

반사계수를 고려한 광 결합기의 결합효율

호 광 춘*, 윤 인 국**, 박 재 서**, 김 영 권**
 *: 한라대학교 전자공학과, **: 건국대학교 전자공학과
 강원도 원주시 흥업면 흥업리 산 66 번지
 kwangho@hit.halla.ac.kr

Coupling Efficiency of Optical Couplers considering Reflection Coefficient

Kwang-Chun Ho*, In-Kuk Yun**, Jai-Seo Park**, Yung-Kwon Kim**
 *: Halla Institute of Technology, **: Kon-Kuk University

Abstract

Using modal transmission-line theory (MTLT), we evaluate the power coupling of optical directional coupler composed by two parallel guiding slabs. The numerical results reveal that maximum power transfer occurs at a novel wavelength λ_{opt} in which the excitation ratio of supermodes at input boundary is equal to each other, and it is generally different from minimum gap λ_{min} .

I. 서론

결합특성을 이용한 광 전송 소자들은 초고속 광통신을 위한 집적광학 (integrated optics) 분야에서 오늘날 큰 관심을 끌고있는 소자들이다. 그 소자들 중의 하나가 평행하게 놓인 두 슬랩 (slabs)으로 구성된 방향성 결합기이다. 임의의 한 슬랩에서 입사된 전력이 대칭성을 갖는 우 (even)모드와 비 대칭성의 기 (odd)모드 사이의 전력결합 (power coupling)으로 인하여 결합길이 (coupling length)를 진행한 후 다른 슬랩으로 전력을 전송하는 이 전자기학적 특성은 근사적^[1, 2] 또는 정확한 해석법^[3]들에 의하여 분석되고 연구되어 왔다. 비록, 이들 해석법들은 정확한 수치 해석적 결과들을 제공하지만 입/출력 경계면에 형성된 불연속성 (discontinuity)의 영향은 매우 작다고 가정하고 그 결합특성을 분석하였다.

그러므로, 본 논문에서는 입/출력 경계면의 불연속성을 고려한 정확한 모드 전송선로 해석법 (MTLT)을 이용하여 결합기의 최대 전력 전송을 위한 조건을 분석하였다. 이는 손실/이득을 포함하는 물질로 구성된 광

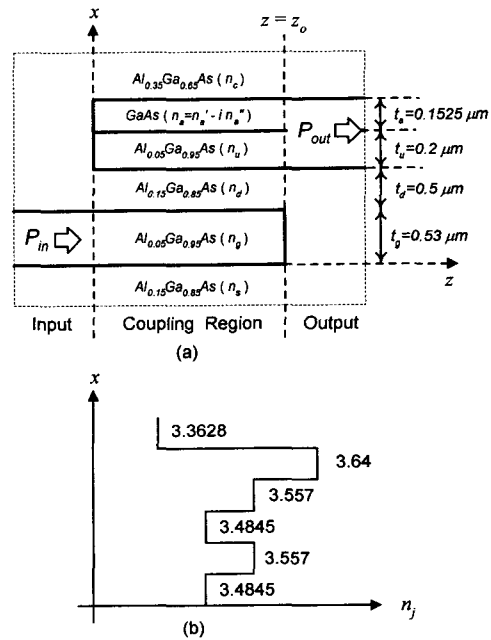


그림 1. (a) 광 방향성 결합기와 (b) 그 굴절률.
 Fig. 1. (a) Geometry of optical directional coupler, and (b) the corresponding refractive index.

방향성 결합기들의 결합효율 (coupling efficiency)을 해석하기 위하여 최근 Ho^[3]에 의하여 적용되고 발전되고 있는 해석법에 기초한 것이다.

