

論文98-35D-7-4

## 광통신용 광 결합기의 모드 전송선로 해석법

### (Modal Transmission-Line Theory of Planar Optical Couplers in Optical Communication)

扈光春\*, 金竣煥\*\*, 金暎權\*\*

(Kwang-C. Ho, June-Hwan Kim, and Yung-Kwon Kim)

#### 요 약

두 슬랩으로 구성된 광 방향성 결합기의 결합 특성을 분석하기 위하여 모드 전송선로 해석법이 이용되었다. 정확한 중첩모드와 모드 함수사이의 경계 조건에 의존하는 결합 효율  $\eta$ 를 정의하여 이득을 갖는 결합기의 TE 모드 전력 전송을 해석하였다. 그 결과 전력 전송은 정확한 모드 사이의 전파 상수가 가장 근사한  $\lambda_{min}$ , 위상정합 조건  $\lambda_{ph}$ 와 다른 새로운 파장  $\lambda_{op}$ 에서 가장 좋은 특성을 나타내었다.

#### Abstract

Modal Transmission-line theory is utilized to analyze the power coupling of optical directional coupler composed by two parallel guiding slabs. By defining a coupling efficiency  $\eta$  amenable to rigorous supermodes and boundary conditions of modal functions, we evaluate the power transfer for TE mode of gainy coupler. The results reveal that optimized power exchange occurs at a novel wavelength  $\lambda_{op}$ , which is generally different from minimum gap  $\lambda_{min}$  between rigorous modes and phase-matching condition  $\lambda_{ph}$ .

#### I. 서 론

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

결합 모드이론(coupled-mode theory)<sup>[1]</sup> 또는 빔 전파방법 (beam propagation method)<sup>[2]</sup> 과 같은 간소화된 방법에 의하여 분석되고 연구되어 왔다. 이들 해석법들은 결합특성이 약한(weak-coupling) 구조들이나 이득(gain)이나 손실(loss)이 없는 수동(passive) 전송 구조들의 해석에 정확한 수치 해석적 결과들을 제공하지만 강한 결합(strong-coupling) 특성이나 이득/손실을 포함하는 능동(active) 전송 구조들에서 마주치는 여러 가지 물리적 특성들을 해석하기에는 불충분하다.

그러므로, 이득이나 손실 특성들을 포함하는 슬랩들로 구성된 광 방향성 결합기의 그 결합특성을 정확하게 해석하기 위하여 최근 관심을 불러 일으키고 있는 새로운 해석법인 모드 전송선로 해석법 (Modal Transmission-Line Theory)을 여기에 소개하고자 한다. 이 해석법은 정확한 모드해(modal solutions)

\* 正會員, 漢拏工科大学校 電氣電子工學部

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

\*\* 正會員, 建國大學校 電氣電子工學部

(School of Elec. Eng., Konkuk Univ)

接受日字:1998年2月9日, 수정완료일:1998年6月5日

의 경계치 문제 (boundary value problem)을 만족하는 임의의 격자 (grating) 구조들을 평가하기 위하여 Tamir<sup>[3]</sup>에 의하여 처음 가지화되었고, Ho<sup>[4,5]</sup>에 의하여 이득을 포함하는 물질들로 구성된 능동 전송 구조들에 처음으로 적용되고 발전되었다.

이 논문에서 우리는 그 전송 채널중의 하나가 이득을 갖는 GaAs 물질로 구성되고 다른 전송 층(layers)들은  $Al_xGa_{1-x}As$ 로 구성된 광 방향성 결합기의 결합 특성을 해석하고자 한다. 이를 위하여 2장에서는 GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ 로 구성된 광 방향성 결합기의 그 전파상수 (propagation factors)에 기초한 TE 모드 분산곡선 (dispersion curves)을 분석하였고, 이 특성을 해석하기 위한 횡방향 공진조건 (transverse resonance condition)을 소개하였다. 이 해석적인 조건은 모드 전송선로 해석법의 기초를 이루는 중요한 관계식이다. 3장에서는 2장의 분산특성으로부터 결정된 파장들에서 광 결합기의 그 전력결합 특성을 해석하기 위한 모드 전송선로 해석법을 소개하였고 이에 기초한 결합효율 (coupling efficiency)을 정의하였다. 더욱이, 가장 좋은 전력 전송 특성을 나타내는  $\lambda_{op}$ 에서 그 증폭 (lasing)현상을 해석하였다. 그리고, 본 논문에 대한 최종적인 견해를 4장에 언급하였다.

