

논문 2008-45SD-11-5

새로운 격자 구조형 다중모드 간섭 결합기의 전파특성에 관한 수치 해석적 고찰

(Numerical Investigation on Propagation Characteristics of Novel
Grating-Assisted MMI Coupler)

호 광 춘*

(Kwang-Chun Ho)

요 약

새로운 격자 구조형 다중모드 간섭(GA-MMI) 결합기의 전파특성이 횡방향 모드 전송선로 이론(L-MTLT)을 이용하여 이론적으로 자세하게 고찰되었다. 격자구조의 두께와 duty cycle의 변화에 따른 2×2 GA-MMI 결합기의 결합특성을 분석하였으며, 파장변화에 따른 출력 특성을 수치해석 하였다. 수치해석 결과 격자구조의 변화에 따른 GA-MMI 결합기의 결합길이와 결합효율은 작은 허용오차(tolerance)를 나타냈으며, 대역폭은 출력특성에 따라 현저한 차이를 나타내었다.

Abstract

The propagation characteristics of novel grating-assisted multimode interference (GA-MMI) coupler are explicitly and theoretically investigated by using longitudinal modal transmission-line theory (L-MTLT). The coupling efficiency of GA-MMI coupler is evaluated along the variation of grating thickness and duty cycle, and the spectrum is analyzed numerically. The numerical results reveal that the coupling length and the efficiency of 2×2 GA-MMI coupler along the variation of grating structure have low tolerance and the bandwidth varies dramatically along the output states.

Keywords : Multimode Interference Coupler, Grating-Assisted Waveguide, Equivalent Transmission-Line Network

I. 서 론

다중모드 간섭 결합기 (multimode interference couplers: MMICs)에 기초한 소자들은 링 레이저, Mach Zehnder 간섭기, 광 스위치와 같은 전력분배가 필요한 집적 광소자에 널리 이용되어 오고 있다^[1]. 최근, 평판 polymer 도파로 위에 Bragg 격자구조를 갖는 MMI 결합기를 집적하여 광 add-drop 다중화기를 위한 필터로 사용할 수 있음을 보였으며^[2], Bragg 격자구조가 집적된 편광 무의존성 MMI 결합기의 설계가 가능함을 보였다^[3].

그러나 Bragg 격자구조가 집적된 MMI 결합기는 Bragg 격자구조와 MMI 결합기 구조를 각각 설계하여, 하나의 칩으로 집적해야 하는 번거로움이 있으며, 파장변화에 따른 출력 특성을 분석하여 설계 할 때 두 소자의 서로 다른 스펙트럼 특성들을 동시에 고려하여 설계해야 하는 어려움이 있다. 또한, 긴 소자길이와 서로 다른 특성의 두 소자를 집적할 때 발생하는 문제점들로 인하여 집적소자를 제작하는데 많은 어려움을 발생시킨다.

이와 같은 연유로 인하여 본 논문에서는 그림 1(a)에서 보듯이, 격자구조와 MMI 결합기 구조를 결합하여 하나의 집적소자로 구성되는 매우 작은 크기의 새로운 격자 구조형 (Grating-Assisted) MMI 결합기를 처음으로 제안하였다.

제안한 3D GA-MMI 결합기의 전파특성을 이론적으

* 정회원, 한성대학교 정보통신공학과
(Dept. of ICs Engineering, Hansung University)
※ 본 연구는 2008년도 한성대학교 교내연구비 지원과
제입니다.
접수일자: 2008년8월4일, 수정완료일: 2008년10월28일

