$E_r(y, z) = V_r(z)e_m(y) \quad (4)$$

와 같으며, 방향성 결합기에서 전파하는 그 전계는 선형적으로 결합된 3개의 중첩모드로 표현된다.

$$E_r(y, z) = \sum_{m=1}^3 V_m(z)e_m(y) \quad (5)$$

여기서, r 은 입/출력 영역에서 각각 in 또는 out ,

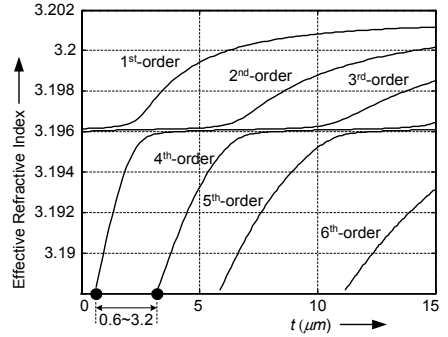


그림 2. 가운데 채널의 두께 t 에 따른 유효 굴절률의 변화.

Fig. 2 Variation of effective refractive index along the thickness t of center channel.

$V_m(z)$ 는 m -번째 모드의 모드 전압, 그리고 $e_m(y)$ 는 m -번째 모드의 횡방향 필드분포를 각각 나타낸다.

결국, 입력 경계면 ($z=0$)에서 식 (4)와 (5)의 전계 분포에 대하여 경계조건을 적용하면 다음과 같다.

$$V_{in}(0)e_m(y) \cong \sum_{m=1}^3 V_m e_m(y) \quad (6)$$

여기서, V_{in} 은 입력 단에 걸리는 모드 전압이며, e_{in} 은 입력 단에서 입사되는 횡 방향 필드 분포이다. 또한, 결합기의 입력 단에서 여기된 전송 모드는 길이 $z=z_0$ 만큼 진행한 후 출력 단에서 아래의 경계조건을 만족하며 출력된다.

$$V_{out}(z_0)e_{out}(y) \cong \sum_{m=1}^3 V_m(0)e^{ik_{z,m}z_0}e_m(y) \quad (7)$$

여기서, $k_{z,m}$ 은 각 중첩 모드들의 그 전파 상수를 나타낸다. 이때 위의 식(7)에 E_{nm}^x 모드의 직교조건[5]을 적용하고 풀면 다음과 같다.

$$V_m(0) = T_{in,m} V_{in}(0) \quad (8)$$

여기서, 아래 첨자 $m=1,2,3$ 을 나타내며 입력 변환상

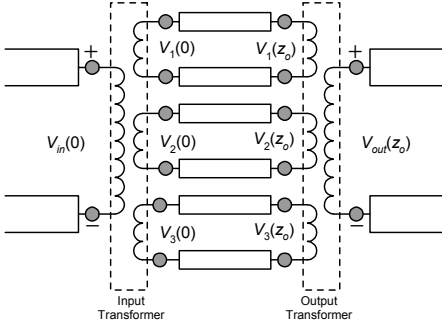


그림 3. 결합효율을 유도하기 위하여 구성된 등가 전송선로.

Fig. 3 Equivalent transmission-line network to define the coupling efficiency.

수 (transformation constant) $T_{in,m}$ 은 아래와 같이 주어진다.

$$T_{in,m} = \int_{CS} e_{in}(y)e_m^*(y)dy \quad (9)$$

그와 같이 출력 정규화 조건을 적용하여 식 (7)을 출력 전압에 대하여 풀면

$$V_{out}(z_o) = \sum_{m=1}^3 T_{m,out} V_m(0) e^{ik_{z,m}z_o} \quad (10)$$

이고, 그 출력 변환상수 $T_{m,out}$ 은

$$T_{m,out} = \int_{CS} e_m(y)e_{out}^*(y)dy \quad (11)$$

과 같이 정의된다. 결국, 식(8)을 식(10)에 대입하고 정리하면 입력전력에 대한 출력전력의 비율을 나타내는

E_{nm}^x 모드의 결합효율을 정의할 수 있다.

$$\eta_{E_{nm}^x} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \text{Re} \left(\frac{k_{z,out}^{(x)}}{k_{z,in}^{(x)}} \right) \left| \frac{V_{out}(z_o)}{V_{in}(0)} \right|^2 \quad (12)$$

여기서, $k_{z,in}^{(x)}$ 과 $k_{z,out}^{(x)}$ 은 각각 입/출력 영역에서 E_{nm}^x 모드의 전파상수를 나타낸다. 위의 식을 유도하기 위하여 지금까지 언급한 MTLT의 그 등가 전송선로가 그림 3에 자세하게 묘사되어 있다.