### II. 광 방향성 결합기의 전파특성

서로 근접하게 놓여 있는 두개의 비 대칭 슬랩 (slab) 도파로에 의하여 구성된 광 방향성 결합기를 그림 1에 도시하였다. 이 광 결합기는 굴절률  $n_a$ , 두께  $t_a$ 의 GaAs로 구성된 기준 (primary) 슬랩과 굴절률  $n_b$ , 두께  $t_b$ 의 AlGaAs ( $x=0.05$ )로 구성된 보조 (secondary) 슬랩을 이용하여 설계하였다. 이 두 슬랩의 전력결합을 향상시키기 위하여 그 사이에 굴절률  $n_u$ ,  $n_d$ 와 두께  $t_u$ ,  $t_d$ 의 AlGaAs ( $x=0.05, 0.15$ )가 형성되었고 굴절률  $n_s$ 의 AlGaAs ( $x=0.15$ ) 기판 (substrate)과 굴절률  $n_c$ 의 AlGaAs ( $x=0.35$ ) 커버로 설계되었다. 더욱이, 그 입력 영역 (input region)과 출력 영역 (output region)은 분리된 (isolated) 슬랩으로 구성된 전송구조를 갖으며, 반사나 불연속성 (discontinuity) 효과가 최소화되도록 구성하였다. 또한, 그림 1에서 보듯이 전력이 입력 영역의 보조 슬랩을 통하여 입사되어 임의의 결합길이 (coupling length)  $z_0$ 를 진행한 후에 기준 슬랩을 통하여 출력된

다고 가정하였다. 이 입/출력 영역의 전송구조는 해석하고자 하는 모드 결합의 형태에 따라 인위적으로 구성할 수 있으며, 본 논문에서는 그림 1과 같은 모드 결합을 해석하였다. 그림 1의 광 결합기를 구성하는 물질들의 굴절률은 동작 주파수  $\lambda$ 가  $0.87 \mu m$ 인 경우에 아래와 같은 Sellmeier 공식<sup>[6]</sup>을 이용하여 계산하였다.

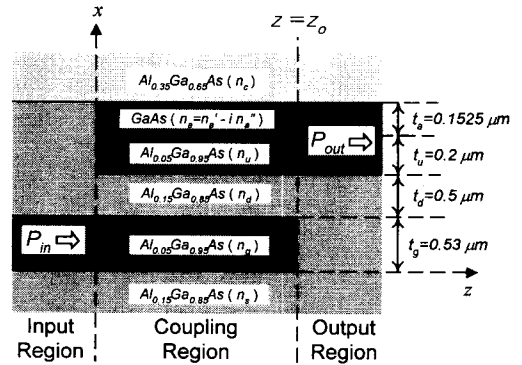


그림 1. 두 개의 비 대칭 전송 층으로 구성된 광 방향성 결합기  
Fig. 1. Configuration of optical directional coupler consisted of two asymmetric guiding layers.

$$n(\lambda, x) = \left[ A(x) + \frac{B(x)}{\lambda^2 - C(x)} - D(x)\lambda^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서,  $A(x)=13.5-15.4x+11x^2$ ,  $B(x)=0.69+3.6x-4.24x^2$ ,  $C(x)=0.154-0.476x+7x^2$ , 그리고  $D(x)=1.84-8.18x+7x^2$ 이다.