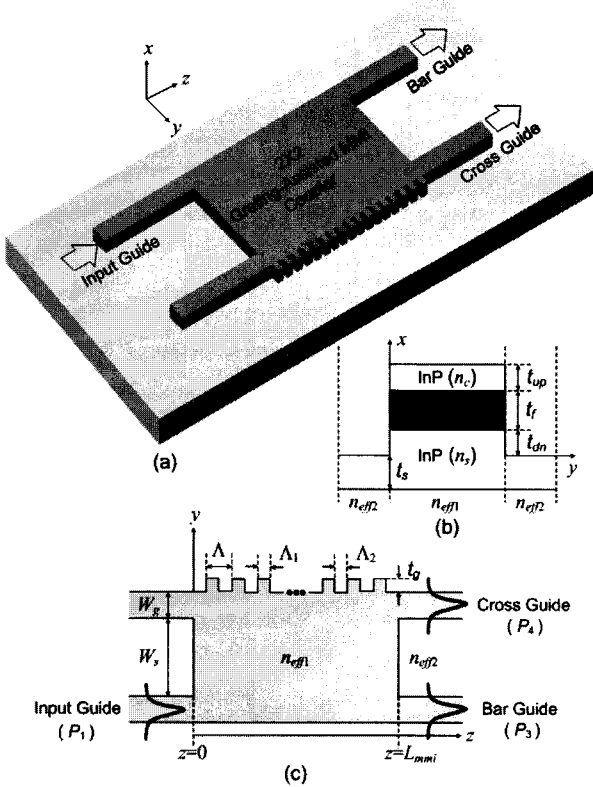


그림 1. (a) 3D GA-MMI 결합기의 기하학적 구조, (b) GA-MMI 결합기를 구성하는 rib 도파로의 단면도, (c) 2D 구조로 근사화된 전체적인 평면도.
 Fig. 1. (a) Schematic configuration of the 3D GA-MMI coupler, (b) Side view of the rib guide consisted of GA-MMI coupler, (c) Overall top view of the equivalent 2D guiding structure.

로 고찰하기 위하여 등가 망 해석법 (equivalent network approach: ENA)^[4]과 종방향 모드 전송선로 해석법 (longitudinal modal transmission-line theory: L-MTL)^[5]을 적용하였다.

또한, 설계 시 소자변수들을 결정하는 중요한 요소인 격자구조의 두께 t_g 와 격자의 비 대칭성을 나타내는 duty cycle Λ_1/Λ (그림 1(c) 참조)에 따라 결합길이와 결합특성이 어떻게 변하는지 분석하였고, 그 파장특성을 3종류의 출력상태 (즉 3dB, cross, bar state)에 따라 비교 분석하였다.

II. GA-MMI 결합기의 모드특성

3D GA-MMI 결합기와 같이 rib형 광 전송구조로 형성된 방향성 결합기는 rib형 도파로의 높이와 그 전송 폭에 따라 전송 굴절률이 변화하며 이에 의존하여 전송 모드들 사이의 결합길이가 증가하거나 감소한다. 이러

한 변수들에 의존하는 GA-MMI 결합기가 그림 1에 자세하게 도시되어 있다.

그림 1(b)에서 보듯이, GA-MMI 결합기는 두께 $t_s = 2.0 \mu\text{m}$ 인 기판 위에 두께 $t_{dn} = 0.5 \mu\text{m}$, 굴절률 $n_s = 3.17$ 인 InP, 두께 $t_f = 0.5 \mu\text{m}$, 굴절률 $n_f = 3.38$ 인 InGaAsP, 두께 $t_{up} = 1.5 \mu\text{m}$, 굴절률 $n_c = 3.17$ 인 InP 층들로 구성된 전송 채널을 갖도록 설계하였다. 또한, 입력 도파로와 cross/bar 도파로들의 폭은 $W_g = 1.0 \mu\text{m}$ 로 설계하였으며, 입력 도파로들 사이의 간격은 $W_s = 2.0 \mu\text{m}$ 로 선택하였다. 그때 광 GA-MMI 결합기에 존재하는 모드는 본질적으로 전파 방향에 따라 준 (quasi)-TE 모드와 준-TM 모드로 분류되며, 만일 고려되는 전파방향이 z -축이라면 우리는 이 모드들을 각각 TE_{nm}^z 형, TM_{nm}^z 형 혼성 모드 (hybrid mode)라 정의한다.

