

논문 2008-45SD-3-3

비 정렬된 입출력단자를 갖는 능동형 방향성 결합기에서 반사감도를 최소화하기 위한 새로운 설계조건 제안

(Novel Design Proposal to Minimize Reflection Sensitivity in Active Directional Couplers with Mismatched Access Guides)

호 광 춘*

(Kwang-Chun Ho)

요 약

비 정렬된 입출력단자를 갖는 능동 방향성 결합기에서 최대 전력결합 특성을 얻기 위한 새로운 설계조건을 제안하였다. 제안한 설계방법의 타당성 및 정확성을 분석하기 위하여 불연속 입출력경계면에서 발생하는 반사감도를 고려한 새로운 결합 효율을 정의하였다. 분석 결과, 지금까지 방향성 결합기를 설계하기 위하여 사용되어 왔던 위상정합조건과 최소간격조건들은 불연속 특성과 이득을 갖는 능동 방향성 결합기의 설계조건에 적합하지 않으며, 새로운 전력 등가분배조건이 필요함을 알 수 있었다.

Abstract

It proposes the novel design conditions to maximize the power coupling of active directional couplers with mismatched access guides. To verify the validity and accuracy of the conditions proposed, a new coupling efficiency is defined and it depends on the reflection coefficients occurred at the discontinuous input/output interfaces. The numerical results reveal that the phase-matched condition and the minimum-gap condition for those couplers are no longer suitable to optimize the design parameters and a new criterion is needed.

Keywords : Active Directional Couplers, Maximum Power Coupling Condition, Equivalent Network

I. 서 론

결합특성을 이용한 광 전송 소자들은 초고속 광통신을 위한 집적광학 분야에서 오늘날 큰 관심을 끌고 있는 소자들이다. 그 소자들 중의 하나가 평행하게 놓인 두 슬랩 (slabs)으로 구성된 방향성 결합기이다. 임의의 한 슬랩에서 입사된 전력이 대칭성을 갖는 우 (even)모드와 비대칭성의 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 해석법들이 정확한 수치 해석적 결과들을 제공하지만 비 정렬된 입/출력단자들과 집적된 방향성 결합기의 그 결합특성을 분석하기에는 물리적, 이론적 원리가 부족하다. 그 결과, 불연속 경계면들을 갖는 복잡하고 다양한 전송구조의 방향성 결합기를 설계하기 위한 정확한 설계변수들을 제공하지 못한다. 실질적으로 방향성 결합기는 광변조기, 레이저 소자, 광섬유와 같은 광소자들과 광전송 시스템 설계 시에 집적되어 사용되며, 집적으로 인하여 발생하는 이들 소자들과의 비 정렬특성이 방향성 결합기의 설계에 어떠한 영향을 주는가에 대한 문제가 산업체에서 연구하는 과학자들에게 많은 관심사가 되고 있다.

이를 위하여 본 논문에서는 모든 광학적 특성의 전송

* 정회원, 한성대학교 정보통신공학과

(Dept. of ICs Engineering, Hansung University)

※ 본 연구는 2008년도 한성대학교 교내연구비 지원과 제입니다.

접수일자: 2007년12월3일, 수정완료일: 2008년2월27일

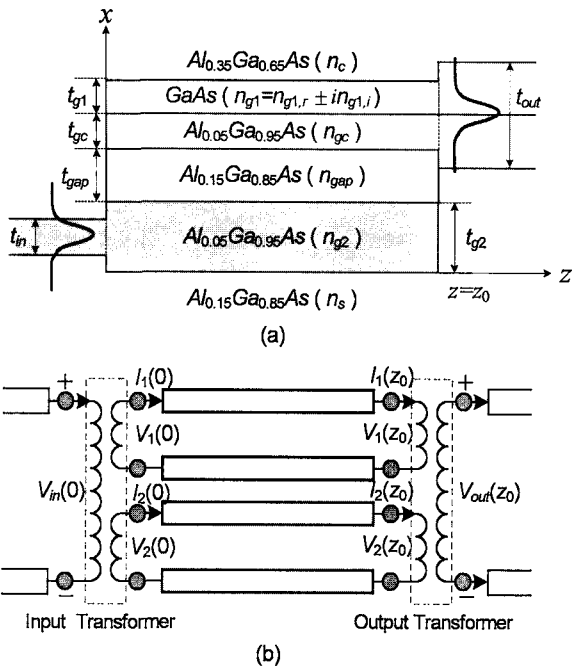


그림 1. (a) 비 정렬된 입/출력단자들과 집적된 방향성 결합기의 전송구조, (b) L-MTLT에 기초한 그림 1(a)의 등가 전송선로.

