논문 2010-47SD-1-3

계단형 다중모드 간섭 결합기를 사용한 소자의 소형화

(Device Miniaturization Using Stepped Multimode-Interference Couplers)

호 광 춘*

(Kwang-Chun Ho)

요 약

전송폭과 굴절률이 서로 다른 다중모드 간섭 결합기 (MMICs)를 계단형으로 연결하면 전형적인 방법으로 설계된 다중모드 간섭 결합기의 결합길이를 현저하게 줄일 수 있는 새로운 구조가 본 논문에서 제안되었다. 전송폭이 82%의 cross 결합효율에 대하여, 결합길이는 약 6.7%가 줄어들었다. 그러나, 전송폭과 굴절률이 계단형인 다중모드 간섭 결합기에서는 약 93%의 결합효율과 약 9%의 결합길이 축소가 발생하였다. 더욱이, 소형 다중모드 간섭 결합기를 설계하기 위하여 널리 사용되는 테이퍼 구조를 계단형으로 구성하면, 약 90%의 결합효율과 약 25%가 축소된 소형 다중모드 간섭 결합기를 설계할 수 있음을 보였다.

Abstract

In this paper, a novel architecture for device miniaturization of multimode interference-based couplers (MMICs) is proposed by replacing conventionally designed MMICs by cascaded two-section stepped-width or stepped-index MMICs. For the 82% cross coupling efficiency in a stepped-width MMIC, the coupling length of device results in just 6.7% length reduction. However, for a stepped-width and stepped-index MMIC, the coupling efficiency increases to 93% and the length reduction of 9% occurs. Furthermore, with additional incorporation of tapered devices, it shows that a compact MMIC can be designed in which the coupling efficiency is 90% and the length is reduced to 25%.

Keywords: Stepped MMI Couplers, Optical Waveguide Devices, Device Miniaturization

Ⅰ. 서 론

최근, 위상 배열 WDM 필터나 all-optical 네트워크 시스템을 위한 고밀도 광 집적소자 제작을 위하여 소형 도파로 소자들이 필수적으로 사용되고 있다[1~2]. 이들 소자 중에서 다중모드 간섭 결합기 (multimode interference couplers: MMICs)는 전력분배나 결합에 필요한 집적 광소자에 널리 이용되어 오고 있다. 그러나, 링 (ring)형 공진기와 자주 집적하여 사용되는 다중모드 간섭 결합기는 높은 결합효율을 얻기 위하여 매우 긴 결합길이가 필요하며, 이는 높은 Q 값을 갖는 링 형 공진기를 제작하는데 반드시 해결해야만 하는 문제점으로 작용한다.

일반적으로, 다중모드 간섭 결합기의 결합길이를 줄이기 위하여 입/출력 단자들의 간격을 가능한 근접하게 설계하여 왔으며, 다중모드 간섭 결합기의 결합 영역에서 발생하는 간섭모드들을 선택적으로 결합시켜 왔다[3]. 또한, 평판 (straight) 형태의 다중모드 간섭 결합기 구조를 테이퍼 (tapered)나 나비형 (butterfly) 구조로 제작하여 부가적으로 결합길이를 축소하였다[4~5]. 그러나 이러한 중요한 결과에 비추어 기존에 제시하여 왔던 방법들로 설계 된 다중모드 간섭 결합기를 다른 광 소자와 결합하여 하나의 소형 집적소자로 구성하기에는 아직 소자크기가 크며, 더욱 소형화된 설계기법이 요구되

* 정회원, 한성대학교 정보통신공학과
(Dept. of ICs Engineering, Hansung University)
※ 본 연구는 2009년도 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.
접수일자: 2009년5월21일, 수정완료일: 2009년12월26일