이와 같은 혼성모드들을 분석하기 위하여 그림 1(a)에 주어진 3D 구조를 그림 1(c)와 같은 2D 구조로 간소화시켜야 한다. yz -평면 상에 구성된 등가 2D 구조로 간소화하기 위하여 파장 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 의 모드가

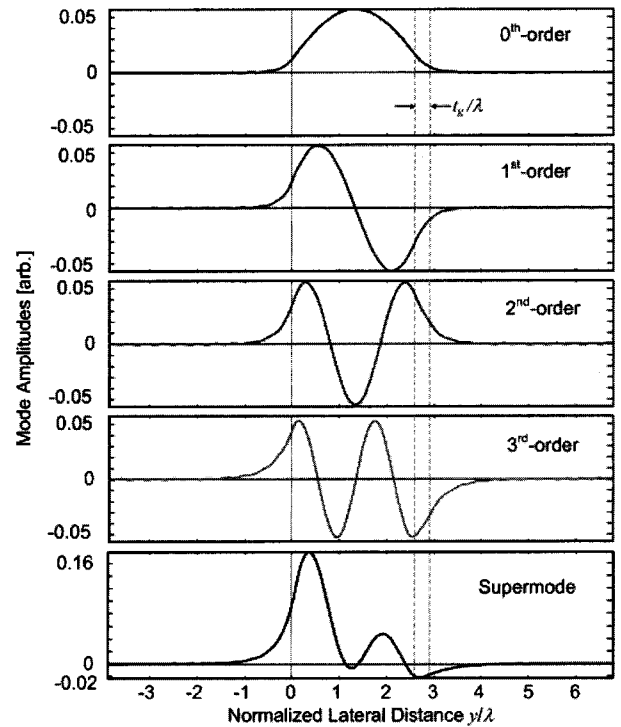


그림 2. GA-MMI 결합기에서 전파하는 모드들의 lateral 필드분포와 4개의 전파모드들이 결합된 중첩 모드.
 Fig. 2. Lateral field distribution of modes propagating at GA-MMI coupler, and the supermode composed by the 4 guiding modes.

GA-MMI 결합기에 입사한다고 가정하자. 그 때 모드 전송선로 이론의 ENA^[4]을 적용하면 각 영역들의 유효 굴절률 (n_{eff1}, n_{eff2})이 결정되며, 그림 1(c)와 같은 yz -평면 상에 구성된 등가 2D 구조를 얻을 수 있다.

이 등가화된 2D GA-MMI 결합기 내에서 전파하는 모드들이 그림 2에 자세하게 도시되어 있다. 그림에서 보듯이, 격자구조의 높이를 $t_g = 0.1 \mu m$ 로, 격자주기를 $\Lambda = 0.5 \mu m$, 그리고 duty cycle을 $\Lambda_1/\Lambda = 0.5$ (대칭 격자구조)로 선정하여 설계한 GA-MMI 결합기에서 총 4개의 전파모드들이 발생하였다. 이들 모드들은 전파거리에 따라 상호 결합하여 GA-MMI 결합기의 결합특성을 지배하는 중첩모드 (supermode)를 생성한다.

결국, 등가화된 이 2D 전송구조에 L-MTLT를 적용하여 GA-MMI 결합기에서 전파하는 혼성 전파모드들 간의 결합특성과 그 결합길이를 정확하게 분석할 수 있다.

III. GA-MMI 결합기의 결합효율

II장에서 고려된 4개의 전파모드들이 상호 중첩되어 GA-MMI 결합기의 전파특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 구체적인 타당성을 보이기 위하여, GA-MMI 결합기의 전송 특성을 분석할 수 있는 결합효율 (coupling efficiency)과 결합길이 (coupling length)를 L-MTLT에 기초하여 유도하고 정의하였다.