Fig. 1. (a) Configuration of directional coupler integrated with mismatched access guides, (b) Equivalent network of Fig. 1(a) based on L-MTLT.

구조에서 방향성 결합기의 결합특성을 정확하고 쉽게 분석하기 위하여 종방향 모드 전송선로 이론 (longitudinal modal transmission-line technique L-MTLT)^[4]에 기초한 새로운 분석기준을 제안하였다. 그 기준을 분석하기 위하여 구성된 광 방향성 결합기의 전송구조와 적용된 L-MTLT의 등가 전송선로가 그림 1에 자세하게 도시되어 있다. 또한, 입/출력 경계면의 불연속성을 고려한 최적의 모드 결합길이를 결정하기 위하여 새로운 전력 등가분배조건 (power equi-partition condition)을 정의하여 광 방향성 결합기의 설계특성을 분석하였다.

결국, 정의된 새로운 조건을 이용하여 지금까지 방향성 결합기의 설계 시에 널리 사용되어 왔던 위상정합조건^[1] (phase-matched condition)과 최소 간격조건^[5] (minimum-gap condition)이 비 정렬된 입/출력단자를 갖는 전송구조나 이득이나 손실을 갖는 능동형 방향성 결합기 설계에 적용될 수 없음을 보였으며, 불연속 입/출력경계면이 방향성 결합기의 결합특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 자세하여 분석하였다.

II. 방향성 결합기의 전력 등가분배조건

그림 1(a)에서 보듯이, 하향 슬랩을 통하여 방향성 결합기에 입력된 모드들은 임의의 결합길이를 진행한 후에 상향 슬랩을 통하여 전송된다. 이때, 진행하는 중첩 모드의 전파상수 k_z 는 아래와 같은 경계치 문제에 기초한 L-MTLT의 횡 방향 공진조건^[4]을 이용하여 결정할 수 있다.

$$Y_{up}(k_z) + Y_{dn}(k_z) = 0 \quad (1)$$

여기서, Y_{up} 과 Y_{dn} 은 횡방향의 임의의 경계면에서 각각 위와 아래로 본 어드미턴스를 나타낸다. 그러므로 방향성 결합기에서 전파하는 TE 모드의 전계성분은 아래와 같이 결정된 전파상수에 의존하는 정확한 기/우 ($m=1$)/우($m=2$) 모드들의 선형적 결합으로 표현할 수 있다.

$$E_c(x, z) = \sum_{m=1}^2 V_m(z) e_m(x) \quad (2)$$

여기서, 모드전압 $V_m(z) = V_m(0) e^{ik_{z,m}z}$ 이고, 전파상수 $k_{z,m} = \beta_m + i\alpha_m$ 와 같다. 그때, 입력 경계면 $z=0$ 에서 발생하는 필드의 경계조건을 적용하면

$$V_{in}(0) e_{in}(x) (1 + \Gamma_{in}) = \sum_{m=1}^2 V_m(0) e_m(x) \quad (3)$$

와 같은 관계식을 얻을 수 있다. 이 식에서 Γ_{in} 은 입력 경계면에서 오른쪽으로 들여다 본 반사계수를 의미하며, TE모드의 필드직교조건^[5]을 적용하면 다음과 같은 기/우 모드들의 모드 전압을 얻을 수 있다.

$$V_m(0) = (1 + \Gamma_{in}) V_{in}(0) P_{in,m}(x) \quad (4)$$

여기서, $P_{in,m}$ 은 입력 경계면의 불연속특성에 의존하는 입력 변환상수를 나타낸다. 결국, 비 정렬된 입력단자로부터 입사되는 입사전력이 방향성 결합기에서 발생하는 기/우 모드들의 모드전력으로 분배되는 그 전력분배비율(power distribution ratio)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$(PDR)_m = \text{Re} \left(\frac{k_{z,m}}{k_{z,\infty}} \right) |(1 + \Gamma_{in}) P_{in,m}|^2 \quad (5)$$

결국, 분배된 기/우 모드들의 그 모드전력들이 서로 같은 조건, 즉 $(PDR)_1 = (PDR)_2$,을 본 논문에서는 전

력 등가분배조건이라 정의하였고, TE_0 모드에 대한 그 특성을 그림 2에 자세하게 분석하였다. 분석을 위하여 설계된 방향성 결합기의 두께는 $t_{g1} = 0.1525 \mu\text{m}$, $t_{g2} = 0.53 \mu\text{m}$, $t_{gc} = 0.2 \mu\text{m}$, $t_{gap} = 0.5 \mu\text{m}$ 와 같이, 각 전송 층들의 굴절률은 $n_c = 3.363$, $n_{gc} = n_{g2} = 3.557$, $n_{g1} = 3.64$, $n_{gap} = n_s = 3.485$ 와 같이 선택하였다. 또한, 입/출력단자들의 두께는 $t_{in} = t_{g2}$, $t_{out} = t_{g1} + t_{gc}$ 와 같이 방향성 결합기와 정렬된 전송구조로 구성하여 전력분배비율을 분석하였다.

