

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.2.47>

JIIBC 2013-2-7

플라즈마 계단형 다중모드 간섭 결합기의 모드 특성

Modal Characteristics of Plasmonic Multimode Interference Couplers with Stepped Structure

호광춘*

Kwang-Chun Ho

요 약 플라즈마 다중모드 간섭 결합기 (MMIC)를 계단형으로 구성하여 전형적인 방법으로 설계된 MMIC 보다 결합길이를 현저하게 줄일 수 있는 새로운 구조가 본 논문에서 제안되었다. 전송폭이 계단형인 플라즈마 MMIC에서 60%의 cross 전력분배율에 대하여, 결합길이는 약 42%가 줄어들었다. 또한, 굴절률 변화에 따른 플라즈마 MMIC의 전력분배율과 결합길이는 약 2~6%로 거의 변화가 없었으나, 전송폭을 변화 시켰을 때 전력분배율과 결합길이는 약 30~40%로 큰 변화를 나타내었다.

Abstract A novel architecture to reduce dramatically the coupling length of multimode interference-based couplers (MMICs) is proposed by replacing conventionally designed MMICs by cascaded two-section plasmonic stepped MMICs (PS-MMIC). For the 60% cross power splitting ratio in a stepped-width MMIC, the coupling length of device results in around 42% length reduction. Furthermore, the power splitting ratio and coupling length of plasmonic MMIC just vary around 1~2% along the variation of refractive index. On the contrast, those factors for the variation of MMIC's width strongly vary around 30~40%.

Key Words : Plasmonic Stepped MMI Couplers, Optical Waveguide Devices, Device Miniaturization

1. 서 론

다중모드 간섭 결합기 (multimode interference couplers: MMICs)는 집적광학 회로에서 매우 중요한 소자 중의 하나이다. MMIC는 Mach-Zehnder 간섭기, ring형 공진기, 그리고 소형으로 제작해야 하는 많은 광도파로 소자에서 전력 분배기나 결합기로 널리 사용되어 왔다¹⁻²⁾.

일반적으로, MMIC로 제작된 소자들은 결합길이 (coupling length)를 줄이기 위하여 입/출력 단자들의 간격을 가능한 한 근접하게 설계했으며, MMIC의 결합 영

역에서 발생하는 간섭모드들을 선택적으로 결합시켜 왔다³⁾. 또한, 평판 (straight) 형태의 MMIC 구조를 테이퍼 (tapered)나 나비형 (butterfly) 구조로 제작하여 부가적으로 결합길이를 축소하였다⁴⁾. 그러나, 기존에 제시하여 왔던 방법들로 설계 된 MMIC를 다른 광 소자와 결합하여 하나의 소형 집적소자로 구성하기에는 아직 그 소자 크기가 크며, 더욱 소형화된 MMIC의 설계기법이 요구되고 있다.

이를 위하여 본 논문에서는 유전체 결합 표면 플라즈마 도파로 (dielectric loaded surface plasmon: DLSP) 구

*중신회원, 한성대학교 정보통신공학과
접수일자 2013년 1월 29일, 수정완료 2013년 3월 5일
게재확정일자 2013년 4월 12일

Received: 29 January 2013 / Revised: 5 March 2013 /
Accepted: 12 April 2013

*Corresponding Author: kwangho@hansung.ac.kr
Dept. of ICs Engineering, Hansung University, Korea

조^[5]를 사용하여 MMIC를 설계하고 그 모드특성을 분석하였다. 이 구조는 광 신호를 금속 아래에 집약하여 MMIC 내에서 전파시키기 때문에 모드의 전파거리를 현저하게 줄이는 특성을 갖고 있다.