가장 중요한 광 결합기의 특성중의 하나는 결합기를 통하여 전파하는 모드의 전파상수를 계산하는 것이다. 대부분의 광 전송 구조에서 이 전파상수는 비 선형 방정식을 풀어 그 값을 결정해야 하는 미지수 (unknown values)들이다. 이 전파상수를 정확하게 계산하기 위하여 모드 전송선로 해석법에서는 아래와 같이 경계치 문제 (boundary-value problem)에 기초한 횡 방향 공진조건 (transverse resonance condition)을 이용한다<sup>[3, 4]</sup>.

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

여기서,  $Y_{up}$ 은 x축상의 임의의 경계면에서 위로 본 그 어드미턴스 (admittance)를 나타내며  $Y_{dn}$ 은 그 경계면에서 아래 방향으로 본 입력 어드미턴스를 나타낸다. 식 (2)의 고유치 문제 (eigenvalue problem)는 광 결합기의 전파상수에 의하여 표현되는 함수이며, 이

관계식을 이용하여 정확한 전파상수를 계산할 수 있다. 만약, 기준 도파로가 이득을 갖는다면 ( $n''_a \neq 0$ ) 광 결합기는 능동 전송소자가 되며, 그때 전파상수는 이득을 갖는 복소수의 형태로 표현된다.

$$k_z = \beta - i\alpha = k_0(n'_{eff} + in''_{eff}) \quad (3)$$

여기서,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  이고  $n'_{eff}$ 와  $n''_{eff}$ 은 각각 유효 굴절률의 실수와 허수 값을 나타낸다. 그러므로, 전파상수의 허수 부  $\alpha$ 는 광 결합기의 이득 성분을 나타내며 결합기를 통하여 진행되는 모드를 증폭한다.

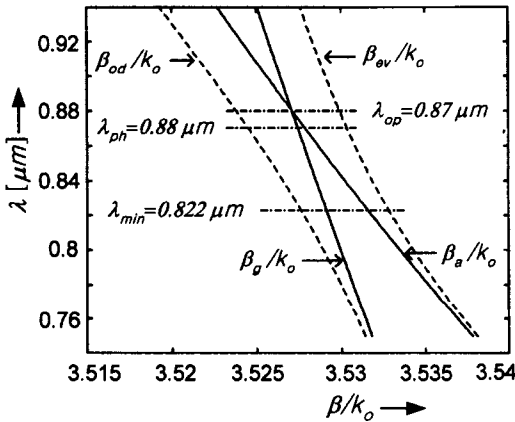


그림 2. 광 방향성 결합기의 파장에 따른 전파상수의 변화

Fig. 2. Dispersion curves of optical coupler as a function of wavelength.

식 (2)에서 주어진 공진조건을 이용하여 우리는 그림 2에 TE 모드에 대한 그 분산 특성을 도시하였다. 그림에서 보듯이 실선 (solid-line)은 입력 영역의 형태와 출력 영역의 형태를 갖는 두 분리된 (isolated) 전송구조의 그 분산특성을 나타내며 그 전파상수는 각각  $\beta_a$ ,  $\beta_g$ 로 주어진다. 서로 다른 두께와 굴절률 분포를 갖는 두 분리된 전송구조의 분산 곡선들은  $\lambda_{ph} = 0.88 \mu m$ 에서 서로 교차하는 특성을 나타낸다. 이 교차점을 우리는 위상정합 조건 (phase-matching condition)이라고 하며 이 교차점에서 두 전파상수는 서로 같다 ( $\beta_a = \beta_g$ ). 그때, 기준 슬랩과 보조 슬랩이 동시에 결합되면  $\beta_a$ ,  $\beta_g$ 의 전파상수를 갖는 두 모드는 서로 중첩되어 전파상수  $\beta_{ev}$ ,  $\beta_{od}$ 의 중첩모드 (supermodes)가 된다. 그러한 특성은 광 결합기 영역 (coupling region)에서 나타나며 그림 2에 점선 (dashed-lines)으로 표시하였다. 이 두 정확한 (rigor-