그림 1(a)에서 보듯이 설계된 결합기는 그 전송 채널중의 하나가 이득을 갖는 GaAs 물질로, 다른 전송 층 (layers)들은 $Al_xGa_{1-x}As$ 물질로 구성된 전송 구조를 갖는다. 또한, Sellmeier 공식^[4]을 이용하여 계산된 각 전송

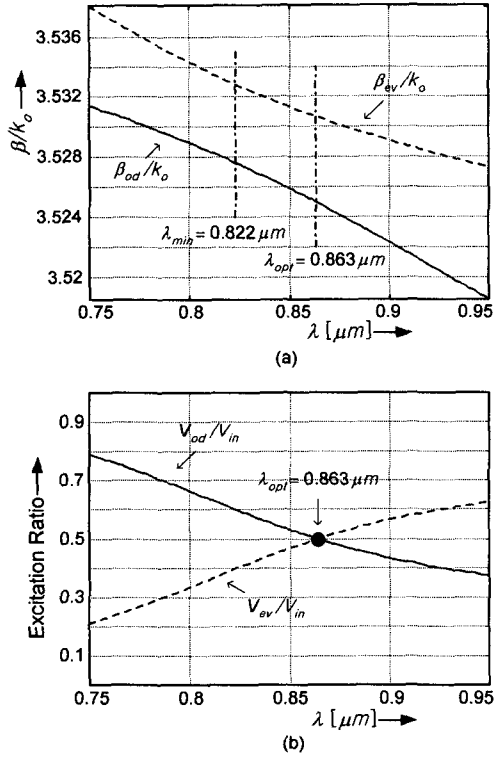


그림 2. (a) 산란 곡선과 (b) 입력 경계면에서 발생한 중첩모드의 여기율.
 Fig. 2. (a) Dispersion curves, and (b) the excitation ratio occurred at input boundary.

채널들의 그 굴절률 분포를 그림 1(b)에 자세하게 나타내었다.

II. 최대 전력전송 조건

가장 중요한 광 결합기의 특성중의 하나는 결합기를 통하여 전파하는 중첩모드의 그 전파상수를 결정하는 것이다. 모드 전송선로 해석법은 아래와 같이 경계치 문제에 기초한 횡 방향 공진조건을 이용한다^[3].

$$Y_{up} + Y_{dn} = 0 \tag{1}$$

여기서, Y_{up} 은 x 축상의 임의의 경계면에서 위로 본 그 어드미턴스 (admittance)를 나타내며 Y_{dn} 은 그 경계면에서 아래 방향으로 본 입력 어드미턴스를 나타낸다. 만

약, 하나의 전송 채널이 이득을 갖는다면 ($n''_z \neq 0$) 광 결합기는 능동 전송소자가 되며, 그때 전파상수는 이득을 갖는 복소수의 형태로 표현된다.

$$k_{z,v} = \beta_v + i\alpha_v \tag{2}$$

여기서, v 는 각각 우/기 모드일 때 ev/od 를 나타낸다. 그러므로, 전파상수의 허수 부 $\alpha > 0$ 는 광 결합기의 이득 성분을 나타내며 결합기를 통하여 진행되는 모드를 증폭한다.

식 (1)의 공진조건을 이용하여 정확하게 결정된 TE 모드에 대한 그 분산 곡선을 그림 2(a)에 나타내었다. 그림에서 보듯이 중첩모드의 그 전파상수 β_{ev} , β_{od} 는 $\lambda_{min} = 0.822 \mu m$ 에서 가장 근사한 값을 가지며, 본 논문에서 제안한 최대 전력전송을 위한 조건 $\lambda_{min} = 0.822 \mu m$ 와 상당히 다름을 보여준다. 이 조건은 입력 경계면에서 발생한 중첩모드의 여기율이 서로 같은 파장을 나타내며 다음 장에서 자세하게 언급될 것이다.

