

http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.5.143

JIIBC 2013-5-17

# DFB 구조형 플라즈마 다중모드 간섭 결합기를 사용한 편향기의 구현

## Implementation of Polarization Beam-Splitter based on DFB-Assisted Plasmonic Multimode Interference Coupler

호광춘\*

Kwang-Chun Ho

**요약** 2개의 플라즈마 다중모드 간섭 결합기 (P-MMIC)와 DFB 전송구조를 결합하여 하나의 새로운 초소형 광 편향기를 구현하였다.  $2 \times 1$ 과  $1 \times 2$  P-MMIC를 연결하는 내부 DFB 구조로부터 반사되거나 투과되는 TE, TM 모드들의 편향된 전력들을 P-MMIC를 통하여 출력되도록 설계하였다. 수치해석 결과 설계된 DFB 구조형 플라즈마 다중모드 간섭 결합기의 크기는 약  $75 \mu\text{m}$ 로 매우 작았으며, 낮은 삽입손실과 높은 분리비율을 보였다. 더욱이, DFB 전송구조의 대역폭은 약  $20 \text{ nm}$ 로 광대역 특성을 나타내었다.

**Abstract** A novel ultracompact polarization beam-splitter (PBS) combining two plasmonic multimode interference couplers (P-MMICs) and DFB guiding structure is implemented. The  $2 \times 1$  and  $1 \times 2$  P-MMICs are designed to collect the polarized powers of TE and TM modes reflected by or transmitted through an internal DFB structure. The simulation results show that the designed DFB-assisted PBS is very short (about  $75 \mu\text{m}$ ), and has a low insertion loss, a high extinction ratio, and a broad bandwidth of  $20 \text{ nm}$ .

**Key Words** : Plasmonic MMI Couplers, Polarization Beam-Splitter, DFB Guide

### 1. 서론

동시에 입사된 TE, TM 모드를 원하는 형태로 분리하는 편향기 (polarization beam-splitter: PBS)는 모든 광 집적회로에서 매우 중요한 기본소자이다. 평판 광집적회로에서 이와 같은 특성을 갖는 PBS는 지금까지 비대칭 Y-junction 구조<sup>[1]</sup>나 Mach-Zehnder 간섭기<sup>[2]</sup>에 기초하여 제작되어 왔다. 이와 같은 PBS의 제작은 광퇴색과정 (photobleaching process)이나 폴링 (poling)과 같은 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 물론, 방향성 결합기 (directional

couplers)<sup>[3,4]</sup>나 다중모드 간섭 결합기 (multimode interference couplers: MMICs)<sup>[5]</sup>와 같은 간소화된 구조를 사용하여 PBS를 제작하기도 하였다. 그러나, 일반적으로 이런 종류의 PBS는 그 편향길이가 TE, TM 모드 결합길이의 정수배에 해당하므로 소자의 크기가 매우 큰 단점이 있다.

최근, Shi와 그의 동료들<sup>[6]</sup>은 포토닉 크리스탈 (photonic crystal) 구조와 MMIC를 결합한 광 편향기를 소개하였으나 이 소자 또한 제작하기가 매우 복잡하고 어려운 단점이 있다. 그러므로, 이와 같은 단점들을 보완

\*종신회원, 한성대학교 정보통신공학과  
접수일자 2013년 4월 8일, 수정완료 2013년 9월 25일  
게재확정일자 2013년 10월 11일

Received: 8 April, 2013 / Revised: 25 September, 2013 /  
Accepted: 11 October, 2013

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

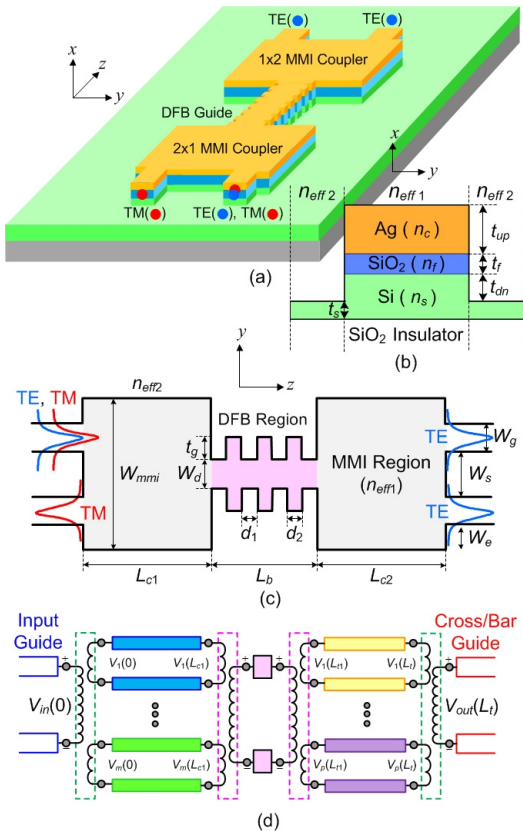


그림 1. DFB 구조형 플라즈마 MMIC를 사용한 광 편향기의 (a) 기하학적 3-D 구조, (b) 릿형 도파로의 단면도, (c) 전체적인 2-D 평면도, (d) 등가 전송선로망.