그림 1(c)에서 보듯이, 2D GA-MMI 결합기를 통하여 전파하는 필드는 x -축 상의 변화가 없고, 입력 모드는 하향 도파로를 통하여 입사 되어 cross나 bar 도파로를 통하여 전송된다고 가정하였다. 그때, L-MTLT^[5]에 의하여 입/출력 단에서의 TE_{nm}^z 모드에 대한 정확한 횡 방향 전계 성분은

$$E_r(y, z) = V_r(z)e_r(y) \quad (1)$$

와 같이 정의할 수 있으며, GA-MMI 결합기 내에서 전파하는 전계는 그림 2에 주어진 $N = 4$ 개의 전파모드들이 아래와 같이 선형적으로 결합하여 표현된다.

$$E_{mmi}(y, z) = \sum_{m=1}^N \left\{ V_m(z) \sum_n e_{jn}^{(m)}(y) e^{i(2n\pi/\Lambda)z} \right\} \quad (2)$$

여기서, r 은 입/출력 영역에서 각각 in 또는 out 을 나타내며, 모드 전압은 $V_m(z) = V_{0,m} \exp(ik_{z0,m}z)$ 와 같고, $e_{jn}^{(m)}(y)$ 은 n 번째 공간고조파 (space harmonic wave)의

필드분포를 나타낸다.

결국, 입력 경계면 $z = 0$ 에서 식 (1)와 (2)의 전계 분포에 대하여 경계조건을 적용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$V_{in}(0)e_{in}(y) = \sum_{m=1}^N \left\{ V_m(0) \sum_n e_{jn}^{(m)}(y) \right\} \quad (3)$$

또한, 결합기의 입력 단에서 발생한 중첩모드는 길이 $z = L_{mmi}$ 만큼 진행한 후 출력 단에서 아래의 경계조건을 만족하며 출력된다.

$$V_{out}(L_{mmi})e_{out}(y) = \sum_{m=1}^N \left\{ V_m(L_{mmi}) \sum_n e_{jn}^{(m)}(y) e^{i(2n\pi/\Lambda)L_{mmi}} \right\} \quad (4)$$

이때 위의 식(3)과 (4)에 각각 TE_{nm}^z 모드의 직교조건^[5]을 적용하고 풀면 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$V_m(0) = T_{in,m} V_{in}(0), \\ V_{out}(L_{mmi}) = V_{in}(0) \sum_{m=1}^N \left\{ T_{in,m} T_{m,out} e^{ik_{z0,m}L_{mmi}} \right\} \quad (5)$$

여기서, 입/출력 변환상수들 (input/output transformation coefficients)은 아래와 같이 주어진다.

$$T_{in,m} = \frac{1}{C_m} \int_{cs} \left\{ e_{in}(y) \sum_r \left\{ k_{zr,m} e_{jr}^{(m)}(y) \right\} dS \right\}, \\ T_{m,out} = \int_{cs} \left\{ e_{out}^*(y) \sum_n \left\{ e_{jn}^{(m)}(y) e^{i(2n\pi/\Lambda)L_{mmi}} \right\} dS \right\} \quad (6)$$

결국, 정규화 상수 C_m 을 포함하는 식(6)을 정리하면, TE_{nm}^z 모드에 대한 입력전력에 대한 출력전력의 비율을 나타내는 결합효율 (coupling efficiency)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta_{TE_{nm}^z} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \text{Re} \left(\frac{k_{z,out}}{k_{z,in}} \right) \left| \frac{V_{out}(L_{mmi})}{V_{in}(0)} \right|^2 \\ = \text{Re} \left(\frac{k_{z,out}}{k_{z,in}} \right) \left| \sum_{m=1}^N \left\{ T_{in,m} T_{m,out} e^{ik_{z0,m}L_{mmi}} \right\} \right|^2 \quad (7)$$

여기서, $k_{z,in}$ 과 $k_{z,out}$ 은 각각 입력영역 $z < 0$ 과 출력영역 $z > L_{mmi}$ 에서 TE_{nm}^z 모드의 전파상수를 나타낸다. 더욱이, 각 출력 상태 (즉 3dB, cross, bar state)에서의 결합길이(coupling length)는 출력 단에서 방출되는 전력의 세기인 결합효율을 분석하여 수치 해석적으로 정확하게 결정할 수 있다.

같은 방법으로, L-MTLT에서 정의된 자체성분들을 이용하면 TM_{nm}^z 모드가 z -축을 따라 전파하는 경우에 그 전파 모드들 간의 결합효율을 정의할 수 있다.