III. 전파 모드의 결합효율

하향 채널과 상향 채널 사이의 전력전송을 분석하기 위하여 y -축에 대한 모드 변화는 없고, 모드는 하향 채널을 통하여 입사된다고 가정하였다. 그때, 입력 ($r=in$) / 출력 ($r=out$) 영역에서의 TE 모드의 횡 방향 성분들은^[3],

$$E_r(x, z) = V_r(z) e_r(x), H_r(x, z) = I_r(z) h_r(x) \tag{3}$$

이고, 광 결합기에서 발생하는 중첩모드는 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} E_c(x, z) &= V_{ev}(z) e_{ev}(x) + V_{od}(z) e_{od}(x) \\ H_c(x, z) &= I_{ev}(z) h_{ev}(x) + I_{od}(z) h_{od}(x) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, $V(z)$, $I(z)$ 는 각각 모드 전압, 전류를 나타내며, $e(x)$, $h(x)$ 는 전송 모드의 그 모드 함수이다.

그러므로, 입력 경계면 ($z=0$)에서 식 (3)과 (4)의 경계조건과 전파하는 중첩모드의 전장 직교조건을 이용하면^[3] 결합기의 입력 단에서 발생한 중첩모드의 그 여기율은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_v(0) \\ I_v(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{m,v} & 0 \\ 0 & Q_{m,v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in}(0) \\ I_{in}(0) \end{bmatrix} \tag{5}$$

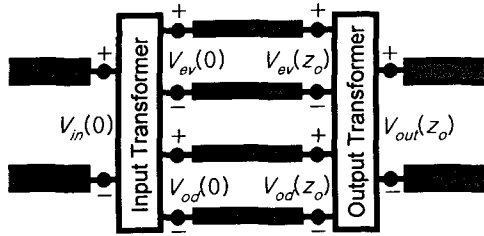


그림 3. 광 방향성 결합기의 동가 전송선로 망.
Fig. 3. Equivalent transmission-line network of optical directional coupler.

여기서, $P_{in,v}$ 와 $Q_{in,v}$ 는 전압, 전류 입력 변환상수를 나타낸다¹⁾. 만일, 입력 모드의 모드 전압이 1 [V]로 정규화 되었다고 가정하면 그때 V_{ev} 와 V_{od} 는 입력 모드 전압에 비례하여 결합기의 입력 단에서 생성된 우 모드와 기 모드의 그 전압비율을 의미한다. 이 두 여기율이 같은, 즉 서로 결합하는 중첩모드의 전력분포 비율이 서로 같은 λ_{opt} 에서 결합효율은 최대가 되며 우리는 가장 좋은 효율의 결합기를 설계할 수 있다. 결국, 길이 z_0 의 결합기에 대한 전류/전압 전달행렬

$$\begin{bmatrix} V_v(z_0) \\ I_v(z_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_v z_0) & iZ_v \sin(k_v z_0) \\ iY_v \sin(k_v z_0) & \cos(k_v z_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_v(0) \\ I_v(0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

와 출력 단에서의 경계조건

$$\begin{aligned} V_{ev}(z_0)e_{ev}(x) + V_{od}(z_0)e_{od}(x) &\cong V_{out}(z_0)e_{out}(x) \\ I_{ev}(z_0)h_{ev}(x) + I_{od}(z_0)h_{od}(x) &\cong I_{out}(z_0)h_{out}(x) \end{aligned} \quad (8)$$

을 이용하면, 아래와 같은 입/출력 전류/전압 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{out}^{(+)}(z_0) \\ I_{out}^{(+)}(z_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in}^{(+)}(0) + V_{in}^{(-)}(0) \\ I_{in}^{(+)}(0) - I_{in}^{(-)}(0) \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, 전송행렬의 각 요소들은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} m_{11} &= P_{in,ev}P_{ev,out} \cos(k_{ev}z_0) + P_{in,od}P_{od,out} \cos(k_{od}z_0) \\ m_{12} &= i\{Z_{ev}Q_{in,ev}P_{ev,out} \sin(k_{ev}z_0) + Z_{od}Q_{in,od}P_{od,out} \sin(k_{od}z_0)\} \\ m_{21} &= i\{Y_{ev}Q_{in,ev}P_{ev,out} \sin(k_{ev}z_0) + Y_{od}Q_{in,od}P_{od,out} \sin(k_{od}z_0)\} \\ m_{22} &= P_{in,ev}P_{ev,out} \cos(k_{ev}z_0) + P_{in,od}P_{od,out} \cos(k_{od}z_0) \end{aligned}$$