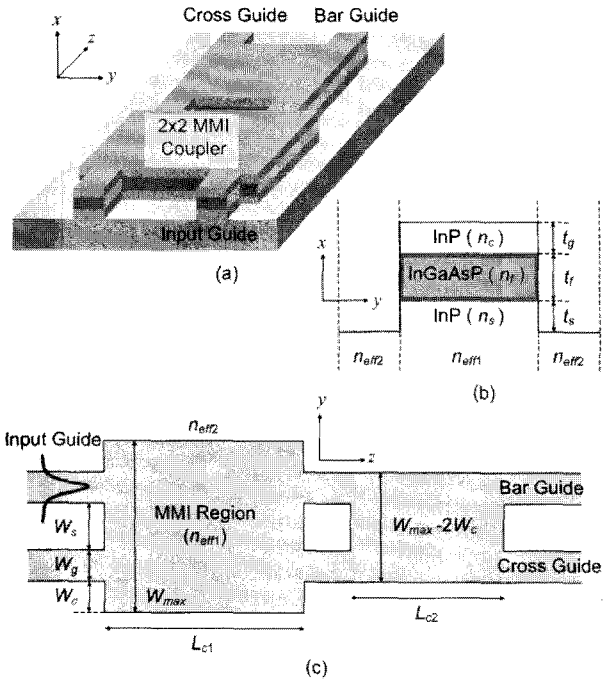

그림 1. 계단형 다중모드 간섭 결합기에서의 (a) 기하학적 3-D 구조, (b) 립 (rib) 도파로의 단면도, 그리고 (c) 전체적인 2-D 평면도.

Fig. 1. (a) Schematic configuration of the 3D stepped-MMI coupler, (b) Side view of the rib guide, and (c) Overall top view of the equivalent 2D guiding structure.

고 있다.

이를 위하여 본 논문에서는 우선 소형 다중모드 간섭 결합기를 제작하기 위한 설계원리를 자세하게 언급하였으며, 그 특성을 수치 해석적으로 입증하기 위하여 유효 유전체 방법 (Effective Dielectric Method: EDM)[6]을 기반으로 하는 종방향 모드 전송선로 해석법 (longitudinal modal transmission line theory: L-MTLT)[7]을 사용하여 결합길이와 결합효율를 분석하였다. 그에 기초하여 본 논문에서 제안한 계단형 (stepped) 다중모드 간섭 결합기를 이용하여 소자를 소형화 할 때 발생하는 제약사항 (limitations)들을 수치 해석적으로 비교 분석하였다.

Ⅱ. 소형 다중모드 간섭 결합기의 설계원리

제안한 계단형 다중모드 간섭 결합기의 기하학적 구조를 그림 1에 도시하였다. 그림 1(b)에서 보듯이, 다중모드 간섭 결합기는 두께 $t_s = 0.5\,\mu m$, 굴절률 $n_s = 3.17$ 인 InP, 두께 $t_f = 0.5\,\mu m$, 굴절률 n_f 인