그림에서 보듯이, 정렬된 입력단자를 통하여 결합영역에 입사된 TE_0 모드의 광 신호는 결합영역에 기/우 형태의 모드를 발생시키고, 이 모드들은 서로 결합하여 하향슬랩을 통하여 입사된 광 신호를 상향 슬랩으로 전송한다. 이 결합특성의 최적조건을 분석하기 위하여 가장 널리 사용하는 방법은 결합모드이론의 위상정합조건이다. 이 이론은 “광 방향성 결합기는 각각 독립된 도파로(즉, 상/하향 슬랩 도파로)에서의 전파상수 β_{g1} 과 β_{g2} 가 서로 일치하는 (즉, $\beta_{g1} = \beta_{g2}$) 지점에서 최대 결합 효율을 갖는다.”라는 것이다. 그림 2(a)에서 보듯이, TE_0 모드에서 위상정합 조건은 $\lambda_{pmc} \approx 0.8802 \mu\text{m}$ 에서 발생하였다.

이와 병행하여, 오늘날 광 방향성 결합기에서 그 결합효율을 분석하는 가장 일반적인 방법은 정확한 기/우 결합모드들의 최소간격조건이다. 이 이론은 “광 방향성 결합기에서 최대 결합효율은 결합된 도파로에서 전파하는 정확한 기/우 결합모드들의 전파상수 β_1 과 β_2 가 가장 유사한 (즉, 전파상수들의 차 $|\beta_1 - \beta_2|$ 가 가장 작은) 지점에서 발생한다.”라는 것이다. 그림 2(a)에서 보듯이, TE_0 모드에서 최소간격 조건은 $\lambda_{mgc} \approx 0.8227 \mu\text{m}$ 에서 발생하였다.

비록 이들 조건들이 결합효율을 분석하는데 있어 좋은 결과를 제공하지만, 본 논문에서 제안한 비 정렬된 입/출력단자를 갖는 전송구조에서는 최적의 분석 결과를 제공하지 못하였다. 왜냐하면, 두 조건 모두 오직 방향성 결합기에서 전파하는 모드들의 분산특성에 의존하여 정의된 결과이므로, 비 정렬된 입/출력단자들에 의하여 발생하는 경계면에서의 불연속 특성을 고려할 수 없다. 결국, 그림 2(b)에서 보듯이, 최적의 결합효율은 기/우 모드들의 전송전력이 균등하게 분배 (즉, $P_1/P_{in} = P_2/P_{in}$, 여기서 $P_1 + P_2 = P_{in}$)되는 새로운 전력 등가분배조건 $\lambda_{epc} \approx 0.8638 \mu\text{m}$ 에서 발생하

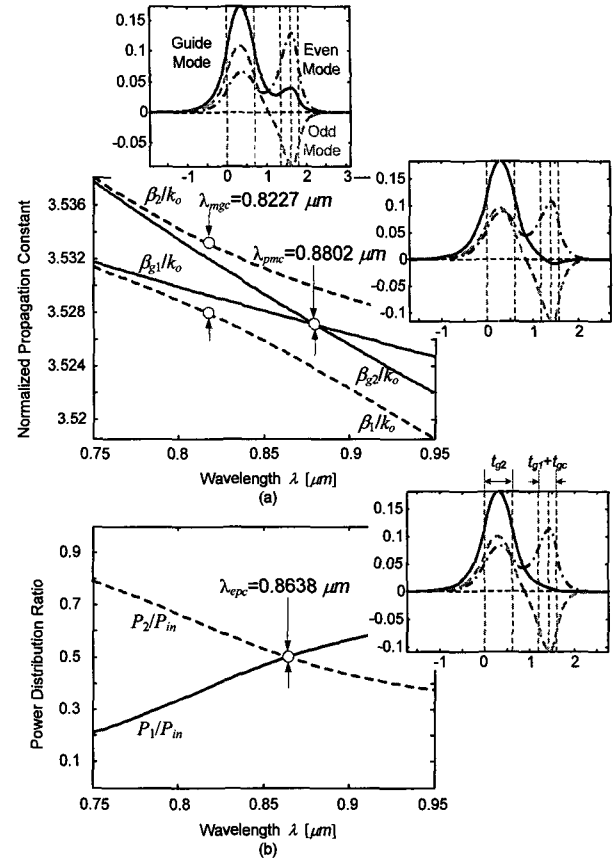


그림 2. TE_0 모드에 대한 방향성 결합기의 전파 특성: (a) 분산곡선, (b) 전력분배율.