같은 방법으로 E_{nm}^y 모드가 전파될 경우 z -축을 따

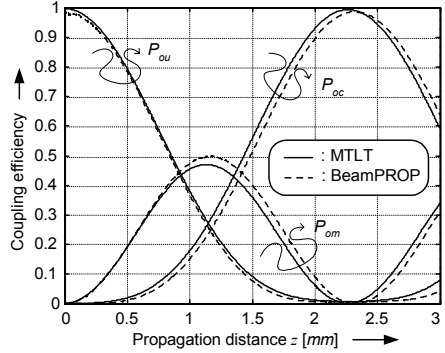


그림 4. 상 채널을 통하여 입사한 E_{01}^x 모드에 대한 결합효율의 비교.

Fig. 4 Comparison of the coupling efficiency for E_{01}^x mode incident through upper guide.

라 진행하는 식 (4)와 (5)의 횡 방향 전계 분포는 횡 방향 자계분포를 나타내는 모드 전류 $I_{in,out}$ (modal current)와 자계성분의 모드 함수 $h_m(y)$ (modal function)로 대체된다[5]. 각 영역에서 정의된 이 횡 방향 자계 분포들 사이에 존재하는 E_{nm}^y 모드의 정규화 직교조건과 출력 정규화 조건을 이용하면, E_{nm}^x 모드에서와 같은 과정을 통하여 다음과 같은 결합효율을 정의할 수 있다.

$$\eta_{E_{nm}^y} = \text{Re} \left(\frac{k_{z,out}^{(y)}}{k_{z,in}^{(y)}} \right) \left| \frac{I_{out}(z_o)}{I_{in}(0)} \right|^2 \quad (13)$$

여기서, $k_{z,in}^{(y)}$ 과 $k_{z,out}^{(y)}$ 은 각각 입/출력 영역에서 E_{nm}^y 모드의 전파상수이다.

IV. 수치 해석

본 장에서는 2. 3장에서 언급한 MTLT를 이용하여 3개의 평행 전송 채널로 구성된 방향성 결합기의 그 전력 전송효율을 수치해석하였고, 그에 기초하여 혼성 모드의 편파기를 설계하였다. 또한, 본 논문에서 제안한 해석법의 타당성을 보이기 위하여 방향성 결합기의 광학적 특성 해석에 주로 사용되는 상용 소프트웨어인

BeamPROP의 결과와 비교 검토하였다.

그림 4는 가운데 도파관 두께 t 가 최적의 결합조건 즉, $2.4 \mu\text{m}$ 일 경우에 그 결합효율을 나타낸 그림이다. 여기서, 기본 모드인 E_{01}^x 모드가 상 채널을 통하여 입사되었다고 가정하였다. 그림에서 보듯이, 본 논문에서 제안한 MTLT를 사용하여 얻어진 각 출력 도파로들의 결합효율과 상용 소프트웨어인 BeamPROP의 결과가 매우 유사함을 알 수 있다.

또한, 본 논문에서 도시하지 않았지만, 가운데 도파관을 통하여 입사된 경우의 결합효율을 분석한 결과, BeamPROP의 경우 측면 도파관들의 결합효율은 서로 같았지만(즉, $P_{ou} = P_{ob}$), MTLT의 경우에는 약간 다른 효율 차이를 보였다. 이는 방향성 결합기에서 서로 결합하는 우 (even) 함수 형태의 중첩모드들이 정확하게 가운데 채널에서 상쇄되지 않아 발생하는 현상이다.

더욱이, 같은 구조에 대하여 모드가 측면 도파관을 통하여 입사된 경우의 그 결합효율은 모드 사이의 결합이 약해짐에 따라 BeamPROP의 결과들은 본 논문에서 제안한 해석법인 MTLT의 결과에 수렴하였다.

결국, 수치 해석한 결과들을 종합해 보면 MTLT가 FD-BPM 이론에 기초한 BeamPROP보다 더욱 정확한 해석법임을 알 수 있다. 그리고, 두 해석법의 수치해석 시간이 상당한 차이를 보였다. 즉, 같은 결과를 얻기 위하여 MTLT의 경우보다 BeamPROP의 경우 수십 배의 시간이 더 걸렸다.

마지막으로, 가운데 도파관의 두께가 $t = 2.4 \mu\text{m}$ 인 경우에 세 채널 광 rib형 방향성 결합기를 이용한 편파 특성을 MTLT를 이용하여 분석하였다. 그림 5에서 보듯이, 상 채널을 통하여 입사된 E_{01}^x , E_{10}^y 모드들은 방향성 결합기에서 편파거리 $z_0 = 6.4 \text{ mm}$ 를 진행한 후에 E_{01}^x 모드는 하 채널을 통하여 출력되고, E_{10}^y 모드는 상 채널을 통하여 출력됨을 잘 나타내고 있다. 즉, 전파거리 z -축에서 rib형 방향성 결합기의 길이가

$$L_{pol} = \frac{L_x L_y}{L_x - L_y} \quad (14)$$

와 같은 조건을 만족하는 편파거리 L_{pol} 와 같다면, 이 소자는 혼성모드들을 분리하는 광통신용 편파기로서 사용할 수 있다. 이에 대한 도식적인 그림이 그림 6에 자세하게 나타내었다. 여기서, L_x 와 L_y 는 다음과 같이 각 모드의