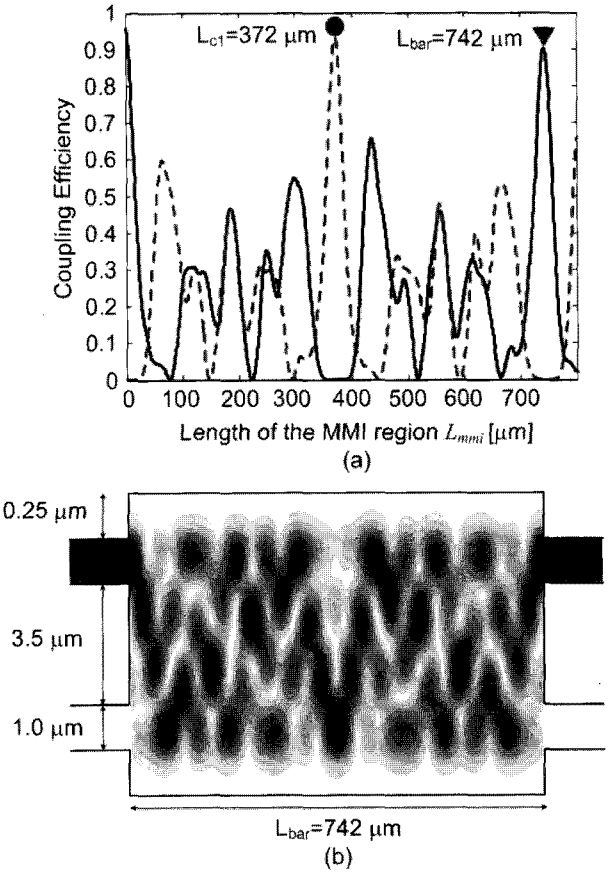

그림 2. 전형적인 다중모드 간섭 결합기에서 전파거리에 따른 (a) 결합효율의 변화와, 그에 대응하는 (b) 2D 필드분포도.

Fig. 2. (a) Variation of coupling efficiency at conventional MMIC, and (b) the corresponding 2D field distribution.

InGaAsP, 두께 $t_g = 1.5\,\mu m$, 굴절률 $n_g = 3.17$ 인 InP 층들로 구성된 립 (rib)형 전송 채널을 갖도록 설계하였다. 또한, 입력 도파로와 cross/bar 도파로들의 폭은 $W_g = 1.0\,\mu m$, 도파로들 사이의 간격은 $W_s = 3.5\,\mu m$로 설계하였으며, 다중모드 간섭 결합기의 전송폭은 $W_{max} = 6.0\,\mu m$로 선택하였다.

그때 다중모드 간섭 결합기에 존재하는 모드는 본질적으로 전파 방향에 따라 준 (quasi)-TE 모드와 준-TM 모드로 분류되며, 만일 동작파장 $\lambda = 1.55\,\mu m$인 모드가 입사되어 $z-$축을 따라 전파한다면 이 모드들을 각각 TE^z_{nm} 형, TM^z_{nm} 형 혼성 모드 (hybrid mode)라 정의한다. 이들 혼성모드들을 분석하기 위하여 $xy-$평면상에서 $y-$축 방향으로 EMD에 기초한 횡방향 공진 조건 (transverse resonance condition)[5~6]을 적용하면 각 전송 영역들의 유효 굴절률 (n_{eff1}, n_{eff2})

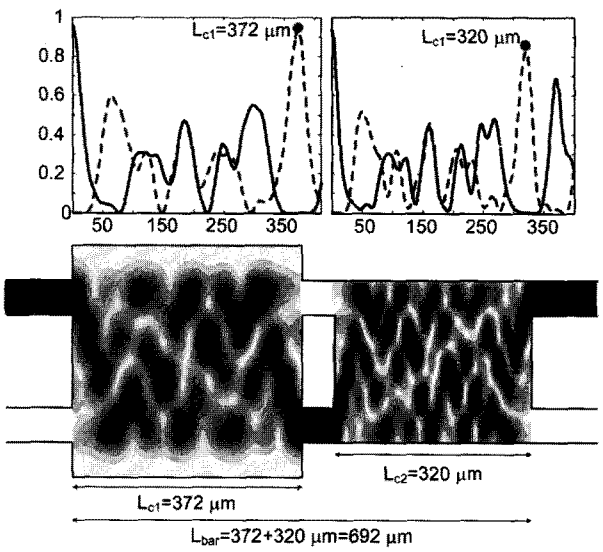

그림 3. 전송폭이 계단형인 (SW) 다중모드 간섭 결합기 구조에서 전파거리에 따른 (a) 결합효율의 변화와, 그에 대응하는 (b) 2D 필드분포도.

Fig. 3. (a) Variation of coupling efficiency at stepped-width (SW) MMIC, and (b) the corresponding 2D field distribution.

을 결정할 수 있고, 그림 1(c)와 같은 $yz-$평면상에 구성된 등가 2-D 구조를 얻을 수 있다. 그러므로, 등가화된 이 2-D 전송구조에 L-MTLT를 적용하면 계단형 다중모드 간섭 결합기에서 전파하는 혼성 모드들 간의 결합특성과 그 결합길이를 정확하게 분석할 수 있다.