Fig. 2. Propagation properties of directional coupler for TE_0 mode: (a) dispersion curve, (b) power distribution ratio.

였다. 이에 대한 구체적인 결과는 III장에서 자세하게 언급할 것이다. 더욱이, 각 조건들에서 발생하는 기/우 모드들의 전기장분포특성을 도시한 그림 2의 삽입도에서 보듯이, 결합영역에서 전파하는 결합모드들의 전기장분포 특성은 전송전력이 균등하게 분배되는 λ_{epc} 에서 가장 좋은 분포 특성을 나타내었다. 즉, 입사된 입력 광 신호의 입사전력은 상향 슬랩 영역으로 누설되지 않고 하향 슬랩 영역에 잘 한정되어 분포하였다.

III. 방향성 결합기의 결합효율

비 정렬된 입/출력단자를 갖는 방향성 결합기의 최적 결합효율을 분석하기 위하여 본 논문에서 제시한 전력 균등분배 조건의 타당성을 입증하기 위하여, 참고문헌 [5]에 정의된 아래와 같은 결합효율 (coupling efficiency)을 분석하였다. 이 효율은 하향 슬랩에서 입력된 입력전력 P_{in} 에 대한 상향 슬랩으로 결합되는 출

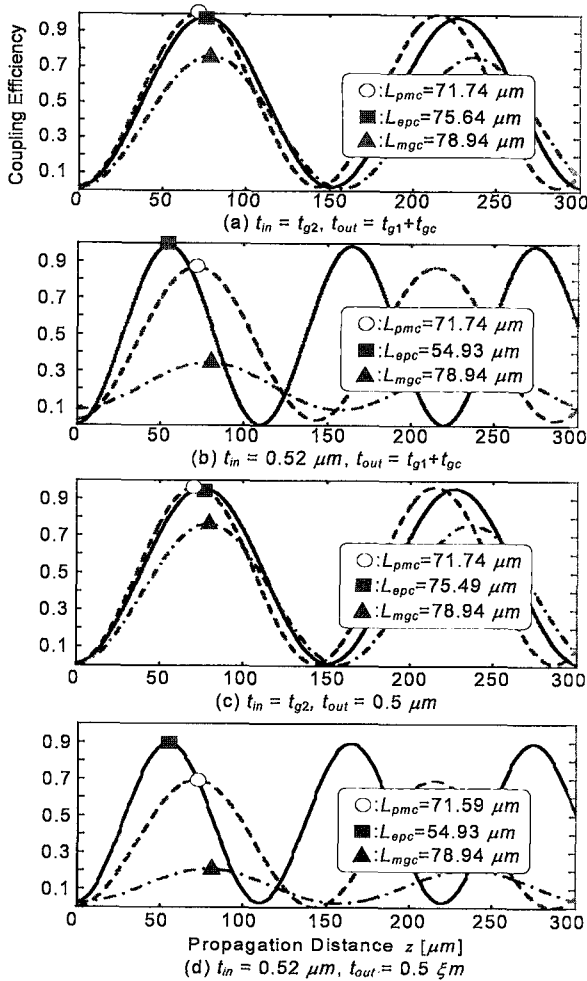


그림 3. TE₀ 모드의 전파거리에 따른 결합효율의 변화.
Fig. 3. Variation of coupling efficiency along propagation distance for TE₀ mode.

력전력 P_{out} 의 비율을 나타내는 것이다.

$$\eta_{TE} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = Re \left(\frac{\beta_{g1}}{\beta_{g2}} \right) |T_{\nu}|^2 \quad (6)$$

여기서, T_{ν} 은 입력 모드전압에 대한 출력 모드전압 사이의 비율을 나타내는 투과계수이다.

앞서 분석한 그림 2의 분산곡선에서 최대 전력전송은 전력 균등분배 조건을 만족하는 전기장분포에서 발생한다고 언급하였다. 이를 확인하기 위하여, 입/출력단자들의 정렬상태가 변할 때 TE₀ 모드들의 결합효율이 어떻게 변화하는지 그림 3에 도시하였다. 그림 3(a)에서 보듯이, 방향성 결합기가 입/출력단자들과 정렬되어 있을 때, 위상정합조건과 전력 등가분배조건의 결합효율은 약 99%로 유사한 값을 나타내었지만, 최소간격조건에서는 약 75%로 25%의 손실이 발생하는 결합효율을 보였다. 또한, 그림 3(c)에서 보듯이 방향성 결합기가

오직 출력단자와 비 정렬되어 있을 때, 그 결합특성은 전력 등가분배조건에서 0.15 μm의 아주 미세한 결합길이 차이를 보였을 뿐 그림 3(a)의 정렬되어 있는 경우와 유사한 특성을 나타내었다. 즉, 방향성 결합기가 오직 출력단자와 비 정렬되어 있을 때, 위상정합조건이나 또는 전력 등가분배조건 중에서 하나의 조건을 사용하여 방향성 결합기를 설계하면 충분함을 알 수 있다.