IV. GA-MMI 결합기의 전송특성 분석

앞 장에서 유도하고 정의한 식 (7)의 결합효율을 이용하여 본 논문에서 처음으로 설계구조를 제시한 GA-MMI 결합기의 전송특성을 수치 해석하였다. 즉, GA-MMI 결합기 설계 시에 중요한 변수들로 작용하는 격자 높이 t_g , 격자 duty cycle Λ_1/Λ , 그리고 파장 λ 의 변화에 따른 전송특성들을 수치 해석하였다.

첫 번째로, 격자 높이 t_g 가 변할 때 입력 도파로를 통하여 입사된 TE_{nm}^z 모드가 결합길이 L_{mmi} 를 진행한 후에 하향(bar state: 전력이 P_1 에서 입사되어 P_3 로 출력되는 상태) 또는 상향(cross state: 전력이 P_1 에서

입사되어 P_4 로 출력되는 상태) 도파로를 통하여 어떻게 출력되는지를 분석하였다. 이 때 격자주기는 $\Lambda = 0.5 \mu m$, duty cycle은 $\Lambda_1/\Lambda = 0.5$ 와 같이 선택하였다.

그림 3에서 보듯이, 격자 높이 t_g 가 $0.1 \mu m$, $0.2 \mu m$, $0.4 \mu m$ 로 변할 때 하향 (bar state) 도파로를 통하여 출력되는 광신호의 전력은 각각 결합길이 $L_{bar} = 384.4 \mu m$, $390.3 \mu m$, $399 \mu m$ (그림 3(a)의 삽입도 참조) 에서 최대의 Cross Talk = $10\log(P_3/P_4)^{[6]}$ 를 나타냈으며, 그 때 결합효율은 각각 $\eta_{TE_{nm}^z} = 0.756$, 0.74 , 0.65 와 같이 주어졌다. 또한, 상/하향 도파로를 통하여 전력이 균등하게 분배되어 발생하는 3dB state (즉 전력이 P_1 에서 입사되어 P_3 와 P_4 로 균등하게 분배되어 출력되는 상태) 의 경우 그림 3(b)의 첫 번째 삽입도에서 보듯이 출력전력은 각각 결합길이 $L_{3dB} = 95.6 \mu m$, $97 \mu m$, $99.5 \mu m$ 에서 Splitting Ratio = $10\log(P_3/P_4)^{[6]}$ 가 거의 0값을 나타냈으며 그 때 결합효율은 각각 $\eta_{TE_{nm}^z} = 0.478$, 0.46 , 0.46 와 같이 주어졌다. 더욱이, 상향 (cross state) 도파로를 통하여 출력되는 경우 (그림 3(b)의 두 번째 삽입도 참조)에는 각각 결합길이 $L_{cross} = 192.7 \mu m$, $195 \mu m$, $199.5 \mu m$ 에서 최소의 Cross Talk 을 나타냈으며 그 때의 결합효율은 각각 $\eta_{TE_{nm}^z} = 0.92$, 0.915 , 0.88 와 같았다.

결국, 오직 4개의 전파모드들 만이 발생하도록 제한한 격자 높이의 구간 ($t_g = 0.1 \mu m \sim 0.4 \mu m$)에서 얻어진 수치해석 결과에서 보듯이 격자높이가 변함에 따라 GA-MMI 결합기의 결합효율과 결합길이는 3dB state의 경우 최대 약 0.01과 약 $4 \mu m$, bar state의 경우 최대 약 0.1과 약 $15 \mu m$, 그리고 cross state의 경우 최대 약 0.04와 약 $7 \mu m$ 의 변화를 보였다. 그러므로, 결합길이가 가장 짧은 3dB state에서 GA-MMI 결합기를 설계할 경우 격자 높이의 변화가 설계특성에 큰 영향을 미치지 않으나, 긴 결합길이 때문에 격자 높이의 변화에 가장 민감한 bar state에서는 최적의 결합효율을 얻을 수 있는 설계변수를 고려해야만 한다.