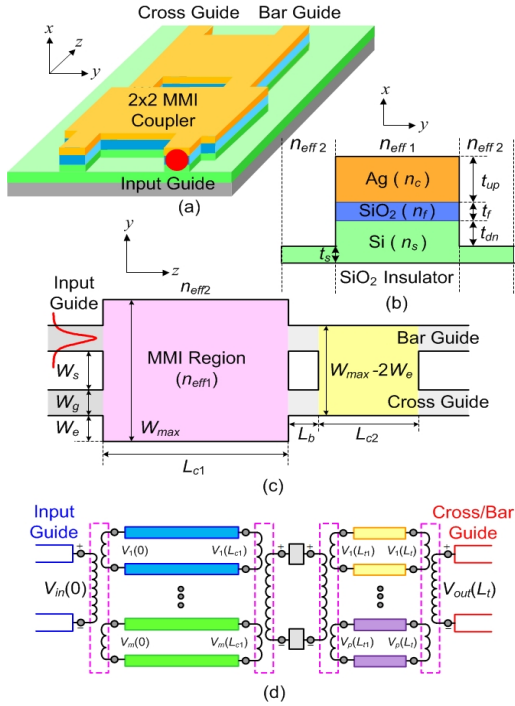


그림 1. 플라즈마 계단형 MMIC에서의 (a) 기하학적 3-D 구조, (b) rib 도파로의 단면도, (c) 전체적인 2-D 평면도, (d) 등가 전송선로망

Fig. 1. (a) 3-D geometric configuration, (b) side view of the rib guide, (c) top view, and (d) equivalent transmission-line network of plasmonic stepped MMIC.

먼저, 2장에 SOI (silicon-on-insulator) wafer에 기초한 소형 플라즈마 MMIC를 제작하기 위한 설계원리를 자세하게 언급하였으며, 그 모드특성을 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 3장에 기술하였다. 또한, 4장에서 플라즈마 계단형 MMIC (plasmonic stepped MMIC: PS-MMIC)의 결합길이나 전력분배율을 분석하였으며, 본 논문에서 제안한 소자를 소형화 할 때 발생하는 제약사항 (limitations)들을 수치 해석적으로 비교 분석하였다.

II. PS-MMIC의 설계원리

SOI에 기초한 플라즈마 계단형 MMIC의 3-D 기하학적 구조를 그림 1(a)에 도시하였다. 그림 1(b)에서 보듯이, 플라즈마 MMIC는 두께 $t_s = 100 \text{ nm}$, $t_{dn} = 200 \text{ nm}$ 굴절률 $n_s = 3.455$ 인 Si, 두께 $t_f = 10 \text{ nm}$ 굴절률 $n_f = 1.445$ 인 SiO₂, 그리고 cover는 두께 $t_{up} = 100 \text{ nm}$ 굴절률 $n_{up} = 0.1453 + 11.3587i$ 인 Ag층으로 구성된 rib형 전송 채널을 갖도록 설계하였다. 또한, 입력 도파로와 cross/bar 도파로들의 폭은 $W_g = 200 \text{ nm}$ 로 설계하였으며, 도파로들 사이의 간격은 $W_s = 400 \text{ nm}$ 로 설정하였다. 그리고, 길이가 L_{cl} 인 MMIC의 전송 폭은 $W_{max} = 1 \mu\text{m}$ 로 선택하였다.

그때 플라즈마 MMIC에 존재하는 모드가 z -축을 따라 전파한다면 이 모드들을 혼성 모드 (hybrid mode)라 정의한다. 본 논문에서는 이 모드들을 각각 TE, TM 모드라 정의하였다. 이들 혼성모드들을 분석하기 위하여 평면상에서 x -축 방향으로 EMD에 기초한 횡방향 공진 조건 (transverse resonance condition)을 적용하면 각 전송 영역들의 유효 굴절률 $n_{eff(1,2)}$ 을 결정할 수 있고, 그림 1(c)와 같은 평면상에 구성된 등가 2-D 구조를 얻을 수 있다.