그러나 그림 3(b), (d)에서 보듯이 방향성 결합기가 입력단자와 비 정렬된 경우에 최적의 결합효율은 오직 전력 등가분배조건에서 발생함을 보여주었다. 방향성 결합기가 입/출력단자 모두와 비 정렬된 그림 3(d)의 경우 전력 등가분배조건에서의 결합효율은 약 90%를 나타내었으나, 위상정합조건과 최소간격조건에서는 각각 약 70%와 약 20%의 좋지 않은 결합효율을 보였다. 더욱이, 전력 등가분배조건에서의 결합길이 $L_{epc} = 54.93 \mu m$ 는 기존의 두 조건에서 발생하는 결합길이보다 약 20% 정도 줄어든 값을 나타내었다. 그러므로 비 정렬된 입/출력단자를 갖는 방향성 결합기를 설계할 때 최적의 결합효율을 얻기 위해서는 입/출력 경계면에서 발생하는 불연속특성이 고려된 전력 등가분배조건에서 설계변수들을 선택해야만 한다. 또한, 전력 등가분배조건에서 설계된 그림 3(d)의 구조를 갖는 방향성 결합기의 입력 경계면 $z = 0$ 에서 발생하는 반사특성을 분석하였다. 그때, 반사계수는 참고문헌 [5]로부터 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Gamma_{in} = \frac{(n_{in} - n_{out})m_{11} + (\overline{m}_{21} - n_{out}\overline{m}_{12})}{(n_{in} + n_{out})m_{11} - (\overline{m}_{21} + n_{out}\overline{m}_{12})} \quad (7)$$

여기서, n_{in}, n_{out} 은 각각 입/출력영역에서의 유효굴절률을 나타내며, $m_{11}, \overline{m}_{12}, \overline{m}_{21}$ 는 입/출력 변환상수(input/output transformer coefficients)로 구성된 입/출력 경계면의 불연속특성을 나타내는 정규화 전송 요소들이다.

결국, 그림 4에서 보듯이 반사특성은 3가지 조건 모두의 결합길이에서 포락선(envelope) 변화가 최소가 되는 동등한 특성을 나타내었다. 그러므로, 전력 등가분배조건만을 고려하여 최대 결합효율의 방향성 결합기를 설계하면 그때 반사감도(reflection sensitivity)는 그 조건하에서 자동적으로 최소의 변화율을 나타내는 것으로 분석되었다. 그림 4의 경우, 반사계수의 포락선은 -50dB 근처에서 거의 변화 없이 일정하였다.

이와 같은 결과를 다시 해석하면, 다른 구조의 입/출

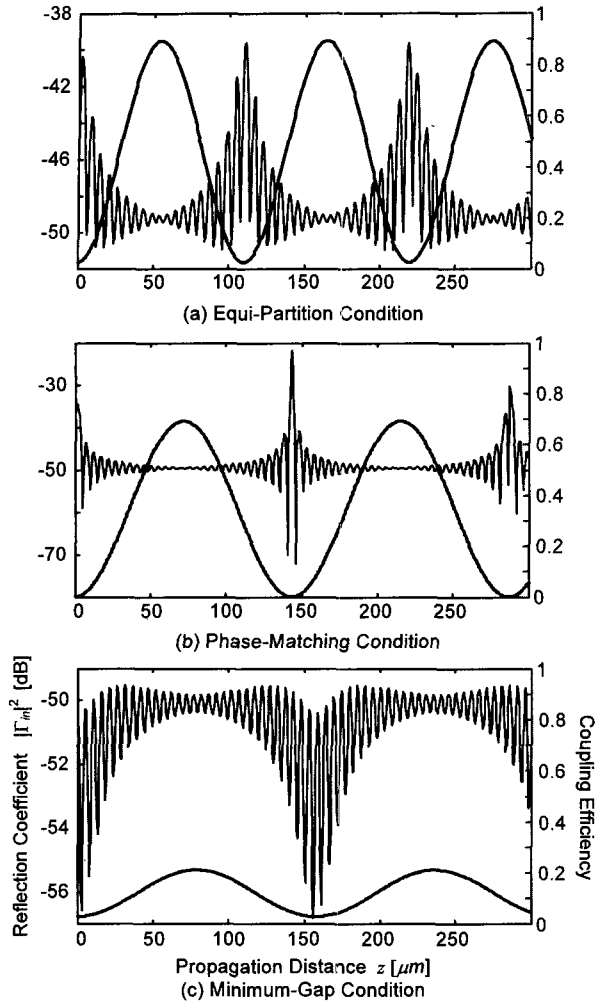


그림 4. 그림 3(d)의 전송구조에서 전파거리에 따른 TE_0 모드의 반사계수 변화.