그때, 입력 단에서의 반사계수는

$$\Gamma_{in} = -\frac{(m_{21} + m_{22}Y_{in}) - Y_{out}(m_{11} + m_{12}Y_{in})}{(m_{21} - m_{22}Y_{in}) - Y_{out}(m_{11} - m_{12}Y_{in})} \quad (10)$$

으로 주어지고, 입력 전력에 대한 출력 전력의 그 비율

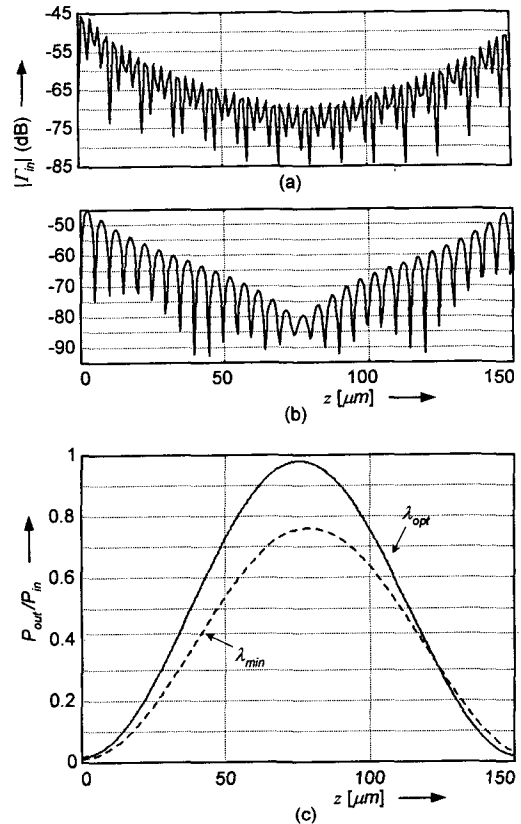


그림 4. (a) λ_{min} , (b) λ_{opt} 에서의 반사계수와 (c) 그 결합효율.

Fig. 4. Reflection coefficient for (a) λ_{min} , (b) λ_{opt} , and (c) the corresponding coupling efficiency.

을 나타내는 결합효율은

$$\eta = \frac{\text{Re}(k_{z,out})}{\text{Re}(k_{z,in})} \cdot \frac{|V_{out}^{(+)}(z_0)|}{|V_{in}(0)|} \quad (11)$$

로 정의된다. 위의 식들을 의미하는 그 동가 전송선로가 그림 3에 자세하게 도시되어 있다.

중첩모드의 분포율이 서로 같은 λ_{opt} 와 그 전파상수 사이의 차가 가장 근사한 λ_{min} 에 대하여 위의 식 (10)과 (11)에 주어진 그 반사계수와 결합효율을 수치해석하였다. 이득이 없는 ($n''_s = 0$) 광 결합기에 대한 해석 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 보듯이 λ_{min} 에서의 반사계수 (그림 4(a))는 전파거리에 따른 전파 감도(propagation sensitivity)가 일정한 반면, λ_{opt} 에서의 반사계

