

불연속 경계면을 갖는 광 방향성 결합기의 최적 결합효율을 위한 새로운 통합기준

호광춘

한성대학교 정보통신공학과
서울시 성북구 삼선동 3가 389번지

Novel Unified Criterion to Optimize Power Coupling at Optical Directional Couplers with Discontinuity Interface

Kwang-Chun Ho

Dept. of Information & Communications Eng., Hansung University,
389, Samsun-Dong 2-Ga, Sungbuk-Gu, Seoul 136-792, Korea

Abstract

Novel unified criterion to optimize power coupling at optical directional couplers with discontinuous input/output interfaces is first defined and evaluated numerically. The numerical results reveal that maximum power transfer between guiding slabs without discontinuous interfaces is dominated by conventional phase-matching condition while the guiding structures with discontinuous interfaces has maximum power transfer at an equi-partition condition, which describes the power distribution condition between two rigorous modes propagating through optical couplers.

I. 서론

오늘날 초고속 광통신을 위한 집적광학 (integrated optics)분야에서 광 소자들을 하나의 칩으로 구성하여 소형화하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나, 매우 중요한 하나의 문제는 소형화에 따른 서로 다른 전송구조들 사이의 결합문제이다. 즉, 전송구조가 다른 여러 단의 소자들을 하나의 칩으로 집적할 때 그 소자들 사이의 불연속 접합 경계면에서 발생하는 반사특성이 소형화를 위한 실질적인 문제점인 것이다.

지금까지 그림 1에서 보듯이 두 슬랩 (slabs)으로 구성된 광 방향성 결합기의 결합특성을 분석하기 위한 많은 방법들이 연구되어 왔다 [1-3]. 비록 이들 해석법들이 정확한 수치 해석적 결과들을 제공하지만, 광 방향성 결합기가 다른 광 전송소자들과 하나의

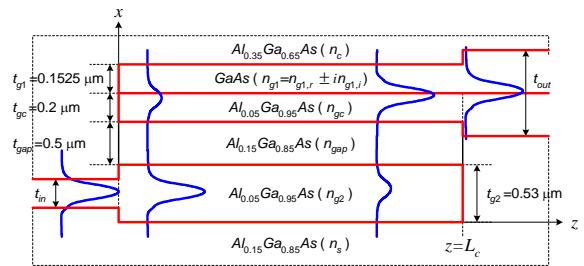


그림 1. 불연속 입/출력 경계면을 갖는 광 방향성 결합기.

칩으로 집적될 경우에 발생하는 문제를 고려하기에는 부족하다. 다시 말하면, 입/출력 경계면의 불연속성 (discontinuity) 특성에 기인한 반사특성을 분석하여 최적의 결합특성을 결정하기에는 미흡하다.

그러므로, 본 논문에서는 정확한 모드 전송선로 해석법 (MTLT)을 이용하여 입/출력 경계면의 불연속성을 고려한 새로운 결합효율 관계식을 유도하였다. 이 식을 이용하여 손실/이득 (Loss/Gain)을 포함하는 물질로 구성된 광 방향성 결합기의 최대 전력 전송을 위한 통합기준을 분석하였다.

II. 최대 전력전송 조건

그림 1에서 보듯이 본 논문에서 고려한 결합기는 전송 채널중의 하나는 이득을 갖는 GaAs 물질로, 다른 전송 층 (layers)들은 $Al_xGa_{1-x}As$ 물질로 구성하였으며, 그 굴절률은 Sellmeier 공식[4]을 이용하여 계산하였다.