두 번째로, GA-MMI 결합기의 중요한 설계변수 중 하나인 duty cycle Λ_1/Λ 의 변화 (즉, 격자의 비 대칭성) 에 따른 전송특성을 분석하였다. 이 때 분석결과의 일관성을 유지하기 위하여 duty cycle이 변하는 구간 ($0.1 \sim 0.9$)에서 오직 4개의 전파모드들 만이 GA-MMI 결합기의 전송특성에 영향을 주도록 격자높

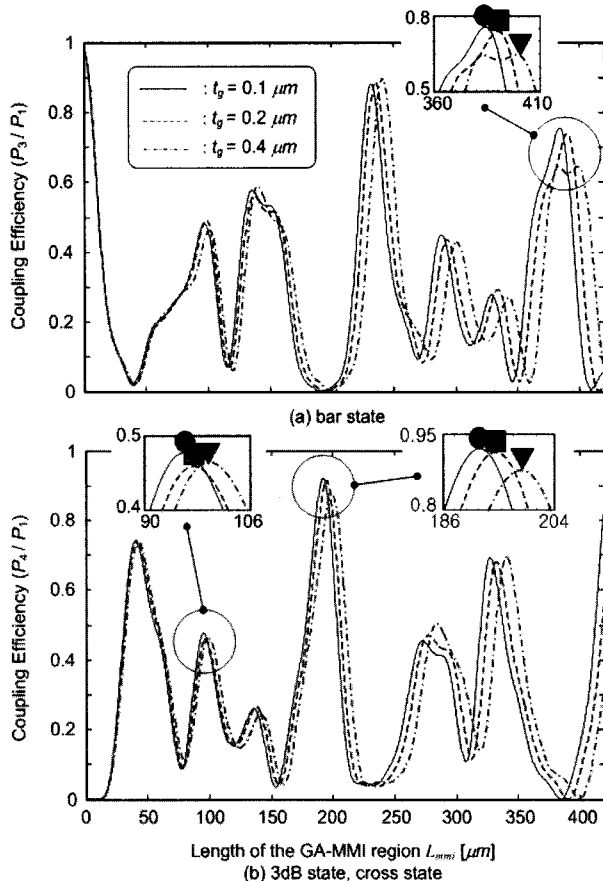


그림 3. GA-MMI 결합기의 길이에 따른 결합효율의 변화 (a) bar state 그리고 (b) 3dB, cross state.

Fig. 3. Variation of coupling coefficient along with the length of GA-MMI coupler (a) bar state and (b) 3dB, cross state.

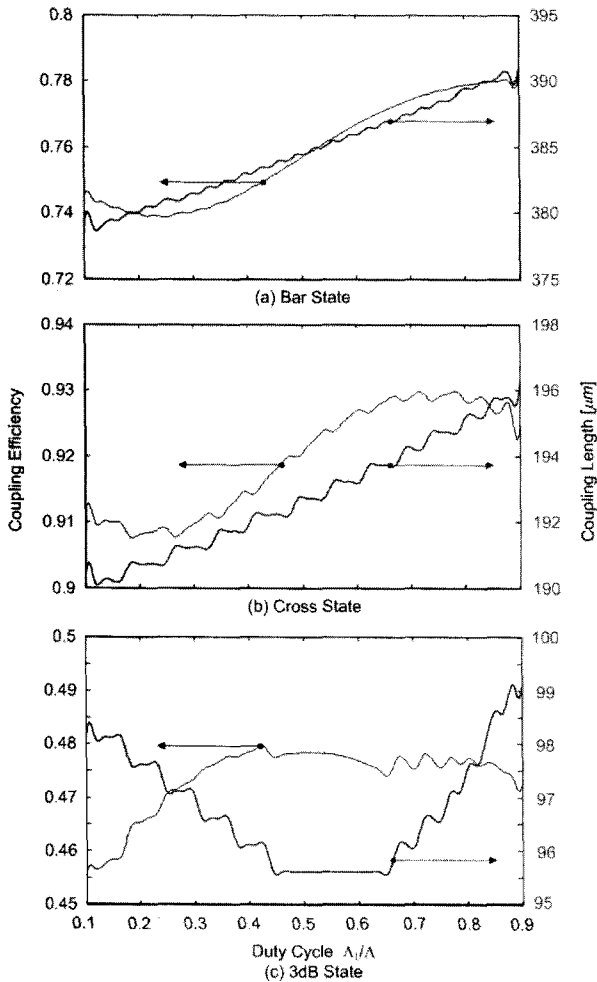


그림 4. GA-MMI 결합기의 duty cycle에 따른 결합효율과 결합길이의 변화 (a) bar state, (b) cross state, 그리고 (c) 3dB state.