Fig. 1. (a) 3-D geometric configuration, (b) side view of the rib-type guide, (c) top view, and (d) equivalent transmission-line network of polarization beam-splitter based on DFB-assisted plasmonic MMIC.

하고 전형적인 기본 개념으로 쉽게 분석하고 설계할 수 있는 새로운 DFB 구조형 (DFB-assisted) 플라즈마 다중 모드 간섭 결합기 (P-MMIC)를 본 논문에서 제안하였다.  $2 \times 1$ 와  $1 \times 2$  P-MMIC의 중간에 DFB 구조를 연결하여 TE 모드는 투과되고 TM 모드는 반사되도록 설계하였다. 이와 같이 내부 DFB 구조를 사용함으로써 P-MMIC의 편향길이가 TE, TM 모드 결합길이의 정수 배가 되도록 설계할 필요가 없으므로 초소형의 PBS 설계가 가능한 것이다.

또한, 본 논문에서는 유전체 결합 표면 플라즈마 도파로 (dielectric loaded surface plasmon: DLSP) 구조<sup>[7]</sup>를

사용하여 DFB 구조형 P-MMIC를 설계하였다. 이 구조는 광 신호를 금속 아래에 집약하여 P-MMIC 내에서 전파시키기 때문에 모드의 전파거리를 현저하게 줄이는 특성을 갖고 있다.

본 논문은, 2장에 SOI (silicon-on-insulator) 와이퍼에 기초한 초소형 P-MMIC를 제작하기 위한 설계원리를 자세하게 언급하였으며, 그 모드특성을 수치 해석적으로 입증하기 위한 유효 유전체 방법 (Effective Dielectric Method: EDM)<sup>[8]</sup>을 기반으로 하는 종방향 모드 전송선로 해석법 (longitudinal modal transmission-line theory: L-MTLT)<sup>[9]</sup>을 3장에 기술하였다. 또한, 4장에서는 DFB 구조의 TE, TM 모드의 필터특성을 언급하였으며, 마지막으로 5장에서 DFB 구조형 P-MMIC에 기초한 PBS의 설계특성을 수치 해석적으로 분석하였다.

## II. P-MMIC의 설계원리

$2 \times 1$ ,  $1 \times 2$  P-MMIC와 DFB 구조에 기초한 PBS의 3-D 기하학적 구조를 그림 1(a)에 도시하였다. 그림 1(b)에서 보듯이, P-MMIC는 두께  $t_s = 200 \text{ nm}$ ,  $t_{dn} = 200 \text{ nm}$ , 굴절률  $n_s = 3.455$ 인 Si, 두께  $t_f = 10 \text{ nm}$ , 굴절률  $n_f = 1.445$ 인  $\text{SiO}_2$ , 그리고, 두께  $t_{up} = 100 \text{ nm}$ , 굴절률  $n_{up} = 0.1453 + 11.3587i$ 인 Ag 층으로 구성된 릿 (rib)형 전송 채널을 갖도록 설계하였다. 또한, 입력 도파로와 cross/bar 도파로들의 폭은  $W_g = 200 \text{ nm}$ 로 설계하였으며, 도파로들 사이의 간격은  $W_e = 100 \text{ nm}$ ,  $W_s = 1700 \text{ nm}$ 로 설정하였다. 결국, P-MMIC의 전송 폭은  $W_{max} = 2.3 \mu\text{m}$ 로 선택하였다. 더욱이, 동시에 입사된 TE, TM 모드들을 분리하는 DFB 전송구조의 전송 폭은  $W_d = 300 \text{ nm}$ , 격자두께는  $t_g = 100 \text{ nm}$ , 격자주기는  $\Lambda = d_1 + d_2 = 700 \text{ nm}$ , 격자 중형비 (aspect ratio)는  $A_R = d_1/d_2 = 0.5$ , 전송길이는  $L_b = 35 \mu\text{m}$ 로 설계하였다.