이와 같은 광 방향성 결합기에서 가장 중요한

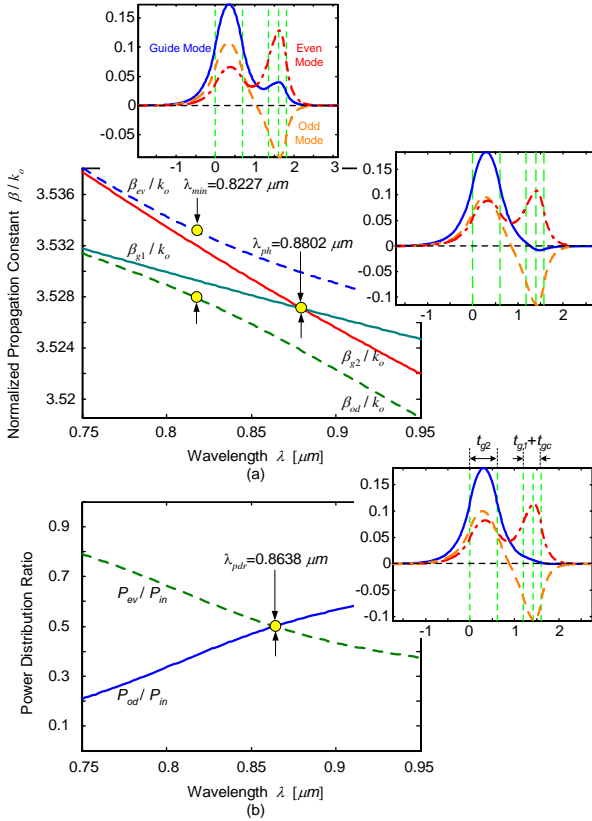


그림 2. TE₀ 모드에 대한 광 방향성 결합기의 (a) 분산곡선과 (b) 전력분배율.

특성중의 하나는 결합기를 통하여 전파하는 중첩모드의 그 전파상수를 결정하고, 결정된 전파상수로부터 광 결합기의 최적전력결합 조건을 발견하는 것이다. 지금까지 앞서 출판된 논문들에서 제시한 그 조건들은 크게 3 가지로 분류할 수 있다.

1. 결합모드이론에서 분리된 슬랩을 통하여 전파하는 모드들 (그림 2(a)에서 β_{g1} 과 β_{g2})에 의하여 정의되는 위상정합조건 (Phase-Matching Condition).
2. 중첩모드이론에서 광 결합기의 결합영역을 전파하는 정확한 기/우 모드들 (그림 2(a)에서 β_{ev} 과 β_{od}) 사이에서 발생하는 최소간격조건 (Minimum-Gap Condition).
3. 모드전송선로이론에서 입력 경계면을 통하여 광 결합기에 입사된 전력이 기/우 모드들의 전송전력 (그림 2(b)에서 P_{ev} 와 P_{od})으로 분배되는 특성에 기인한 등가분배조건 (Equipartition Condition).

그림 1 에 도시된 광 방향성 결합기에서 위에 분류된 특성들을 분석하기 위하여, 그림 2 에 그 분산곡선과 중첩모드들의 전력분배율 (Power Distribution Ratio)을 정의하고 고려하였다.

그림 1(a)에서 보듯이, TE₀ 모드가 입력단을 통하여 결합기에 입사된 경우 두께 $t_{g1} + t_{gc}$ 와 t_{g2} 의 분리된 상/하위슬랩을 통하여 각각 전파하는 모드들의 전파상수 β_{g1} 과 β_{g2} 가 서로 일치하는 위상정합조건이 $\lambda_{ph} = 0.8802 \mu m$ 에서 나타났으며, 광 결합기의 결합영역을 전파하는 정확한 기/우 모드들의 전파상수 β_{ev} 과 β_{od} 이 가장 유사한, 즉 $|\beta_{ev} - \beta_{od}|$ 이 최소값을 갖는, 최소간격조건이 $\lambda_{min} = 0.8227 \mu m$ 에서 나타났다. 더욱이, 본 논문에서 제안하고 고려하는 기/우 모드들의 전송전력 P_{ev} 와 P_{od} 가 서로 일치하는 등가분배조건이 그림 1(b)에서 보듯이 $\lambda_{pdr} = 0.8638 \mu m$ 에서 나타났다. 또한, 삽입도에서 보듯이, $z = 0$ 인 입력단에서 발생하여 광 결합기를 통하여 전파하는 전송모드 (Guide Mode)는 등가분배조건에서 가장 좋은 분포특성을 나타내었다. 즉, 위상정합조건과 최소간격 조건에서 전송모드들의 일부 전송전력이 두께 $t_{g1} + t_{gc}$ 의 상위슬랩에 잔류함을 보였다.

III. 전파 모드의 최적 결합효율

2 장에서 언급한 3 가지 조건들에 대한 광 방향성 결합기의 전력전송 특성을 분석하기 위하여 본 장에서는 모드전송선로이론에 기초한 결합효율을 정의하고 전파거리에 따른 변화를 수치해석을 하였다.