Fig. 4. Variation of coupling efficiency and coupling length along with the duty cycle of GA-MMI coupler (a) bar state, (b) cross state and (c) 3dB state.

이와 격자주기는 각각 $t_g = 0.1 \mu\text{m}$ 와 $\Lambda = 0.5 \mu\text{m}$ 로 선택하였다.

그림 4(a)에서 보듯이, 출력특성이 bar state인 경우 결합효율은 약 0.74 ~ 0.78 사이에서 변화하였으며 결합길이는 약 $380 \mu\text{m} \sim 390 \mu\text{m}$ 의 변화를 보였다. Duty cycle이 0.1에서 0.9로 변함에 따라 결합길이는 지속적으로 증가하는 특성을 나타냈으나 결합효율은 $\Lambda_1/\Lambda \approx 0.25$ 근처에서 최소값을 갖고 변화했다. 그러므로 최대 출력전력을 얻기 위해서는 가능한 0.9에 가까운 가장 큰 duty cycle 값을 선택하여야 한다.

또한, 그림 4(b)에 도시된 cross state의 경우 결합효율은 약 0.91 ~ 0.93 사이에서 변화하였으며 결합길이는 약 $192 \mu\text{m} \sim 196 \mu\text{m}$ 의 변화를 보였다. Duty cycle이

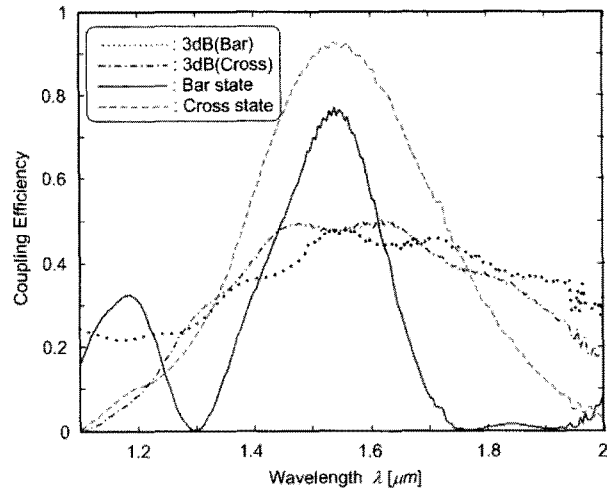


그림 5. GA-MMI 결합기의 파장에 따른 결합효율의 변화.

Fig. 5. Variation of coupling efficiency along with the wavelength of GA-MMI coupler.

변함에 따라 결합길이는 bar state와 같이 지속적으로 증가하였으나, 결합효율은 $\Lambda_1/\Lambda \approx 0.25, 0.75$ 근처에서 각각 최소값과 최대값을 나타내었다. 그러므로 최대 출력전력을 얻기 위해서는 0.75 근처의 duty cycle 값을 선택하여야 한다.

같은 조건하에서 그림 4(c)에 3dB state의 경우를 분석하였다. 이 경우 P_1 에서 입사된 전력이 P_4 로 출력되는 상태 (즉 3dB cross state)를 분석하였다. 유사한 결과를 보여주는 P_3 로 출력되는 상태 (즉 3dB bar state)는 그림에 도시하지 않았다. 그림에서 보듯이, 결합효율은 약 0.46 ~ 0.48 사이에서 변화하였으며 $\Lambda_1/\Lambda \approx 0.5$ 근처에서 최대값을 나타내었고, 결합길이의 변화구간은 약 $96 \mu\text{m} \sim 99 \mu\text{m}$ 사이였으며 $\Lambda_1/\Lambda \approx 0.5$ 근처에서 최소값을 나타내었다. 그러므로 최적의 3dB state의 GA-MMI 결합기를 설계하기 위해서는 약 0.5 (즉, 격자구조는 대칭형태)의 duty cycle을 선택해야 한다.