일반적으로 다중모드 간섭 결합기와 같이 립 형 전송구조로 형성된 전송소자는 립 형 도파로의 높이와 그 전송 폭에 따라 전송 굴절률이 변화하며 이에 의존하여 전송 모드들 사이의 결합길이가 증가하거나 감소한다. 그와 같은 특성을 갖는 다중모드 간섭 결합기의 결합길이는 다중모드 영역에서 발생하는 기본모드와 1st-order모드의 전파상수 간격에 의하여 정의되는 beat length L_π[1]에 의하여 결정된다.

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \cong \frac{4n_e W_e^2}{3\lambda_0} \tag{1}$$

여기서, λ_0는 자유공간에서의 파장을 나타내고, n_e와 W_e는 다중모드 간섭 결합기 영역의 유효 굴절률과 유효 전송폭을 나타낸다.

결국, 위의 식에서 보듯이 소형 다중모드 간섭 결합기를 설계하기 위하여는 beat length를 가능한 줄여야 하며, 이를 구현하기 위한 방법은 2가지가 있다. 첫 번째 방법은 유효 전송폭 W_e의 크기를 줄이는 방법이고, 둘째는 기본모드와 1st-order모드의 전파상수 간격 $(\beta_0 - \beta_1)$을 증가시키는 것이다. 이와 같은 설계원리들은 실질적으로 다중모드 간섭 결합기의 전송폭 W_{max}를 감소시키거나 립 형 도파로의 core 굴절률 n_f를 증가시킴으로써 구현할 수 있다.

III. 계단형 다중모드 간섭 결합기의 설계특성

그림 1(c)에서 보듯이 계단형 다중모드 간섭 결합기를 통하여 전파하는 필드는 $x-$축 상의 변화가 없고, 입력 모드는 상향 도파로를 통하여 입사 되어 cross나 bar 도파로를 통하여 전송된다고 가정하였다. 그때, 필드 정규화 직교조건과 모드 정합조건을 입/출력 단과 다중모드 간섭 결합기 영역에서 전파하는 모드들에 적용하면, TE_{nm}^z 형 모드에 대한 입력 전력에 대한 출력 전력의 비율인 결합효율을 아래와 같이 유도할 수 있다[5].

$$\eta = Re\left(\frac{k_{z,out}}{k_{z,in}}\right)\left|\sum_{m=1}^{N}\left\{T_{in,m}T_{m,out}e^{ik_{z,m}L_{(c1,c2)}}\right\}\right|^2 \tag{2}$$

여기서, $k_{z,in}$과 $k_{z,out}$은 각각 입/출력 영역에서 TE_{nm}^z 형 모드의 전파상수를 나타내고, N은 다중모드 간섭 결합기 영역에서 전파하는 중첩모드의 수를 나타낸다. 또한, 입/출력 경계면에서 발생하는 입/출력 변환상수 (input/output transformer coefficient)는 각 영역에서 전파하는 모드들의 횡방향 필드분포에 의하여 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} T_{in,m} &= \int e_{in}(y)e_m^*(y)dy, \\ T_{m,out} &= \int e_m(y)e_{out}^*(y)dy \end{aligned} \tag{3}$$

우선 L-MTLT에 기초하여 유도한 식 (2)를 이용하여 립 형 도파로의 코어 굴절률이 $n_f = 3.337$인 다중모드 간섭 결합기의 결합효율을 수치 해석하였다. 그림 2(a)에서 보듯이 TE_{11}^z 형 모드가 입력 도파로를 통하여 입사되었을 경우, 입사된 광신호는 결합길이 $L_{c1} = 372\,\mu m$를 진행한 후에 cross 도파로를 통하여 약 94%의 결합효율 갖는 전력을 출력하였으며, $L_{bar} = 742\,\mu m$를 진행한 후에는 약 90%의 전력을 bar 도파로를 통하여 방출하였다.