이를 위하여 광 방향성 결합기를 통하여 $z = 0$ 인 입력단에서 입사하는 입력 전력에 대한 임의의 거리 $z = L_c$ 인 출력단을 통하여 방출되는 출력 전력의 그 비율, 즉 결합효율을 아래와 같이 정의하였다 [5].

$$\eta = \frac{P_{out}(z=L_c)}{P_{in}(z=0)} = \text{Re} \left(\frac{k_{z,out}}{k_{z,in}} \right) \left(\left| \frac{V_{out}^{(+)}(L_c)}{V_{in}^{(+)}(0)} \right| \right) \quad (1)$$

여기서, $k_{z,in}, k_{z,out}$ 은 입/출력 영역에서의 전파상수를 나타내며, $V_{in}^{(+)}(0), V_{out}^{(+)}(L_c)$ 는 진행방향 (forward propagating direction)에서의 입/출력 모드

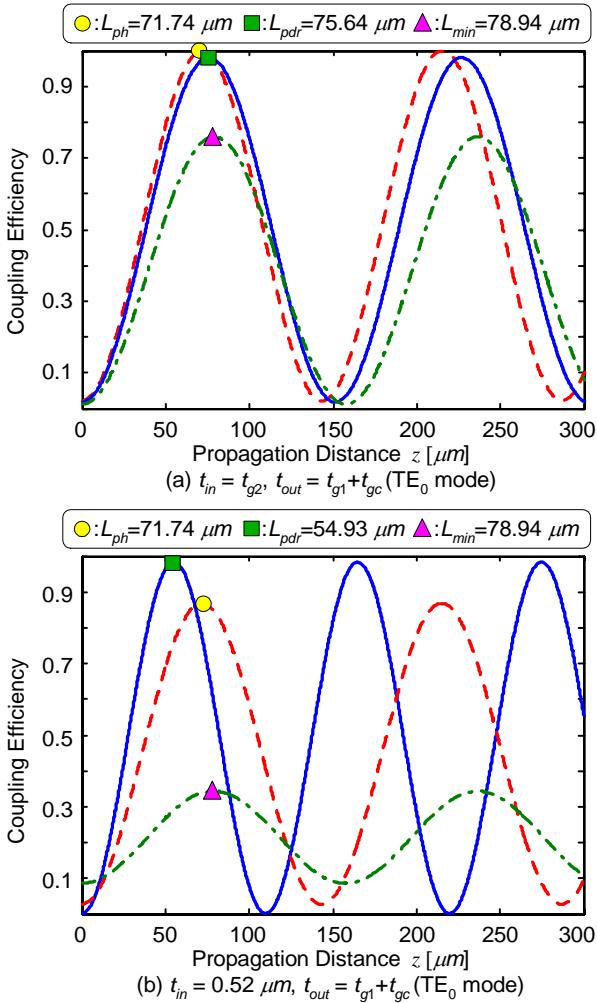


그림 3. TE_0 모드에 대한 광 방향성 결합기의 결합효율.

전압들이다.

위의 식 (1)을 적용하여, 2 장에서 언급한 3 가지 조건들 (즉, 위상정합조건, 최소간격조건, 등가분배조건)에 대한 결합효율을 수치 해석하였다. 그림 3(a)에서 보듯이, 입/출력 단에서 전송 슬랩들 사이의 불연속특성이 없는 경우 지금까지 정의되어 왔던 위상정합조건에서 광 방향성 결합기의 결합효율은 결합길이 $L_{ph} = 71.74 \mu\text{m}$ 에서 약 99% 이상으로 나타났다. 더욱이, 등가분배조건에서는 위상정합조건에서 보다 1% 정도 효율이 저하된 약 98%를 나타냈으며, 최소간격조건에서는 25% 정도가 저하된 약 74%의 효율을 나타냈다.