ous) 모드의 전파상수는  $\lambda_{min} = 0.822 \mu m$ 에서 가장 근사한 값을 가지며 분리된 (isolated) 전송구조의 위상 정합조건  $\lambda_{ph}$ 와 다른 물리적 특성을 나타낸다.  $\beta_{ev}$ ,  $\beta_{od}$ 의 전파상수를 갖는 중첩모드 (supermodes)는 그림 3에서 보듯이 우 전기장 (even field)  $E_{ev}(x)$ 와 기 전기장 (odd field)  $E_{od}(x)$ 의 특성을 갖는 모드를 말하며 이 두 전기장 성분이 결합되어 광 결합기를 통하여 전파하는 결합 전기장 (coupled field)  $E_{ev}(x) + E_{od}(x)$ 을 형성한다. 그러므로, 우/기 모드는 기준 슬랩에서 서로 상쇄되고 보조 슬랩에서 서로 결합하여 전력은 보조 슬랩을 통하여 입력 경계면 (input boundary)에서 입사된다. 이 입사된 전력은 임의의 결합길이  $z_0$ 를 진행한 후에 180 위상전이 (phase-shift)된 기 모드에 기인하여 기준 슬랩에서는 서로 결합하고 보조 슬랩에서는 서로 상쇄되어 광 결합기의 고유 전파 특성인 전력전송 (power transfer)의 현상을 발생한다. 그 광 결합기의 전력전송 특성은 다음 장에서 자세하게 언급할 것이다.

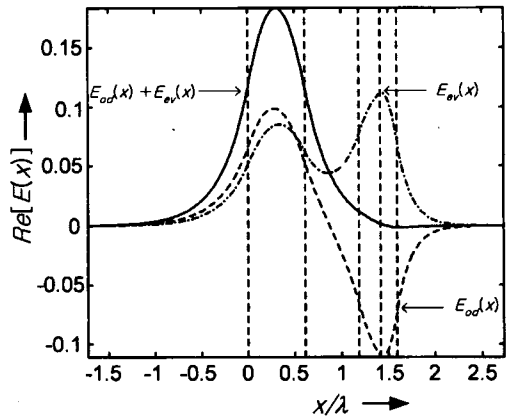


그림 3. 입력 경계면에서의 전장분포. 여기서, 종방향 점선은 슬랩들의 경계면을 나타낸다.

Fig. 3. Field distribution at input boundary, where vertical dashed-lines is the boundaries of guiding slabs.

마지막으로, 그림 1에 설계된 광 결합기에 가장 적합한 (optimized) 전기장분포를 나타내는 새로운 전파 특성을 결정하였다. 그림 4에서 보듯이 입사 경계면에서 입사된 전력은 광 결합기의 물리적 특성을 결정하는 동작 주파수  $\lambda_{op} = 0.87 \mu m$ 에서 가장 좋은 전기장 분포 특성을 나타내었다.  $\lambda_{op}$ 에서 모든 전기장 성분은 보조 슬랩에 분포되어 있으며 기준 슬랩에는 무시할

정도로 작은 전기장성분만이 존재한다. 이에 반해, 위상 정합조건  $\lambda_{ph}$ 와 정확한 모드 사이의 차가 가장 작은  $\lambda_{min}$ 에서의 전기장분포는 기준 슬랩에 상당한 전기장성분을 포함한다.

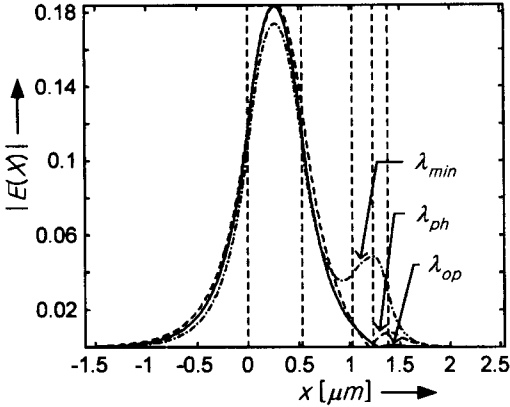


그림 4. 입력 경계면에서 파장의 변화에 따른 전장분포  
 Fig. 4. Field distributions along the variation of wavelength at input boundary.