이때 만일 bar 상태에서 전력을 방출하는 소형 다중

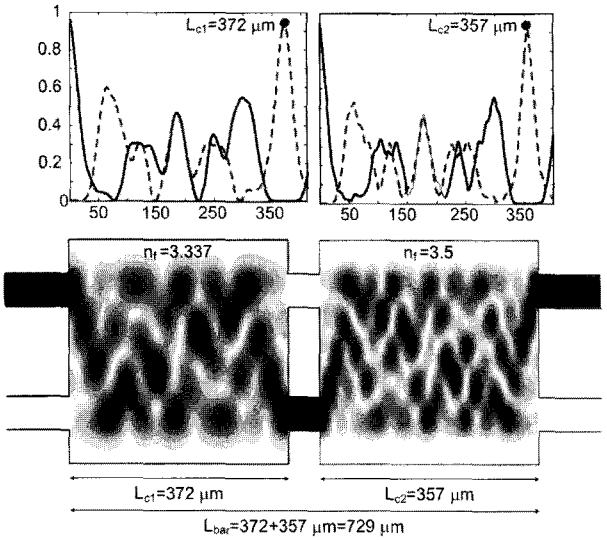

그림 4. 굴절률이 계단형인 (SI) 다중모드 간섭 결합기 구조에서 전파거리에 따른 (a) 결합효율의 변화와, 그에 대응하는 (b) 2D 필드분포도.

Fig. 4. (a) Variation of coupling efficiency at stepped-index (SI) MMIC, and (b) the corresponding 2D field distribution.

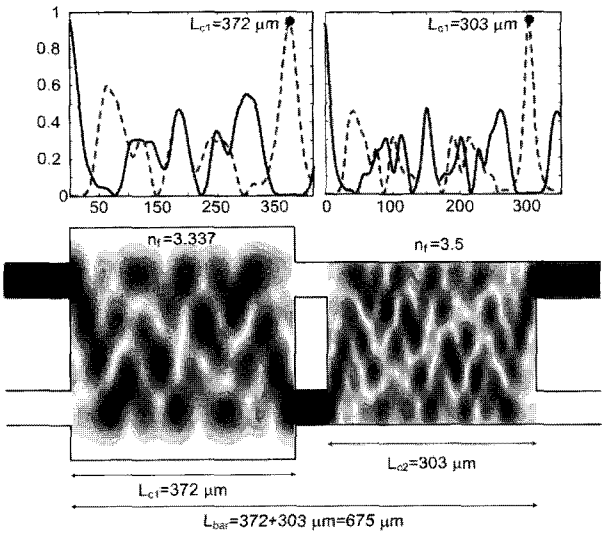

그림 5. 전송폭과 굴절률이 모두 계단형인 (SW-SI) 다중모드 간섭 결합기 구조에서 전파거리에 따른 (a) 결합효율의 변화와, 그에 대응하는 (b) 2D 필드분포도.

Fig. 5. (a) Variation of coupling efficiency at stepped-width (SW) and stepped-index (SI) MMIC, and (b) the corresponding 2D field distribution.

모드 간섭 결합기를 설계하고자 한다면, 2절에서 언급한 설계 원리를 적용하여 소자의 소형화가 가능하다. 즉, 그림 2의 구조를 이용하여 결합길이가 $L_{c1} = 372\,\mu m$인 cross 도파로를 먼저 설계하고 소형 다중모드 간섭 결합기 설계원리를 적용한 구조 (예를 들어, 전송폭이 축소된 구조나 core의 굴절률이 큰 구조)를 설계하여 두 소자를 계단형으로 연결하면 그림 2의 구조보다 매우 소형화된 다중모드 간섭 결합기의 설계가 가능하다는 것이다. 이에 대한 구체적인 설계도가 그림 1에 도시되어 있다.