릿형 P-MMIC에 존재하는 모드가  $z$ -축을 따라 전파한다면 이 모드들을 혼성 모드 (hybrid mode)라 부르며, 본 논문에서는 이 모드들을 각각 TE, TM 모드라 정의하였다. 이들 혼성모드들을 분석하기 위하여 평면상에서  $x$ -축 방향으로 EMD에 기초한 횡 방향 공진 조건 (transverse resonance condition)을 적용하면 각 전송 영

역들의 유효 굴절률  $n_{eff(1,2)}$ 을 결정할 수 있고, 그림 1(c)와 같은 평면상에 구성된 등가 2D 구조를 얻을 수 있다. 결국, 등가화된 이 2D 전송구조에 L-MTLT를 적용하면 그림 1(d)와 같은 등가 전송선로망을 구성할 수 있으며, 마이크로파 분야에서 널리 사용되는 전송선로 해석법을 이용하여 PBS에서 전파하는 TE, TM 모드들의 편향특성을 정확하게 분석할 수 있다.

일반적으로 P-MMIC와 같이 립형 전송구조로 형성된 전송소자는 립형 도파로의 높이와 그 전송폭에 따라 전송 굴절률이 변화하며 이에 의존하여 전송 모드들 사이의 결합길이가 증가하거나 감소한다. 그와 같은 특성을 갖는 P-MMIC의 결합길이는 다중모드 영역에서 발생하는 모드들의 중첩으로 결정되며 다음과 같다 [10].

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

여기서,  $N$ 은 출력 포트의 개수를 나타내며,  $L_{\pi}$ 는 기본모드와 1st-order 모드의 전파상수 ( $\beta_0, \beta_1$ ) 차이에 의하여 아래와 같이 정의되는 비트길이 (beat length) 이다.

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

여기서,  $\lambda_0$ 는 자유공간에서의 파장을 나타내고,  $n_s$ 와  $W_e$ 는 P-MMIC 영역의 유효 굴절률과 유효 전송 폭을 나타낸다. 결국, 초소형 P-MMIC를 설계하기 위한 방법은 식 (2)에 주어진 비트길이를 가능한 줄이는 것이다. 이는 유효 전송 폭의 크기를 줄이거나, 기본모드와 1st-order 모드의 전파상수 간격을 증가시켜 유효 굴절률을 감소시키는 것이다. 본 논문에서는 플라즈마 도파로 구조를 설계에 적용하여 (즉, 유효 굴절률을 줄여) 초소형 P-MMIC 설계가 가능하게 구현하였다.

### III. P-MMIC의 등가전송망

P-MMIC의 모드특성을 분석하기 위하여 그림 1(d)에 도시한 등가 전송선로망을 고려하자. 그림에서 보듯이 상향 도파로를 통하여 입사된 TE, TM 모드가 crossbar 도파로를 통하여 출력되는 편향특성을 L-MTLT에 기초하여 등가화 시킬 수 있다.

먼저, 필드 정규화 직교조건 (field orthogonality condition)과 모드 정합조건 (mode matching condition)

을 길이  $L_{cl}$ 의 입/출력 단과 P-MMIC 영역에서 전파하는 모드들에 적용하면, TE, TM 모드에 대한 입/출력 전압, 전류 비율인 전압, 전류분배율을 각각 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$\eta_{(TE,TM),1} = \sum_{m=1}^R [T_{in,m} T_{m,out} e^{ik_{z,m}L_{cl}}] \quad (3)$$

여기서,  $R$ 은 P-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 [11].

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

여기서,  $\xi(y)$ 는 TE, TM 전송모드이며 TE 모드의 경우 전개성분 ( $\xi(y) = e(y)$ )을 TM 모드인 경우 자계성분 ( $\xi(y) = h(y)$ )을 나타낸다.

식 (3)에 의존하여 경계면  $z = L_{cl}$ 에서 출력된 TE, TM 모드들은 길이  $L_b$ 의 DFB 도파로에 입사된다. 그때, TE 모드는 설계된 DFB 구조를 투과하여 다음 단의 2<sup>nd</sup> P-MMIC로 입력되며, TM 모드는 그 경계면에서 반사되어 입력단의 하향 도파로를 통하여 방출된다.

그러므로, 길이  $L_b$ 의 DFB 도파로 입/출력 단에서 TE 모드는 다음과 같은 관계를 갖는다.