결국, 등가화된 이 2-D 전송구조에 L-MTLT를 적용하면 그림 1(d)와 같은 등가 전송선로망을 구성할 수 있으며, 마이크로파 분야에서 널리 사용되는 전송선로 해석법을 이용하여 PS-MMIC에서 전파하는 혼성 모드들 간의 전력분배율과 결합길이 (coupling length)를 정확하게 분석할 수 있다.

일반적으로 MMIC와 같이 rib형 전송구조로 형성된 전송소자는 rib형 도파로의 높이와 그 전송폭에 따라 전송 굴절률이 변화하며 이에 의존하여 전송 모드들 사이의 결합길이가 증가하거나 감소한다. 그와 같은 특성을 갖는 MMIC의 결합길이는 다중모드 영역에서 발생하는 모드들의 중첩으로 결정되며 다음과 같이 주어진다^[1].

$$L_{MMI} = \frac{3pL_\pi}{N} \quad (1)$$

여기서, N 은 출력 포트의 개수를 나타내며, L_π 는 기본모드와 1st-order 모드의 전파상수 간격에 의하여 아

래와 같이 정의되는 beat length 이다.

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \cong \frac{4n_s W_e^2}{3\lambda_0} \quad (2)$$

여기서, λ_0 는 자유공간에서의 파장을 나타내고, n_s 와 W_e 는 MMIC 영역의 유효 굴절률과 유효 전송 폭을 나타낸다.

결국, 소형 MMIC를 설계하기 위한 방법은 식 (2)에 주어진 beat length를 가능한 줄이는 것이다. 이는 유효 전송 폭의 크기를 줄이거나, 기본모드와 1st-order 모드의 전파상수 간격을 증가시켜 유효 굴절률을 감소시키는 것이다. 이와 같은 설계원리들을 적용하면 그림 1(a)와 같이 유효 굴절률과 유효 전송 폭이 줄어든 소형 PS-MMIC의 설계가 가능한 것이다.

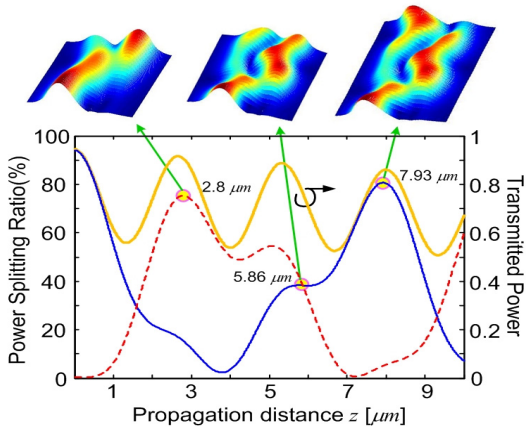


그림 2. 길이가 L_{c1} 인 플라즈마 MMIC 내에서 전파하는 TE 모드의 전송전력과 전력분배율.

Fig. 2. Transmitted power and power splitting ratio of TE mode propagating through plasmonic MMIC with length L_{c1} .

III. PS-MMIC의 모드특성

PS-MMIC의 모드특성을 분석하기 위하여 그림 1(d)에 도시한 등가 전송선로망을 고려하자. 그림에서 보듯이 상향 도파로를 통하여 입사된 광신호와 cross나 bar 도파로를 통하여 전송되는 출력신호는 L-MTLT에 기초하여 모드 전압으로 등가화 시킬 수 있다.