이에 대한 타당성을 명확하게 확인하기 위하여 그림 3에 전송폭이 계단형인 (Stepped-Width: SW) 다중모드 간섭 결합기 구조에 대하여 전파거리에 따른 결합효율의 변화를 수치해석 하였다. 그림 3(a)에서 보듯이, SW 다중모드 간섭 결합기의 첫 번째 단의 cross 결합길이는 $L_{c1} = 372\,\mu m$로 그림 (2)의 구조와 같다. 그러나 전송폭이 $W_{max} - 2W_c = 5.5\,\mu m$로 축소된 두 번째 단의 전송구조에서는 cross 결합길이가 $L_{c2} = 320\,\mu m$로 나타났다. 그러므로 bar 상태에서 전력을 방출하도록 설계된 SW 다중모드 간섭 결합기의 총 소자길이는 그림 2의 전형적인 구조보다 약 6.7% 감소한 $L_{bar} = 692\,\mu m$가 되었다. 이때 결합효율은 약 82%로 매우 낮게 나타났다. 그림에서 보듯이, 측정된 결합길이에는 계단형인 두 단을 연결하는 도파로의 길이는 포함하지 않았다. 왜냐하면, 소자를 제작할 때 연결 도파로 없이 두 단을 직접 연결하면 되기 때문이다. 본 논문에서는 전력전송의 메커니즘을 쉽게 이해할 수 있도록 연결 도파로를 사용하여 그림을 도시 한 것이다.

또한, 본 논문에서 수치 해석적 결과들을 제시하지 않았지만, 설계된 SW 다중모드 간섭 결합기의 전송폭이 줄어들면 들수록 그 결합효율이 현저하게 떨어지는 현상이 나타났다. 이와 같은 특성은 SW 다중모드 간섭 결합기의 첫 번째 단과 두 번째 단 사이의 불연속 특성이 커짐에 기인한 것이라 설명할 수 있다. 결국, 낮은 결합효율 구조의 SW 다중모드 간섭 결합기 대한 성능을 향상시키기 위하여 2절에서 언급한 또 다른 소자 소형화 기준을 이용하여 소자를 설계하여야 한다. 즉, 굴절률이 계단형 (Stepped-Index: SI)인 다중모드 간섭 결합기를 설계하여 SW 다중모드 간섭 결합기의 소형화 특성과 융합하여야 한다.

그림 4에서 보듯이, 다중모드 간섭 결합기의 전송폭은 $W_{max} = 6.0\,\mu m$로 유지하고 두 번째 단을 구성하는 립 형 도파로의 코어 굴절률을 $n_f = 3.5$ 로 증가 시킨 결과 두 번째 단의 전송구조에서는 cross 결합길이

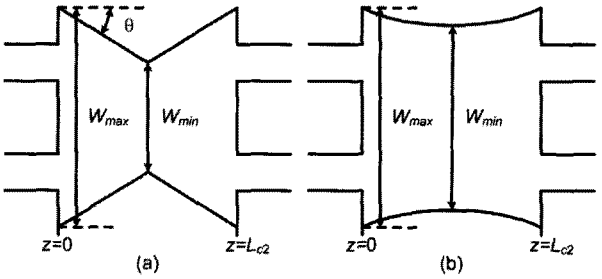

그림 6. 테이퍼 다중모드 간섭 결합기의 기하학적 구조: (a) 나비형 테이퍼 다중모드 간섭 결합기, (b) 포물선형 테이퍼 다중모드 간섭 결합기.

Fig. 6. Geometric configuration of tapered MMIC: (a) butterfly tapered MMIC, and (b) parabolic tapered MMIC.

가 $L_{c2} = 357\,\mu m$로 나타났다. 이 설계구조는 그림 2의 전형적인 구조보다 약 1.8% 정도 축소되었으며, 결합효율은 약 91%로 그림 3의 SW 다중모드 간섭 결합기 구조보다 약 9 % 높게 나타났다.