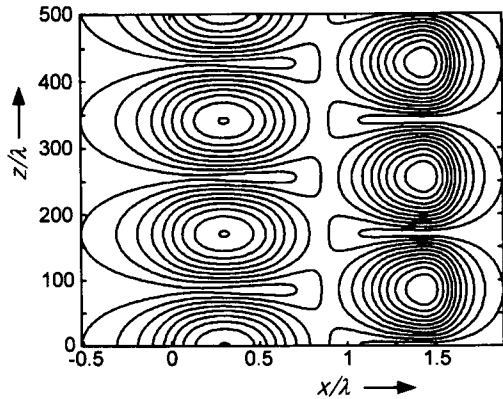


그림 5. 두 전송 채널사이의 전력전송을 나타내는 등고선  
 Fig. 5. Contour exhibiting the power transfer between two guiding channels.

그러므로, 본 논문에서 설계된 그림 1의 광 결합기는  $\lambda_{op}$ 에서 가장 좋은 결합특성을 갖는 결합기로 동작한다고 할 수 있다. 이러한 특성은 지금까지 알려져 왔던 광 결합기의 설계 기준인 중첩모드의 전파상수  $\beta_{ev}$ ,  $\beta_{od}$ 가 가장 근사한 파장  $\lambda_{min}$ 에서 결합특성이 가장 좋다는 결과와 다르며 광 결합기의 설계에 새로운 표준 (criterion)으로 활용될 수 있다. 그러므로, 보조 슬랩을 통하여 입력 경계면에서 입사된 전력은 매 비

트 길이 (beat-length)마다 기준 슬랩과 보조 슬랩 사이에서 주기적으로 전력을 전송한다. 이와 같은 전력 결합특성이 그림 5에 전기장세기의 등고선 (contour)으로 명확하게 도시되었다.

### III. 전파 모드의 결합효율

기준 슬랩과 보조 슬랩 사이의 전력전송을 분석하기 위하여 전송구조는 2차원적 ( $\partial/\partial y=0$ )이고 보조 슬랩을 통하여 전력이 입사된다고 가정하였다. 그때, 모드 전송선로 해석법에 의하여 표현된 횡 방향 모드 전기장 (transverse modal fields)은 입/출력 영역에서 TE 모드에 대하여 아래와 같이 정의된다<sup>[7]</sup>.

$$E_r(x, z) = V_r(z)e_r(x) \tag{4}$$

여기서,  $V_r(z)$ 는 전송선로의 전압특성을 나타내며  $e_r(x)$ 은 횡 방향 모드 함수 (transverse modal function)이다. 그리고, 아래 첨자  $r$ 은 입력 영역에서  $r=in$ 으로 출력 영역에서는  $r=out$ 으로 정의된다. 일반적으로, 광 결합기에서의 그 전송 모드는 표면 파 (surface waves)들의 연속 스펙트럼 (continuous spectrum)보다는  $m$  개의 불연속 스펙트럼 (discrete spectrum)들의 합으로 구성된다.

$$E_c(x, z) = \sum_m V_m(z)e_m(x) \tag{5}$$

그러나, 모든 실제적인 경우에 있어 두 전송 슬랩으로 구성된 광 결합기는 오직 기본 모드 (fundamental mode)와 다음 차수 (next highorder)의 모드에 그 전파특성을 결정하는 물리적 성분들을 포함한다<sup>[8]</sup>. 그림 1의 광 결합기에서 그 물리적 의미를 갖는 성분이 중첩 모드라 불리는 우 모드와 기 모드이다. 그러므로, 결합 영역에서의 전기장은 아래와 같이 표현된다.

$$E_c(x, z) = V_{ev}(z)e_{ev}(x) + V_{od}(z)e_{od}(x) \tag{6}$$

여기서, 전압 모드함수 (voltage modal function)는  $V_\xi(z)=V_0 \exp(ik_z \xi z)$ 로 표현되며 우/기 모드에 대하여 각각  $\xi=ev/od$ 로 주어 진다. 또한, 전파상수  $k_z^{(\xi)}$ 는 식 (3)에 정의되어 있다.