먼저, 필드 정규화 직교조건(field orthogonality condition)과 모드 정합조건(mode matching condition)을 길이 L_{c1} 의 입/출력 단과 MMIC 영역에서 전파하는 모드들에 적용하면, TE 모드에 대한 입/출력 전압 비율인 전압분배율을 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$\eta_{TE,1} = \frac{V_{out}(L_{c1})}{V_{in}(0)} = \sum_{m=1}^R \left[T_{in,m} T_{m,out} e^{ik_{z,m}L_{c1}} \right] \quad (3)$$

여기서, R 은 MMIC 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^[8].

$$T_{in,(m,p)} = \int_{cs} e_{in}(y) e_{(m,p)}^*(y) dy, \\ T_{(m,p),out} = \int_{cs} e_{(m,p)}(y) e_{out}^*(y) dy \quad (4)$$

식 (3)에 의존하여 경계면 $z = L_{c1}$ 에서 출력된 모드 전압은 길이 L_b 의 도파로를 통하여 계단형태로 구성된 다음 단의 2nd MMIC로 입력되며, 그때 길이 L_b 의 도파로 입/출력 단에서의 모드 전압은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$V_{out}(L_{c1}) = V_{in}(L_{t1}) e^{ik_{z,b}L_b} \quad (5)$$

여기서, $L_{t1} = L_{c1} + L_b$ 이고 $k_{z,b}$ 는 그 도파로에서 전파하는 모드의 전파상수를 나타낸다. 그러므로, 식 (5)에 주어진 모드 전압은 길이 L_{c2} 의 2nd MMIC 영역에 입사되며 식 (3)과 같은 개념에 기초하여 다음과 같은 전압분배율을 갖는다.

$$\eta_{TE,2} = \frac{V_{out}(L_t)}{V_{in}(L_{t1})} = \sum_{p=1}^R \left[T_{in,p} T_{p,out} e^{ik_{z,p}L_{c2}} \right] \quad (6)$$

여기서, $L_t = L_{c1} + L_b + L_{c2}$ 이다. 결국, 식 (3), (5), (6)을 결합하면 아래와 같은 입력 전력에 대한 출력 전력

의 비율인 전력분배율 (power splitting ratio: PSR)을 유도할 수 있다.

$$P_{SR} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \text{Re} \left(\frac{k_{z,out}}{k_{z,in}} \right) \left| \eta_{TE,1} \eta_{TE,2} \right|^2 e^{-2\alpha L_b} \quad (7)$$

여기서, $k_{z,in}$ 과 $k_{z,out}$ 은 각각 입/출력 영역에서의 전파상수를 나타내고, α 는 길이 L_b 영역에서 전파하는 모드의 감쇠상수를 나타낸다.

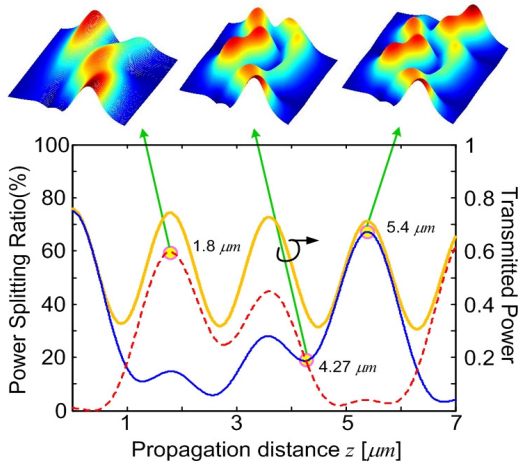


그림 3. 길이가 L_{c2} 인 플라즈마 MMIC 내에서 전파하는 TE 모드의 전송전력과 전력분배율.

Fig. 3. Transmitted power and power splitting ratio of TE mode propagating through plasmonic MMIC with length L_{c2} .

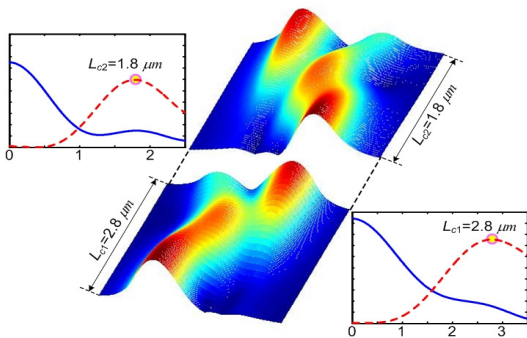


그림 4. PS-MMIC 내에서 전파하는 TE 모드의 필드분포.
Fig. 4. Field distribution of TE mode propagating through PS-MMIC.