결국, 결합효율이 높은 소형 다중모드 간섭 결합기를 설계하기 위한 방법은 SW 다중모드 간섭 결합기의 특성과 SI 다중모드 간섭 결합기의 특성을 결합한 SW-SI 다중모드 간섭 결합기를 구현하는 것이다. 이에 대한 결과가 그림 5에 자세하게 도시되어 있다. 그림에서 보듯이, 설계된 SW-SI 다중모드 간섭 결합기의 두 번째 단에서 cross 결합길이는 $L_{c2} = 303\,\mu m$로 나타났다. 이 설계구조는 그림 2의 전형적인 구조보다 결합길이는 약 9% 축소되었으며, 결합효율은 약 93%로 앞서 설계한 구조들 보다 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 전송폭이 줄어 결합길이가 감소하였으며, 줄어든 전송폭에 기인한 결합효율의 감소는 립 형 도파로의 굴절률을 높여 전파하는 중첩모드들의 전송 집결력을 높임으로써 결합효율을 증가시키는 물리적 의미에 기인한 것이다.

마지막으로, 본 논문에서 제시한 소형화 설계기준이 소자의 소형화를 위하여 지금까지 널리 사용되어 오고 있는 테이퍼 다중모드 간섭 결합기에도 적용이 가능함을 보였다. 설계를 위하여 사용된 테이퍼 구조의 전송폭은 그림 6에서 보듯이 아래와 같은 테이퍼형태로 변한다고 정의하였다.

$$W(z) = W_{min} + (W_{max} - W_{min})\left|1 - \frac{2z}{L_{c2}}\right|^{\sigma} \qquad (4)$$

여기서, 그림 6(a)의 나비형 (butterfly) 구조에 대한 σ값

Cascaded MMI	Coupling Length	Efficiency
(a)	L_{c2}=311 μm, L_{bar}=683 μm	92.2%
(b)	L_{c2}=300 μm, L_{bar}=672 μm	91.6% (W_{min}=5.0 μm)
	L_{c2}=232 μm, L_{bar}=604 μm	77.8% (W_{min}=4.0 μm)
SW MMI	Coupling Length	Efficiency
(c)	L_{c2}=272 μm, L_{bar}=644 μm	86.6%
(d)	L_{c2}=255 μm, L_{bar}=627 μm	82.6% (W_{min}=4.5 μm)
	L_{c2}=192 μm, L_{bar}=564 μm	72.1% (W_{min}=3.5 μm)

그림 7. 직렬로 연결된 테이퍼 구조와 전송폭이 계단형인 (SW) 테이퍼 다중모드 간섭 결합기의 결합길이와 결합효율.

Fig. 7. Coupling length and coupling efficiency of SW MMIC cascaded by tapered MMIC.

은 1이며, 그림 6(b)의 포물선형 (parabolic) 구조에 대한 σ값은 2이다.

이 두 테이퍼 구조를 전형적인 다중모드 간섭 결합기 구조와 계단형으로 연결하여 그 설계특성을 분석하였다. 그림 7(a)에서 보듯이, 나비형인 경우 전형적인 구조보다 결합길이는 약 8% 축소되었으며, 결합효율은 약 92.2%로 나타났다. 포물선형인 경우에는 그림 7(b)에서 보듯이 W_{min}이 $5.0\mu m$에서 $4.0\mu m$로 변함에 따라 결합길이는 $L_{bar} = 672\,\mu m$에서 $604\,\mu m$로 약 10% 감소를 보였으나, 결합효율은 약 91.6%에서 약 77.8%으로 현저하게 저하되었다. 또한, 앞서와 같은 소형화 개념을 적용하여 전송폭이 축소된 계단형 테이퍼 (Tapered SW) 다중모드 간섭 결합기에 대한 설계특성을 분석하였다. 그림 7(c)와 (d)에서 보듯이, 결합길이는 줄었으나, 결합효율은 전반적으로 90% 이하로 나타났다. 특히 $W_{min} = 3.5\,\mu m$에서 결합길이는 $L_{bar} = 564\,\mu m$로 그림 2의 구조보다 약 24% 축소되었으나, 결합효율은 약 72.1%로 현저하게 낮게 나타났다.