마지막으로, 본 논문에서 처음으로 설계특성을 제시한 GA-MMI 결합기의 스펙트럼 (파장)특성을 분석하였다. 그림 5에서 보듯이, bar state와 cross state의 대역폭 (bandwidth: BW)은 각각 $BW_{bar} \approx 0.15 \mu\text{m}$ 와 $BW_{cross} \approx 0.25 \mu\text{m}$ 로 나타났으며, 3dB state는 3dB bar state와 3dB cross state에서 각각 $BW_{3dB} \approx 0.56 \mu\text{m}$ 와 $BW_{3dB} \approx 0.48 \mu\text{m}$ 의 파장특성을 보였다. 그러므로 GA-MMI 결합기가 3dB state용 소자로 설계되었을 때 가장 넓은 대역 (broadband)용 소자로 사용이 가능하며, bar state용으로 설계되었을

때 대역폭이 cross state보다 약 40%, 그리고 3dB state보다 약 70% 좁은 대역 (narrowband)용 소자로 사용할 수 있음을 보였다.

V. 결 론

새로운 3D 격자 구조형 다중모드 간섭 (GA-MMI) 결합기의 전파특성을 횡방향 모드 전송선로 이론 (L-MTLT)과 등가 망 해석법 (ENA)을 이용하여 이론적으로 자세하게 고찰하였다. 2×2 GA-MMI 결합기의 결합특성을 이론에 기초하여 격자구조의 두께와 duty cycle의 변화에 따라 수치해석 하였으며, 파장변화에 따른 대역폭 특성을 분석 하였다.

수치해석 결과 결합길이가 가장 짧은 3dB state에서의 결합효율은 격자높이의 변화에 대한 의존성이 작았으며, 반면에 결합길이가 가장 큰 bar state에서의 결합효율은 격자높이의 변화에 매우 큰 의존성을 나타내었다. 더욱이, GA-MMI 결합기의 중요한 설계변수인 duty cycle의 변화에 대한 의존성은 3종류의 출력특성에서 각각 다른 수치해석 결과를 보였다. 즉, bar state에서는 duty cycle이 클수록 결합특성이 좋았으며, cross state에서는 임의의 duty cycle에서 최대값이 나타났다. 그리고 3dB state에서는 격자구조가 대칭인 조건 (duty cycle이 0.5인 조건)에서 최소 결합길이와 최대 결합효율을 나타내었다. 또한, 대역폭은 3dB, cross, bar state 순으로 점점 협대역 특성을 나타냈다.

참 고 문 헌

- [1] L. Soldano and E. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and applications," J. Lightwave Technol., vol. 13, pp. 615 - 627, 1995.
- [2] Liu Zhu, Y. Huang, and A. Yariv, "Integration of a Multimode Interference Coupler With a Corrugated Sidewall Bragg Grating in Planar Polymer Waveguide," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 18, pp. 740 - 742, 2006.
- [3] 호광춘, "Bragg 격자구조가 집적된 편광 무의존성 방향성 결합기와 다중모드 간섭결합기의 설계," 한국광학회지, 제 18권 5호, pp. 1-8, 2007.
- [4] 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, pp. 843-855, 1981.

- [5] K. C. Ho, and K. Ho, "Longitudinal Modal Transmission-Line Theory (L-MTLT) of Multilayered Periodic Waveguides," IEICE Trans. Electronics, vol. E88-C, No. 2, pp. 270-274, February 2005.
- [6] L. B. Soldano, F. B. Veerman, M. K. Smit, B. H. Verbeek, A. H. Dubost, and E. C. M. Pennings, "Planar Monomode Optical Couplers Based on Multimode Interference Effects," J. Lightwave Technol., vol. 10, pp. 1843 - 1849, 1992.

저 자 소 개

호 광 춘(정회원)
대한전자공학회 논문지
제40권 SD편 제4호 참조