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

여기서,  $L_{t1} = L_{cl} + L_b$  이고  $k_{z,b}$ 는 DFB 도파로에서 전파하는 모드의 등가 전파상수를 나타낸다. 이에 대한 설명은 4장에서 자세하게 언급할 것이다. 그러므로, 식 (5)에 주어진 모드 전압은 길이  $L_{t2}$ 의 2<sup>nd</sup> P-MMIC 영역에 입사되며 식 (3)과 같은 개념에 기초하여 다음과 같은 전압분배율을 갖는다.

$$\eta_{TE,2} = \frac{V_{out}(L_t)}{V_{in}(L_{t1})} = \sum_{p=1}^R [T_{in,p} T_{p,out} e^{ik_{z,p}L_{t2}}] \quad (6)$$

여기서,  $L_t = L_{cl} + L_b + L_{c2}$  이다.

반면에, TM 모드는 1<sup>st</sup> P-MMIC와 DFB 구조의 경계면에서 반사되어 길이  $L_{cl}$ 의 1<sup>st</sup> P-MMIC 통하여 다시 전송되며 다음과 같은 전류 분배율을 갖는다.

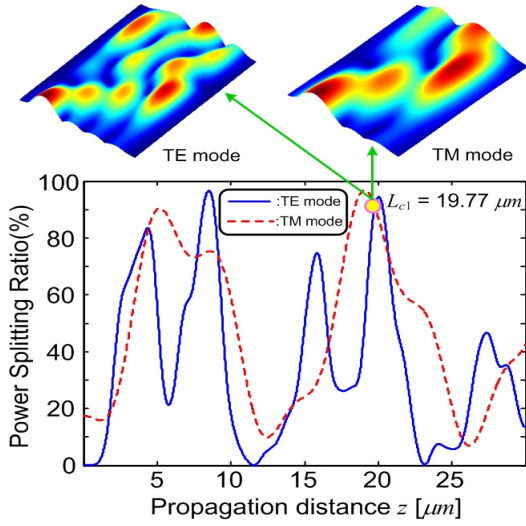


그림 2.  $2 \times 1$  P-MMIC 결합기에서 전파거리에 따른 TE, TM 모드들의 전력분배 비율.  
Fig. 2. Power splitting ratio of TE and TM modes along with propagation distance at  $2 \times 1$  P-MMIC.

$$\eta_{TM,2} = \frac{I_{out}(0)}{I_{re}(L_{c1})} = \sum_{p=1}^R [T_{in,p} T_{p,out} e^{-ik_{z,p}L_{c1}}] \quad (7)$$

위의 식에서  $z = L_{c1}$ 에서  $-z$  방향으로 반사되는 모드 전류  $I_{re}(L_{c1})$ 은 그 경계면에서 출력되는 모드 전류  $I_{out}(L_{c1})$ 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$I_{re}(L_{c1}) = \Gamma_L I_{out}(L_{c1}) \quad (8)$$

여기서,  $\Gamma_L$ 은 그림 1(d)의 등가전송선로에서  $z = L_{c1}$ 로부터 오른쪽으로 들여다 본 반사계수이다. 이 반사계수는 4장에서 언급될 DFB 구조의 등가전송선로로부터 결정할 수 있다.

결국, 식 (3), (5), (6), (7)을 결합하면 아래와 같은 TE, TM 모드에 대한 입력 전력에 대한 출력 전력의 비율인 전력분배율 (power splitting ratio: PSR)을 유도할 수 있다.

(TE mode)

$$P_{SR} = \text{Re} \left( \frac{k_{z0}}{k_{z1}} \right) \left| \eta_{TE,1} \eta_{TE,2} \right|^2 e^{-2(\alpha_b L_b + \alpha_m L_m)},$$

(TM mode)

$$P_{SR} = \text{Re} \left( \frac{k_{z0}}{k_{z1}} \right) \left| \Gamma_L \eta_{TM,1} \eta_{TM,2} \right|^2 e^{-4\alpha_m L_{c1}} \quad (9)$$

여기서,  $k_{z1}$ 과  $k_{z0}$ 은 각각 입/출력 영역에서의 전파상수

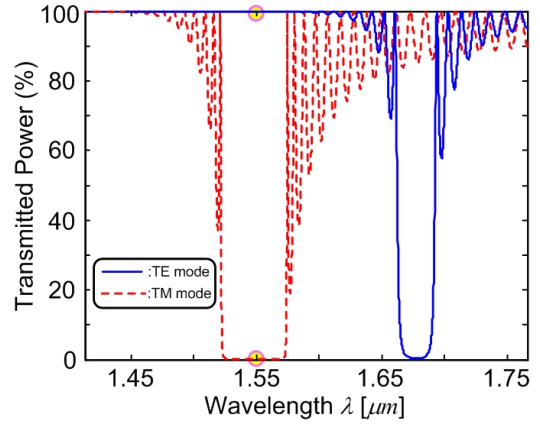


그림 3. DFB 격자구조에서 파장에 따른 TE, TM 모드들의 투과전력.  
Fig. 3. Transmitted power of TE and TM modes along with wavelength at DFB guiding structure.