이에 대한 해결방안으로 그림 8에서 보듯이, 립 형 도파로의 코어 굴절률을 $n_f = 3.5$로 증가 시킨 테이퍼 SW-SI 다중모드 간섭 결합기를 구현하여 그 설계특성을 분석하였다. 그림 8(b)에서 보듯이, $W_{min} = 4.0\,\mu m$

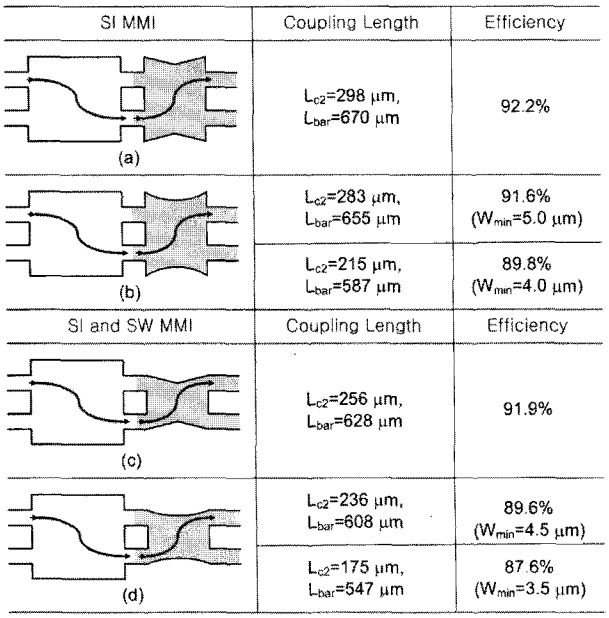

그림 8. 굴절률이 계단형인 (SI) 구조와 전송폭과 굴절률이 모두 계단형인 (SW-SI) 테이퍼 다중모드 간섭 결합기의 결합길이와 결합효율.

Fig. 8. Coupling length and coupling efficiency of SI and SW-SI MMIC cascaded by tapered MMIC.

인 포물선형 테이퍼 SI 다중모드 간섭 결합기는 그림 7(b)의 다중모드 간섭 결합기 구조에 비하여 결합길이는 약 17μm, 결합효율은 약 12% 증가됨을 보였다. 더욱이, 그림 8(d)에서 보듯이 포물선형 SW-SI 다중모드 간섭 결합기 구조에서는 결합길이가 $L_{bar} = 547\mu m$로 그림 2의 구조보다 약 26.3% 축소된 특성을 나타내었으며, 결합효율도 약 87.6%로 높게 나타났다. 그러므로 본 논문에서 제시한 소형 다중모드 간섭 결합기의 설계원리는 기존에 사용되어 왔던 모든 종류의 다중모드 간섭 결합기의 소형화 방법들과 결합하여 사용이 가능하다.

Ⅳ. 결 론

종방향 모드 전송선로 이론 (L-MTLT)과 등가 망 해석법 (EDM)을 결합하여 3D 구조인 계단형 다중모드 간섭 결합기의 결합길이를 축소하기 위한 새로운 이론적 설계기법을 제시하였으며, 수치 해석을 통하여 그 소형화 특성을 분석하였다. 그 결과 본 논문에서 제안한 전송폭과 굴절률이 계단형인 (SW-SI) 다중모드 간섭 결합기로 소자를 설계할 경우 기존의 소형화 방법에 부가하여 결합길이를 축소시키고 결합효율을 증가 시킬 수 있음을 보였다.

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] C. Herben, C. Vreeburg, J. Leijtens, H. Block, F. Groen, I. Moerman, J. Pedersen, and M. Smit, "Chirping of an MMI-PHASAR demultiplexer for application in multiwavelength lasers," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 9, pp. 1116-1118, 1997.

[3] D. Levy, Y. Li, R. Scarmozzino, and R. Osgood, Jr., "A new design for ultracompact multimode interference-based 2×2 couplers," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 10, pp. 96-98, 1998.

[4] 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.

[5] 호광춘, "새로운 격자 구조형 다중모드 간섭 결합기의 전파특성에 관한 수치 해석적 고찰," 대한전자공학회지, 제 45권 11호, pp. 1060-1065, 2008.

[6] 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.

[7] 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.

저 자 소 개

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