Fig. 4. Variation of reflection coefficient along propagation distance for TE_0 mode at the guiding structure of figure 3(d).

력 소자들을 방향성 결합기와 집적할 때 입/출력 소자들의 구조에 따라 변하는 반사감도를 분석하여, 그 변화율이 최소인 결합길이를 선택하여 방향성 결합기를 설계하면 집적되는 입/출력 소자와 가장 잘 정합되는 (즉, 최대 결합효율을 나타내는) 방향성 결합기 설계가 가능한 것이다. 결국, 입력 경계면에서 발생하는 반사감도는 방향성 결합기를 설계할 때 그 표준(criterion)으로 널리 사용되는 결합길이와 같은 비중으로 사용이 가능한 새로운 기준이라 할 수 있다.

IV. 능동형 방향성 결합기의 결합길이

지금까지 방향성 결합기의 결합길이는 결합모드 이론에서 유도한 아래의 정의를 사용하여 왔다^[1].

$$L_c = \frac{\pi}{\text{Re}(k_{z,1} - k_{z,2})} \quad (8)$$

여기서, $k_{z,1}$ 과 $k_{z,2}$ 는 각각 방향성 결합기에서 발생하는 기모드와 우모드의 전파상수들이다. 그러나 능동형 방향성 결합기에서 이들 전파상수는 $k_{z,m} = \beta_m + i\alpha_m$ 와 같이 이득과 손실을 포함하는 복소수 값으로 표현된다. 그러므로 위의 식 (8)에 정의된 결합길이는 더 이상 능동형 전송구조를 갖는 방향성 결합기의 결합길이를 얻기 위하여 사용할 수 없다. 이를 위하여 본 장에서는 식 (6)의 결합효율에 기초하여 모든 종류 (즉, 수동형 또는 능동형)의 결합기 설계 시에 적용이 가능한 새로운 결합길이 관계식을 유도하고 정의하였다.

III장에서 분석하였듯이 만일 방향성 결합기가 최대 결합효율을 갖는 전력 등가분배조건에서 설계되었다면, 그때 입력 경계면에서 발생하는 반사감도는 거의 무시할 정도로 작게 나타났다. 그러므로 참고문헌 [5]에 정의된 식 (6)의 투과계수 T_V 에서 $\Gamma_{in} \approx 0$ 라 놓고 다시 쓰면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$T_V \approx T_1 e^{ik_{z,1}z} + T_2 e^{ik_{z,2}z} \quad (9)$$

여기서 T_1, T_2 는 입/출력 경계면에서의 변환상수들로 구성되는 기/우 모드들의 투과계수들이다. 그러므로 식 (9)를 식 (6)에 대입하고 풀면 결합효율은

$$\eta_{TE} = \text{Re} \left(\frac{\beta_{g1}}{\beta_{g2}} \right) |T_1 e^{ik_{z,1}z} + T_2 e^{ik_{z,2}z}|^2 \quad (10)$$

와 같고, 최대 결합효율은 $d\eta_{TE}/dz = 0$ 인 지점에서 주기적으로 발생함을 알 수 있다.

결국, 최대값을 얻기 위한 조건을 식 (10)에 적용하고 풀면 다음과 같은 일반화된 결합길이 관계식을 얻을 수 있다.

$$\pm \left\{ \alpha_1 |T_1|^2 e^{\mp \alpha_d z} + \alpha_2 |T_2|^2 e^{\pm \alpha_d z} \right\} + \text{Re} \left\{ (i\beta_d \pm \alpha_a) T_1 T_2^* e^{i\beta_d z} \right\} = 0 \quad (11)$$

여기서, $\alpha_a = \alpha_1 + \alpha_2$, $\alpha_d = \alpha_1 - \alpha_2$, $\beta_d = \beta_1 - \beta_2$ 이고 \pm 는 각각 이득과 손실을 갖는 전송구조에 대응하는 부호이다.