IV. 수치해석 및 고찰

먼저, L-MTLT에 기초한 식 (7)을 이용하여 길이가 L_{c1} 인 1st MMIC 영역의 전력분배율을 동작파장 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 수치 해석하였다. 그림 2에서 보듯이 모드가 입력 도파로를 통하여 입사되었을 경우, 입사된 광신호는 결합길이 $z = 2.8 \mu\text{m}$ 를 진행한 후에 cross 도파로를 통하여 약 75.4%의 전력이 출력되었으며, $z = 7.93 \mu\text{m}$ 를 진행한 후에는 약 81%의 전력이 bar 도파로를 통하여 방출되었다. 또한, 전송전력은 10^{-3} 차수의 감쇠상수에 의존하여 전파거리에 따라 지수 함수적으로 감소됨을 보여 주고 있다.

이때, 만일 bar 상태에서 전력을 방출하는 MMIC를 설계하고자 한다면, 2장에서 언급한 소형 MMIC 설계 원리를 적용하여 소자의 소형화가 가능하다. 즉, 그림 1(a)의 구조에서 보듯이, 결합길이 $z = 2.8 \mu\text{m}$ 인 cross 도파로를 먼저 설계하고 소형 MMIC 설계 원리를 적용한 구조 (즉, 전송폭이 축소된 구조)를 설계하여 두 소자를 계단형으로 연결하면 bar 상태에서 전력을 방출하는 매우 소형화된 MMIC를 설계할 수 있다는 것이다.

이를 위하여, 길이가 L_{c2} 이고 전송폭이 $W_{max} - 2W_e$ 인 2nd MMIC 영역의 전력분배율을 수치 해석하였다. 그림 3에서 보듯이 약 75.4%의 전송전력을 가지고 1st MMIC에서 출력된 모드가 $z = L_{c1}$ 에서 2nd MMIC에 입사되었을 경우, 입사된 광신호는 결합길이 $z = 1.8 \mu\text{m}$ 를 진행한 후에 cross 도파로를 통하여 약 60%의 전력이 출력되었다.

종합적으로 소자의 소형화에 대한 모드특성을 명확하게 확인하기 위하여, 그림 4에 전체적인 PS-MMIC 구조에 전파하는 3-D 필드분포를 도시하였다. 그림에서 보듯이, 1st MMIC의 cross 결합길이는 $z = 2.8 \mu\text{m}$ 이며, 전송폭이 $W_{max} - 2W_e$ 로 축소된 2nd MMIC의 전송구조에서는 cross 결합길이가 $z = 1.8 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 그러므로, bar 상태에서 전력을 방출하도록 설계된 PS-MMIC의 총 소자길이는 $z = 4.6 \mu\text{m}$ 로 오직 1st MMIC로만 구성된 전형적인 구조의 결합길이 $z = 7.93 \mu\text{m}$ 보다 소자 크기가 약 42% 감소됨을 보였다. 그러나, 전송전력은 약 80%를 출력하는 $z = 7.93 \mu\text{m}$ 에서 보다 약 25% 감소한 전송출력이 $z = 4.6 \mu\text{m}$ 에서 나타났다. 이와 같은 결과는 계단형인 두 MMIC를 연결하는 길이 L_b 인 도파로에 의한 손실과 그림 1(d)의 등가 전송선로망에서 변환기

(transformer)로 표현된 불연속 경계면들에 기인하여 발생하는 모드특성 때문에 나타나는 현상이다.