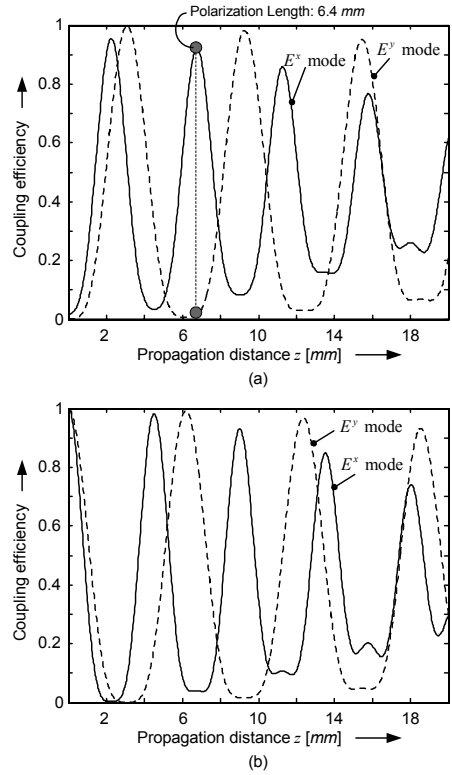


그림 5. 전파거리에 따른 E_{01}^x 모드와

E_{10}^y 모드들의 결합효율 변화:
(a) 하 채널과, (b) 상 채널을 통하여 출력되는 경우.

Fig. 5 Variation of the coupling efficiency along propagation distance for E_{01}^x and E_{10}^y modes: Output power emitted through (a) lower channel, and (b) upper channel.

결합길이를 나타낸다.

$$L_{(x,y)} = \frac{\pi}{|k_{z,3}^{(x,y)} - k_{z,1}^{(x,y)}|}$$

V. 결 론

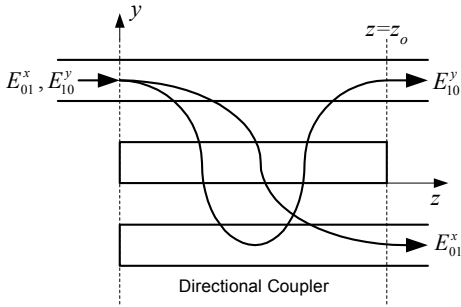


그림 6. 광 rib형 결합기에서 발생하는 편파 특성의 도시적인 그림.

Fig. 6 Schematic geometry of polarization beam-splitting occurred in optical rib-type coupler.

광 전송구조의 설계 및 특성을 분석하기 위하여 새롭게 발전된 모드 전송선로 해석법(MTLT)을 이용하여 세 채널로 구성된 rib형 방향성 결합기의 결합특성과 그 편파특성을 수치해석하였다. 그 결과 상위 채널을 통하여 입사된 혼성모드들은 편파거리 $z_0 = 6.4 \text{ mm}$ 를 진행한 후에 상/하 채널을 통하여 잘 분리되었다.

또한, 본 논문에서 제안한 해석법의 타당성을 검증하기 위하여 상용 소프트웨어인 BeamPROP의 결과와 비교 검토하였다. 비교결과, 강한 결합 특성을 나타내는 전송 구조에서 BeamPROP의 수치 해석적 결과에 대한 정확성은 조금 낮았으며, 전송 채널 사이의 간격이 넓어짐에 따라 (약한 결합 특성의 전송 구조에서) 두 해석법의 결과는 서로 잘 수렴하였다. 특히, 수치해석에서 중요한 고려사항중의 하나인 시뮬레이션 시간은 상당한 차이를 나타내었다. 예를 들어, P800 MHz PC에서 그림 4의 결과를 얻기 위하여 걸린 시간은 본 해석법의 경우 약 1분, BeamPROP의 경우 약 1시간 정도가 소요되었다.

참 고 문 헌

[1] Z. Mao, W. P. Huang, "Analysis of Optical Rib Waveguides and Couplers with Buried Guiding Layer", IEEE J. Quantum Electronics, vol. 28, pp. 176~183, 1992.

[2] G.. R. Hadley, "Transparent boundary condition for the beam propagation method," IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, pp. 363~370, 1992.

[3] <http://www.rsoftinc.com/beamprop.htm>

[4] 호광춘, 김준환, 김영권, "광통신용 광 결합기의 모드 전송선로 해석법," 대한전자공학회 논문, 제 35-D호, 7권, pp. 25~31, 1998.

[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, vol. 29, no. 9, pp. 843~855, 1981.

저 자 소 개

洪權義(正會員)

제5권2호 논문 01-02-02 참조

李元錫(正會員)

제3권1호 논문 99-01-14 참조

扈光春(正會員)

제5권2호 논문 01-02-02 참조