만일, 전송구조가 손실이나 이득이 없는 수동형 구조인 경우 (즉, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ 인 경우) 식 (11)는

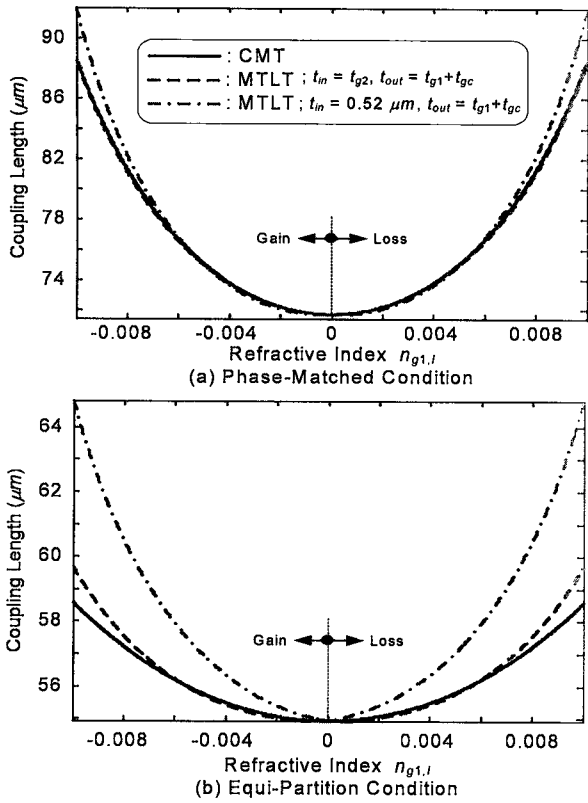


그림 5. 이득과 손실이 있는 능동형 방향성 결합기에서 TE₀ 모드에 대한 결합길이의 변화.
Fig. 5. Variation of coupling length for TE₀ mode at active directional coupler with loss/gain.

$$2\beta_d T_1 T_2 \sin(\beta_d z) = 0 \tag{12}$$

와 같이 줄어들고, 이 수동형 구조의 결합길이 관계식은 $\beta_d z = \pi$ 에서 첫 번째 해를 가지며 그 해는 결합모드 이론에서 정의된 식 (8)과 같은 관계식 $z = L_c = \pi / (\beta_1 - \beta_2)$ 로 나타낼 수 있다.

결국, 본 장에서 유도한 식 (11)를 이용하여 이득과 손실에 따라 변하는 능동형 방향성 결합기의 결합길이를 분석하였다. 분석을 위하여 그림 1(a)에 도시된 능동형 방향성 결합기의 상향 슬랩을 구성하는 GaAs의 굴절률을 $n_{g1} = 3.64 \pm i n_{g1,i}$ 와 같이 복소수 값으로 구성하였으며, 파장은 최대 결합효율을 위하여 전력 등가분배조건을 만족하도록 선택하였다. 그러므로 GaAs 굴절률의 허수성분인 $n_{g1,i}$ 의 변화에 따라 능동형 방향성 결합기는 이득과 손실성분을 갖는 전송구조로 동작하며, 그때 결합길이는 식 (11)에 의존하여 변하게 된다.

우선 $n_{g1,i}$ 가 음의 값을 가질 때를 고려하였다. 이때 능동형 방향성 결합기에서 전파하는 모드들은 이득을 갖는 전송구조에서 진행하게 되며, 그로 인하여 입력신

호는 전파방향을 따라 지수 함수적으로 증가하며 출력된다. 이와 같은 능동형 전송구조에서 이득이 증가함에 따라 결합길이가 어떻게 변하는지 그 물리적 특성을 그림 5에 자세하게 도시하였다.

위상정합조건을 만족하는 파장 $\lambda_{pmc} \approx 0.8802 \mu m$ 에서 고려된 그림 5(a)에서 보듯이, 이득이 증가함에 따라 결합길이가 지속적으로 증가함을 나타내고 있다. 또한, 결합모드이론에 기초한 식 (8)과 MTLT에 의존한 식 (11)에 의하여 얻어진 결합길이가 입력단자의 정렬 상태에 관계없이 $n_{g1,i} \approx -0.006$ 보다 작은 이득영역에서는 서로 유사함을 보였고, $n_{g1,i} \approx -0.01$ 인 이득에서도 약 4%의 차이를 나타내었다. 그러므로 이득을 갖는 능동형 방향성 결합기를 설계할 때 지금까지 사용되어 왔던 전통적인 위상정합조건을 사용하여도 그 결합길이를 결정하는데 큰 문제가 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 앞 절의 그림 3(d)에서 언급하였듯이 입/출력단자가 비 정렬된 경우에는 이 조건에서 최적의 결합효율이 발생하지 않음을 주목하여야 할 것이다.