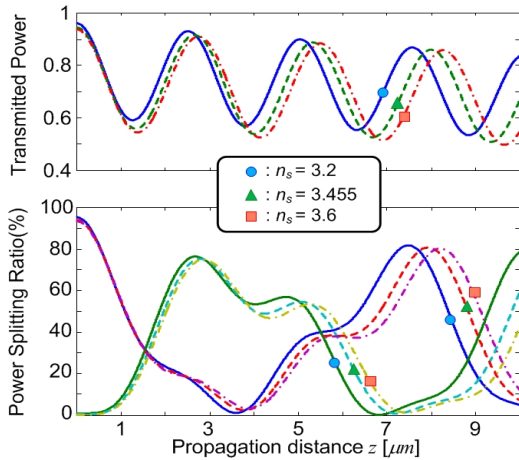


그림 5. Si의 굴절률 변화에 따른 TE 모드의 전송전력과 전력분배율.

Fig. 5. Variation of transmitted power and power splitting ratio of TE mode along the refractive index of Si.

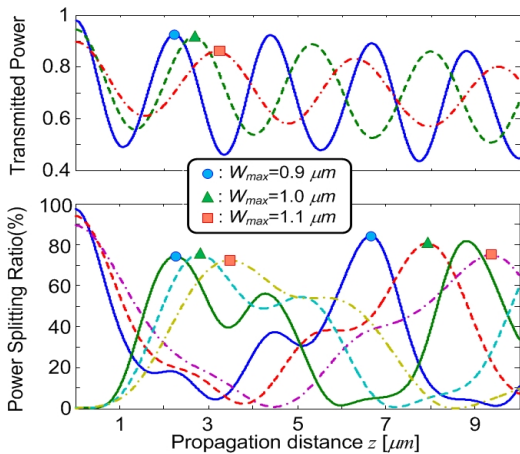


그림 6. 플라즈마 MMIC의 전송폭 변화에 따른 TE 모드의 전송전력과 전력분배율.

Fig. 6. Variation of transmitted power and power splitting ratio of TE mode along the width of plasmonic MMIC.

비록 PS-MMIC 구조에서 전송전력이 약 25% 감소하였지만, 소자의 크기는 약 42%가 감소하였으므로 소자의 출력전력에 민감하지 않은 광통신용 소자를 소형화하고자 할 때 PS-MMIC 구조는 매우 좋은 대안이라고 생각한다.

다음으로, 플라즈마 MMIC에서 굴절률과 전송폭의 변화에 따라 결합길이와 전력분배비율이 어떻게 변화 되는지에 대한 2장의 분석 결과를 수치해석하였다. 그림 5에서 보듯이, 플라즈마 MMIC의 전송폭을 $W_{max} = 1 \mu m$ 로 유지하고 Si의 굴절률 n_s 를 3.2~3.6으로 증가시켰을 때 cross 결합길이는 $2.68 \mu m \sim 2.87 \mu m$ 로 증가하였으며, 전력분배율은 약 76.4%~74.9%로 감소하였다. 또한, 전송전력의 최대값 주기는 $2.52 \mu m \sim 2.77 \mu m$ 로 증가하였다. 수치해석 결과에서 보듯이, 플라즈마 MMIC는 굴절률의 변화에 대한 소자의 모드특성이 거의 변화가 없음을 알 수 있었다.

마지막으로, 플라즈마 MMIC의 Si 굴절률을 $n_s = 3.455$ 로 유지하고 전송폭 W_{max} 를 $0.9 \mu m \sim 1.1 \mu m$ 로 증가시켰을 때 발생하는 모드특성을 분석하였다. 그림 6에서 보듯이, 플라즈마 MMIC의 cross 결합길이는 $2.25 \mu m \sim 3.5 \mu m$ 로 매우 크게 증가하였으며, 전력분배율은 약 72%~75.4%로 변화하였다. 또한, 전송전력의 최대값 주기는 결합길이와 같이 $2.16 \mu m \sim 3.12 \mu m$ 로 크게 증가하였다. 수치해석 결과에서 보듯이, 플라즈마 MMIC는 전송폭의 변화에 대한 모드특성 변화가 매우 크게 나타남을 알 수 있었다. 더욱이, 전력분배율은 본 논문에서 PS-MMIC 설계를 위하여 고려한 $W_{max} = 1 \mu m$ 에서 75.4%로 가장 높게 나타났다.