보조 슬랩을 통하여 입력 경계면에서 입사된 모드는 직교성 (orthogonality)의 중첩모드를 광 결합기에 발

생한다. 이 중첩모드는 이득 또는 손실을 포함하는 전송구조에 따라 지수 함수적으로 증가하거나 감소하며 z축을 따라 결합길이를 진행한 후에 기준 슬랩을 통하여 전송된다. 그러므로, 입력 경계면에서의 반사 (reflection)를 무시하고 경계조건 (boundary condition)을 이용하여 아래와 같은 등가관계식을 얻는다.

$$V_{in}(0) e_{in}(x) \cong V_{ev}(0) e_{ev}(x) + V_{od}(0) e_{od}(x) \quad (7)$$

위의 식 (7)에 광 전송구조의 중요한 전자기학적 특성인 전장 직교조건 (field orthogonality condition)과 전력 정규화조건 (power normalization condition)을 적용하여 풀면<sup>[9]</sup>

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

로 주어지고, 그 입력 변환상수 (input transformer constant)는 아래와 같다.

$$T_{in,\xi} = \int_{cs} e_{in}(x) dS \quad (9)$$

여기서, cs는 모드가 진행하는 xz-단면 (cross-section)을 나타낸다. 결국, 입력 경계면에서 발생한 직교성의 중첩모드는 임의의 중단 경계면 (accessible terminal) z<sub>0</sub>에서 기준 슬랩 또는 보조 슬랩을 통하여 출력된다. 그때, 임의의 출력 경계면 (output boundary)에서 경계조건을 적용하면 아래와 같은 관계식을 얻는다.

$$V_{out}(z_0) e_{out}(x) \cong V_{ev}(z_0) e_{ev}(x) + V_{od}(z_0) e_{od}(x) \quad (10)$$

식 (10)에 출력 모드의 전력 정규화조건을 적용하면

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = T_{in,ev} T_{out,ev} e^{ik_{z,ev}z_0} + T_{in,od} T_{out,od} e^{ik_{z,od}z_0} \quad (11)$$

이 되고, 출력 변환상수 (output transformer constant) T<sub>out,ξ</sub>는 식 (9)에서 e<sub>in</sub>(x)를 e<sub>out</sub>(x)로 대치하여 얻어진다. 그러므로, 우리는 TE 모드의 전력 전송을 정확하게 분석하기 위한 새로운 결합효율 (coupling efficiency) 관계식 η를 정의할 수 있다. 이 결합효율은 입력 전력에 대한 출력 전력의 비율로써 표현된다.

$$\eta = \frac{\text{Re}(k_{z,out})}{\text{Re}(k_{z,in})} \cdot \frac{|V_{out}|}{|V_{in}|} \quad (12)$$

여기서, k<sub>z,in</sub>과 k<sub>z,out</sub>는 각각 입력 영역과 출력 영역

에서의 그 전파 상수들이다. TE 모드의 결합효율을 유도하기 위하여 지금까지 언급한 z 방향 모드 전송선로 해석법의 등가 전송선로가 그림 6에 자세히 묘사되어 있다. 이 전송선로에서 입력 변환기 (transformer)와 출력 변환기는 식 (9)에 정의되어 있고, 각 경계면에서의 전압 모드함수 (voltage modal functions)들은 식 (4)와 (6)에 각각 주어졌다.

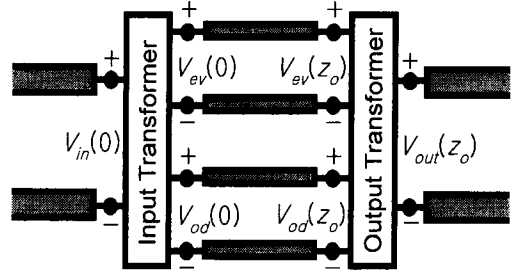


그림 6. 광 방향성 결합기의 등가 전송선로 망  
Fig. 6. Equivalent transmission-line network of optical directional coupler.