다음으로, 전력 등가분배조건을 만족하는 파장 $\lambda_{epc} \approx 0.8638 \mu m$ 에서 이득의 증가에 따른 결합길이의 변화를 분석하였다. 그림 5(b)에서 보듯이, 입력단자가 정렬되어 있는 경우 결합모드이론과 MTLT에 의하여 얻어진 결과들은 $n_{g1,i} \approx -0.01$ 인 이득에서 약 2%의 차이를 보였다. 그러나 입력단자가 비 정렬인 경우 (즉, $t_{in} = 0.52 \mu m, t_{out} = t_{g1} + t_{gc}$ 인 경우)에 이득이 커짐에 따라 결합길이의 변화는 현저하게 증가하였으며, $n_{g1,i} \approx -0.01$ 인 이득에서 결합모드이론의 결과와 약 10% 이상의 차이를 나타내었다.

결국, 이득을 갖는 능동형 방향성 결합기를 다른 전송구조의 입/출력소자와 집적할 경우 최적의 결합효율을 얻기 위하여 입력 경계면에서의 소자 정렬이 매우 중요하며, 정렬이 어려운 경우에는 입력 경계면에서 발생하는 전력 균등분배조건과 식 (11)에 주어진 일반화된 결합길이 관계식을 이용하여 설계변수들을 결정하는 것이 최적의 집적소자 설계를 위한 필수적 과정이라 할 수 있다. 그와 같은 특성이 $n_{g1,i}$ 가 양의 값을 갖는 손실 특성의 전송구조에서도 잘 나타나 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 수동형 또는 능동형 전송구조에서 광 방향성 결합기의 결합효율을 정확하고 쉽게 분석할 수

있는 새로운 전력 등가분배조건을 정의하여 광 결합기의 설계특성을 분석하였다.

정의된 조건의 타당성을 보이기 위하여 기존에 널리 사용되어 왔던 두 조건, 즉 결합모드이론의 위상정합조건과 정확한 모드들의 분산특성에 의존하는 최소간격조건, 들과 비교 검토하였다. 그 결과, 입/출력단자가 결합기와 정렬되어 집적되었을 경우에 이득이나 손실이 없는 전송구조에서 결합기의 결합효율은 위상정합조건과 전력 등가분배조건에서 유사하게 나타났으며, 결합모드이론과 MTLT로부터 결정된 결합길이는 결합기가 수동형 또는 능동형에 상관없이 매우 근사적인 값을 보여 주었다.

그러나 입/출력단자가 결합기와 비 정렬되어 집적되었을 경우에 두 조건에서의 결합효율은 약 20%이상의 차이를 보였으며, 이득이나 손실이 있는 전송구조에서 두 이론으로부터 결정된 결합길이는 인 이득과 손실에 서 약 10% 이상의 차이를 나타내었다.

결국, 입/출력단자와 비 정렬된 능동형 방향성 결합기를 설계할 때, 입력 경계면에서의 반사감도 변화를 최소화하고 최적의 결합효율을 얻기 위하여는 본 논문에서 제시한 전력 등가분배조건과 일반화된 결합길이 관계식을 이용하여 설계변수들을 정확하게 결정해야 한다. 이는 다가오는 미래에 핵심 기술로 발전하고 있는 집적소자들의 소형화 기술인 정밀한 나노 크기의 결합기 소자 또는 향후 이용한도가 포화상태인 밀리미터파 대역의 대안으로 떠오르고 있는 100GHz에서 10 THz 사이의 terahertz 대역 통신 결합기 소자 개발에 필수적이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] H. A. Haus, W. P. Huang, "Coupled-mode theory," *Proc. of IEEE*, Vol. 79, pp. 1505-1518, 1991.
- [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, 김준한, 김영권, "광통신용 광 결합기의 모드 전송선로 해석법," 대한전자공학회지, 제 35권 7호, pp. 25-31, 1998.
- [4] K. C. Ho and K. Ho, "Longitudinal Modal Transmission-Line Theory (L-MTLT) of Multilayered Periodic Waveguides," *IEICE Trans.*

Electronics, Vol. E88-C, pp. 270-274, 2005.

- [5] 호광춘, "나노 양자우물구조를 이용한 광통신용 방향성 결합기의 설계," 한국광학회지, 제 16권, 제2호, pp. 162~166, 2005.
- [6] J. K. Butler, N-H Sun, G. A. Evans, L. Pang, and P. Congdon, "Grating-Assisted Coupling of Light between Semiconductor and Glass Waveguides," *J. Lightwave Technol.* vol. 16, pp. 1038~1048, 1998.

저 자 소 개

호 광 춘(정회원)

대한전자공학회 논문지

제40권 SD편 제4호 참조