그러나, 불연속 경계면의 반사특성을 고려한 광 전력전송은 지금까지 알려져 왔던 위상정합조건

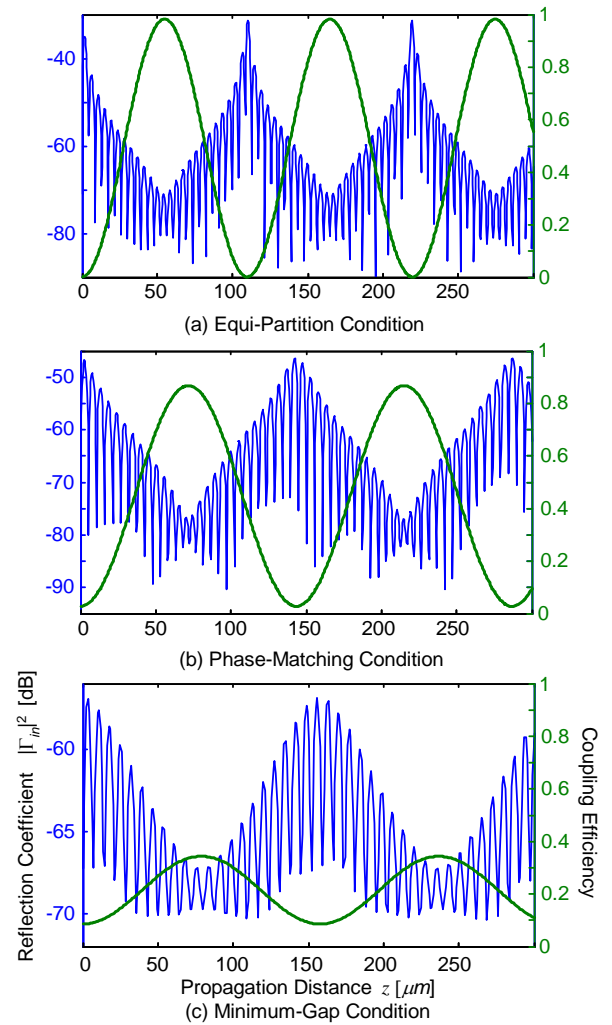


그림 4. 그림 3(b)에 대한 불연속 입력 경계면에서의 반사전력.

λ_{ph} 이나 결합영역에서 발생하는 전송모드들 사이의 최소간격조건 λ_{min} 에서 발생하지 않고, 전송모드들의 전력분배율이 서로 같은 새로운 통합기준인 등가분배조건 λ_{pdr} 에서 발생하였다.

그림 3(b)에서 보듯이, 광 신호가 입사되는 입력영역의 슬랩 두께가 $t_{in} = 0.52 \mu\text{m}$ 인 경우 광 결합기에서 상/하위 슬랩들 사이의 최대 결합효율은 결합길이가 $L_{pdr} = 54.93 \mu\text{m}$ 인 등가분배조건에서 99% 이상의 효율을 보여 주었다. 반면에, 위상정합조건에서는 등가분배 조건에서 보다 14% 정도가 저하된 약 85%의 효율이 결합길이 $L_{ph} = 71.74 \mu\text{m}$ 에서 나타났다. 또한, 최소간격조건에서는 현저한 효율 저하가

발생하였다.

결국, 광 결합기를 하나의 칩으로 구성하여 소형화할 때 발생하는 불연속 경계면은 지금까지 정의되어 왔던 위상정합조건이나 최소간격 조건으로 분석할 수 없으며, 본 논문에서 제시하는 등가분배조건을 이용하여 정확하게 분석할 수 있음을 알 수 있다.

마지막으로, 그림 3(b)에 대한 불연속 입력 경계면에서 발생하는 반사전력을 2장에서 언급한 3 가지 조건하에서 분석하였다. 그림 4 에서 보듯이, 광 방향성 결합기의 전파거리에 따른 반사전력의 포락선 (envelope) 변화는 3 가지 조건 모두 -40dB 이하의 낮은 값을 나타냈으며, 결합효율에 의존하여 변화하였다. 특히, 결합효율이 가장 큰 최대 전력전송에서는 반사전력의 포락선 변화가 최소가 됨을 알 수 있었다.

그러므로, 불연속 입/출력 경계면을 갖는 광 방향성 결합기를 다른 소자와 결합하여 하나의 칩으로 집적할 때 본 논문에서 제시한 방법과 같이 최적 결합효율을 올바르게 결정할 수 있다면, 소자들 사이에서 발생하는 반사특성은 무시하고 설계하여도 전송특성에 미치는 영향은 미미할 것이다.

IV. 결론

정확한 중첩모드와 입/출력 경계면에서의 모드 반사계수를 고려한 모드 전송선로 해석법을 이용하여 불연속 입/출력 경계면을 갖는 광 방향성 결합기의 결합효율을 해석하였다. 가장 좋은 결합특성을 나타내는 최적의 통합조건을 결정하기 위하여 광 결합기의 그 분산곡선과

전력분배율을 고려하였고, 이를 이용하여 최대 전력전송을 위한 새로운 조건을 제시하였다.

더욱이, 전파거리에 따른 반사계수의 감도 변화에 기초하여 최대 전력전송을 위한 결합길이가 명확하게 결정될 수 있음을 보였다. 결국, 정확한 모드 전송선로 해석법은 다른 해석법으로 분석하기에 부족한 광학적 특성들의 분석에 좋은 대안을 제공할 뿐만 아니라, 컴퓨터를 이용한 광 소자 소형화 설계에 뛰어난 프로그래밍 알고리즘으로 이용될 수 있음을 보였다.

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.
- [5] 호광춘, "나노 양자우물구조를 이용한 광통신용 방향성 결합기의 설계," 한국광학회지, 제 16 권 2 호, pp. 162~167, 2005.