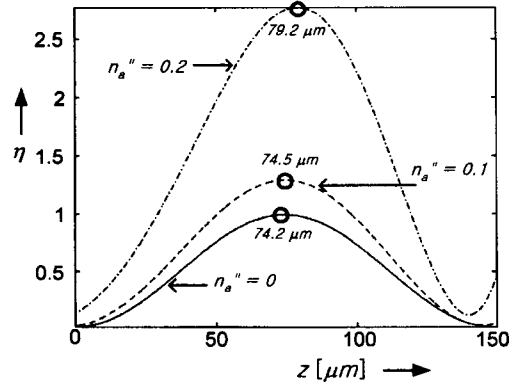


그림 7. λ=0.87 μm에서 이득의 변화에 따른 결합효율  
Fig. 7. Coupling efficiency along with gain at λ = 0.87 μm.

위의 식 (12)에 주어진 결합효율을 가장 적합한 전장 분포를 갖는 λ<sub>op</sub>=0.87 μm에서 이득 변화에 따라 그 특성을 수치해석 하였다. 그림 7에서 보듯이 n<sub>a</sub>''=0에서 기준 슬랩은 이득이 없으며 그때 광 결합기는 수동 전송구조가 된다. 그 수동 전송구조의 보조 슬랩을 통하여 입사된 1 [W] 정규화된 전력은 증폭없이 결합길이 z<sub>0</sub>=74.2 μm를 진행한 후에 기준 슬랩을 통하여 그 전력을 출력한다. 앞서 2장에서 언급했듯이 가장 적합한 전기장 분포를 나타내는

$\lambda_{op}$ 에서의 전력전송은 이 결합길에서 거의 99 %의 전력전송이 일어나는 것으로 나타났다. 더욱이, 기준 슬랩이  $n''_a = 0.1$ 의 이득을 갖을 경우 결합길이는 기준 슬랩의 복소수 굴절률에 기인하여  $n''_a = 0$ 의 경우보다 다소 증가한  $z_0 = 74.5 \mu m$ 에서 발생하였으며 이 능동 광 결합기를 통하여 진행되는 모드는 이득을 흡수하여 그림에서 보듯이  $\eta_{max} = 1.3$ 으로 증폭하였다.  $n''_a = 0.2$ 의 경우에 이러한 현상이 더욱 현저하게 나타나 결합길이는  $z_0 = 79.2 \mu m$ 로 증가하였고 입력 전력은  $\eta_{max} = 2.8$ 로 증폭되었다. 이 위상천이 (phase-shift) 현상과 증폭 특성은 우리가 알고 있는 한 다른 근사 해석법 (simplified approaches)에서 아직까지 계산된 적이 없는 특성들이다.

마지막으로, 우리는 그림 7의 전자기학적 특성들을 명확하게 이해하기 위하여 그림 8에 이득의 변화에 따른 그 전기장 분포를 도시하였다. 이 그림은 이득이 증가함에 따라 기준 슬랩을 통하여 전송되는 모드의 진폭이 크게 증폭됨을 보여주고 있다. 이 증폭된 기준 슬랩의 전기장 성분들에 의하여 보조 슬랩에서 입사된 전력은 비트길이 (beat-length)를 진행하는 동안 증폭되어 기준 슬랩을 통하여 출력된다. 이 물리적 현상들은 광 통신용 증폭기 (optical amplifier) 설계에 유용하게 이용될 수 있다.

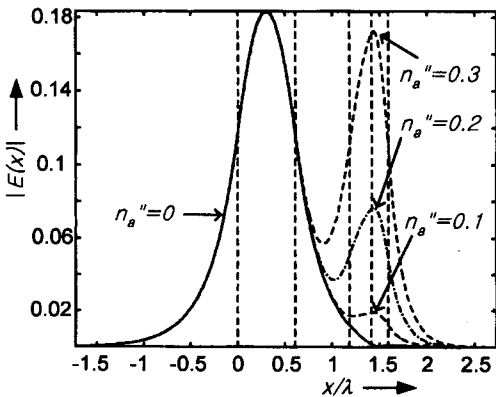


그림 8. 입력 경계면에서 이득의 변화에 따른 전계분포. 여기서,  $\lambda = 0.87 \mu m$

Fig. 8. Field distribution along with the variation of gain at input boundary, where  $\lambda = 0.87 \mu m$ .