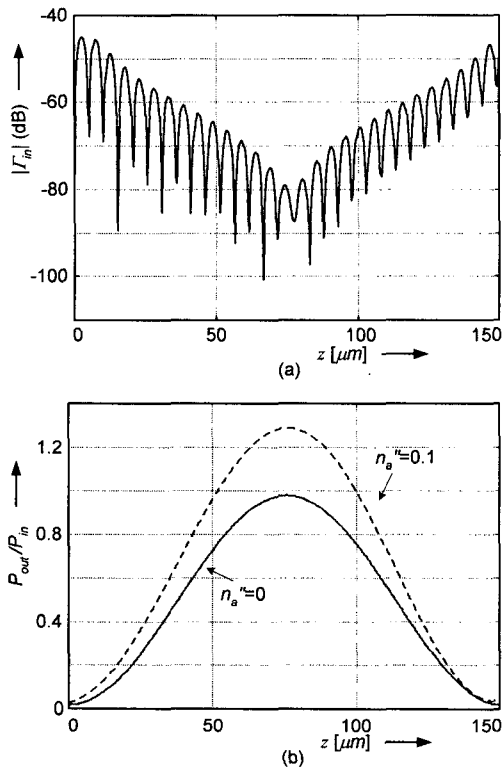


그림 5. (a) 이득 방향성 결합기의 반사계수와 (b) 그 결합효율. 여기서, 파장은 λ_{opt} 이다.

Fig. 5. (a) Reflection coefficient of gainy coupler, and (b) the corresponding coupling efficiency, where the operating wavelength is λ_{opt} .

수 (그림 4(b))는 임의의 전파거리에서 그 감도가 현저히 줄어들었다. 즉, 그림 4(c)에서 보듯이 전파 감도가 제일 작은 전파거리에서 최대 전력 (>95%)이 전송되며, 이와 같은 물리적 특성은 λ_{opt} 가 적절이 선택되었을 때 나타남을 알 수 있다.

또한, 상향 채널이 $n_a^*=0.1$ 의 이득을 갖을 경우 그 특성을 분석하여 그림 5에 나타내었다. 상향 채널의 복소수 굴절률에 기인하여 $n_a^*=0$ 의 경우보다 그 결합 길이가 다소 증가하였으며 이 능동 광 결합기를 통하여 진행하는 모드는 이득을 흡수하여 그림에서 보듯이 $\eta_{max}=1.25$ 로 증폭하였다. 그러나, 최대 결합효율을 위한 λ_{opt} 의 선택에 기인하여 그 반사계수의 전파 감도는 거

의 변함없이 일정하였다. 이와 같은 현상은 만일 우리가 전파거리에 따른 반사계수의 감도 변화가 적은 결합 길이를 선택한다면 그 길이에서 최대 전력전송을 얻을 수 있으며, 광 결합기의 전송구조가 이득/손실을 갖는 특성에 상관없이 좋은 방향성 결합기를 설계할 수 있음을 의미한다.

IV. 결 론

정확한 중첩모드와 입/출력 경계면에서의 모드 반사계수를 고려한 모드 전송선로 해석법을 이용하여 광 방향성 결합기의 결합효율을 해석하였다. 가장 좋은 결합특성을 나타내는 파장을 결정하기 위하여 광 결합기의 그분산곡선과 중첩모드의 여기율을 고려하였고, 이를 이용하여 최대 전력전송을 위한 파장 λ_{opt} 를 결정하였다. 더욱이, 전파거리에 따른 반사계수의 감도 변화에 기초하여 최대 전력전송을 위한 결합길이가 명확하게 결정될 수 있음을 보였다. 그러므로, 정확한 모드 전송선로 해석법은 다른 근사적 해석법으로 분석할 수 없는 전자기학적 특성들을 제공할 뿐만 아니라 컴퓨터를 이용한 광 소자 설계에 뛰어난 프로그래밍 알고리즘으로 이용될 수 있다.

참고문헌

- [1] D. Marcuse, "Directional Couplers Made of Nonidentical Asymmetric Slabs. Part I: Synchronous Couplers," *J. Lightwave Technol.* Vol. LT-5, pp. 113~118, 1987.
- [2] W. P. Huang, C. L. Xu, S. T. Chu, S. K. Chaudhuri, "The Finite-Difference Vector Beam Propagation Method: Analysis and Assessment," *J. Lightwave Technol.* Vol. LT-10, pp. 295~305, 1992.
- [3] 호광춘, 김준환, 김영권, "광통신용 광 결합기의 모드 전송선로 해석법," 대한전자공학회지, 제 35 권, D 편, 제 7 호, pp. 25~31, 1998.
- [4] J. T. Boyd, "Theory of parametric oscillation phase matched in GaAs thin-film waveguides," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE-8, pp. 788-796, 1972.