결론적으로, PS-MMIC 구조를 사용하여 소자를 소형화할 때 굴절률이 서로 다른 MMIC 보다는 전송폭이 서로 다른 MMIC로 구성하는 것이 좋은 모드특성을 갖는 소자 설계가 가능하다는 것을 보였다.

V. 결론

종방향 모드 전송선로 이론 (L-MTLT)과 등가 망 해석법 (EDM)을 결합하여 3-D 구조인 PS-MMIC의 결합 길이를 감소시키기 위한 새로운 이론적 설계기법을 제시하였으며, 수치 해석을 통하여 그 소형화 특성을 분석하였다. 설계된 PS-MMIC는 60%의 전력분배율을 나타냈으며, 약 $4.6 \mu m$ 의 길이로 제작이 가능함을 보였다.

더욱이, 플라즈마 MMIC의 굴절률과 전송폭을 변화시켰을 때 발생하는 모드특성을 분석한 결과, 굴절률이 약 11% 변화하였을 때 결합길이는 약 6% 변화하였으며, 전력분배율은 약 2%로 거의 변화가 없었다. 반면에, 전송폭

을 약 18% 변화시켰을 때 전력분배율은 약 4.5%로 변화가 작았으나 결합길이는 약 36%로 매우 크게 변화였다. 결국, 본 논문에서 제안한 PS-MMIC로 소자를 설계할 경우 기존의 소형화 방법에 부가하여 결합길이를 현저하게 축소시킬 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, No. 4, pp. 615 - 627, 1995.

[2] Jong-Moo Lee, Joon Tae Ahn, Doo Hee Cho, Jung Jin Ju, Myung-Hyun Lee, and Kyong Hon Kim, "Vertical Coupling of Polymeric Double-Layered Waveguides Using a Stepped MMI Coupler," ETRI Journal, Vol. 25, No. 2, pp. 81 - 88, 2003.

[3] D. Levy, Y. Li, R. Scarmozzino, and R. Osgood, Jr., "A new design for ultracompact multimode interference-based couplers," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 10, No. 1, pp. 96 - 98, 1998.

[4] L. Spiekman, Y. Oei, E. Metaal, F. Groen, I. Moerman, and M. Smit, "Extremely small multimode interference couplers and ultrashort bends on InP by deep etching," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 6, No. 8, pp. 1008 - 1010, 1994.

[5] R. Zia, J. A. Schuller, A. Chandran, M. L. Brongersma, "Plasmonics: the next chip-scale technology," Mater. Today, Vol. 9, pp. 20-27, 2006.

[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, No. 9, 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, No. 2, pp. 270~274, 2005.

[8] K. C. Ho, "Implementation of Plasmonic Optical Polarizer using Rib-type Coupler," The J. of IWIT, Vol. 12, No. 3, pp. 217~222, 2012.

[9] J. O. Park and W. K. Jang, "Optical metrology for resonant surface acoustic wave in RF device," J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 11, pp. 3435-3440, 2010.

[10] J. Lim, J. Koo, J. Lee, S. M. Han, and D. Ahn, "An Efficient Design and Parameteric Study on the Transmission Lines with Substrate Integrated Artificial Dielectric," The J. of Korean Institute of Information Technology, Vol. 8, pp. 53-59, 2010.

저자 소개

호 광 춘(중신회원)

- 제 10권 1호 참조
- 현 한성대학교 정보통신공학과 교수

<주관심분야 : Optical Communications, Optical Electromagnetics, Design and Analysis of Photonic Devices, Design and Analysis of RF (microwave) Devices>

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구장려금 지원과제입니다.