#### IV. 결 론

정확한 중첩모드와 입/출력 경계면에서의 모드 연속성에 기초한 모드 전송선로 해석법을 이용하여 광 방

향성 결합기의 전력전송 특성을 해석하였다. 가장 좋은 결합특성을 나타내는 파장을 결정하기 위하여 분리된 전송구조와 광 결합기의 그 분산곡선을 고려하였고 이를 이용하여 입력 경계면에서의 전자장 분포를 분석하였다. 더욱이, 모드들의 전력결합으로부터 결합효율을 유도하였고 가장 좋은 결합특성은 위상정합 조건  $\lambda_{ph}$ 나 정확한 모드들의 전파상수가 가장 근사한  $\lambda_{min}$ 이 아닌 새로운 파장  $\lambda_{op}$ 에서 발생함을 발견하였다. 그러므로, 정확한 (rigorous) 모드 전송선로 해석법은 결합 모드이론 (coupled-mode theory)이나 빔 전파방법 (beam propagation method)과 같은 근사 해석법으로 분석할 수 없는 전자기학적 특성들을 제공할 뿐만 아니라 컴퓨터를 이용한 광 소자 설계에 뛰어난 프로그래밍 알고리즘으로 이용될 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [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] T. Tamir, S. Zhang, "Modal Transmission-Line Theory of Multilayered Grating Structures," *J. Lightwave Technol.* vol. LT-14, pp. 914-927, 1996.
- [4] K. C. Ho, G. Griffel, T. Tamir, "Polarization Splitting in Lossy/Gainy MQW Directional Couplers," *J. Lightwave Technol.* vol. LT-15, pp. 1233-1240, 1997.
- [5] G. Griffel, K. C. Ho, "Equivalent Network Approach of Planar Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," to be published in *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998.
- [6] 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.
- [7] L. B. Felsen and N. Marcuvitz, *Radiation and scattering of waves*, pp. 187-190, IEEE

Press, 1994.

[ 8 ] T. Tamir, "Leaky Waves in Planar Optical Waveguides," *Nouv. Rev. Optique*, no. 5,

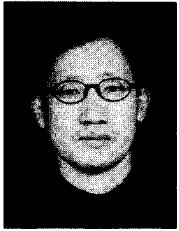
pp. 273-284, 1975.

[ 9 ] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, pp. 333-337, IEEE Press, 1991.

---

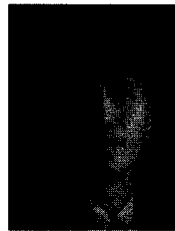
저 자 소 개

---



盧光春(正會員)

1962년 12월 3일생. 1985년 2월 건국대 전자공학과 학사. 1987년 2월 건국대 전자공학과 석사. 1988년 3월 ~ 1990년 7월 육군사관학교 전자공학과 전임강사. 1993년 9월 Polytechnic University in Brooklyn, Electrophysics(M.S.). 1996년 9월 Polytechnic University, Electrical Engineering(Ph.D.). 1996년 9월 ~ 1997년 6월 Polytechnic University, Post-Doc Research Associate. 1997년 7월 ~ 1998년 2월 한국통신 무선통신연구소 선임연구원. 1998년 3월 ~ 현재 한라공과대 전자공학과 전임강사. 주관심분야는 광집적소자의 설계 및 해석, M/W RF모듈의 설계, M/W 전파 특성 해석



金 竣 煥(正會員)

1967년 4월 24일생. 1994년 2월 건국대 전자공학과 학사. 1996년 2월 건국대 전자공학과 석사. 1996년 3월 ~ 현재 건국대 전자공학과 박사과정. 주관심분야는 광 유/무선 통신, 광소자의 설계 및 해석

金 暎 權(正會員) 第 32卷 A編 第 3號 參照