를 나타내고,  $\alpha_b, \alpha_m$ 은 각각 DFB, P-MMIC 영역에서 전파하는 모드의 감쇠상수를 나타낸다.

## IV. DFB 구조의 등가전송망

DFB 구조의 TE, TM 모드에 대한 필터특성을 분석하기 위하여 그림 1(d)에 도시한 등가 전송선로망을 고려하자. 그림에서 보듯이, DFB 구조의 길이  $L_b$ 는 주기  $\Lambda = d_1 + d_2$ 에 격자의 개수  $N$ 을 곱하여 구성하였으며, 필름의 두께는  $W_d = 300 \text{ nm}$ 로, 격자구조의 두께는  $t_g = 100 \text{ nm}$ 와 같이 선정하였다. 그때, 참고문헌 [11]로부터 정의된 등가 전파상수는 아래와 같다.

$$\frac{k_{z,b}\Lambda}{\pi} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} [\theta(\lambda)] \quad (10)$$

여기서, DFB 전송구조의 분산특성을 나타내는 변수인  $\theta(\lambda)$ 는

$$\theta(\lambda) = \cos(\kappa_1 d_1) \cos(\kappa_2 d_2) - \frac{1}{2} \left( \frac{n_1^2 + n_2^2}{n_1 n_2} \right) \sin(\kappa_1 d_1) \sin(\kappa_2 d_2) \quad (11)$$

로 주어진다. 또한, DFB 영역의 단위 셀에 대한 등가 특성 임피던스는

$$Z_b = \sqrt{Z_{ob}Z_{sb}} \quad (12)$$

와 같이 정의되며,  $Z_{ob}$ 와  $Z_{sb}$ 는 각각 개방선로와 단락선로에 대한 입력 임피던스를 나타낸다. 결국, 식 (10)과 (12)로 구성된 그림 1(d)의 등가 전송선로 망을 이용하여  $z = L_{cl}$ 에서 오른쪽으로 들여다본 DFB 구조의 투과전력 ( $1 - |\Gamma_L|^2$ )을 쉽고 정확하게 분석할 수 있다.

### V. 수치해석 및 고찰

먼저, L-MTLT에 기초한 식 (3)을 이용하여 길이가  $L_{cl}$ 인 1<sup>st</sup> P-MMIC 영역에서의 TE, TM 모드들에 대한 전력분배율을 동작파장  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 수치 해석하였다. 그림 2에서 보듯이, TE, TM 모드가 동시에 입력 도파로를 통하여 입사되었을 경우 입사된 TE, TM 모드들은 결합길이  $L_{cl} = 19.77 \mu\text{m}$ 를 진행한 후에 DFB 구조와 연결된 중앙 (center) 도파로를 통하여 약 90%의 전력이 출력됨을 보였다. 그러므로, 중앙 도파로를 통하여 DFB 구조에 입사된 TE, TM 모드들은 결국 DFB 구조의 필터특성에 기인하여 TE 모드는 투과되고 TM 모드는  $z = L_{cl}$ 에서 반사되는 전송특성을 나타낸다.

다음으로, 이와 같은 전송특성을 명확하게 확인하기 위하여 식 (8)에 정의된 반사계수  $\Gamma_L$ 에 의존하는 투과전력 ( $1 - |\Gamma_L|^2$ )을  $z = L_{cl}$ 의 경계면에서 수치해석 하였다. 그림 3에서 보듯이, TM 모드의 투과전력은 동작파장  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 거의 0%에 가깝게 나타났으며, 그와 동시에 TE 모드는 그 같은 파장에서 거의 99%의 전력이 DFB 구조를 통하여 2<sup>nd</sup> P-MMIC로 전송됨을 보여 주었다. 더욱이, TM 모드에 대한 DFB 전송구조의 대역폭 (bandwidth)은 약 20 nm 로 광대역 특성을 나타내었다.

마지막으로,  $z = L_{cl}$ 의 경계면에서 투과되고 반사된 TE, TM 모드들의 전송전력들이 본 논문에서 처음으로 제안한 DFB 구조형 P-MMIC를 사용한 PBS에서 어떻게 분배되는지에 대하여 수치해석 하였다. 그림 4에서 보듯이, 상향 도파로를 통하여 동시에 입사된 TE, TM 모드들의 입사전력은 TE 모드의 경우 1<sup>st</sup> P-MMIC를 전파한 후에 중앙 도파로를 통하여 다음 단계 연결된 2<sup>nd</sup> P-MMIC에 입사되어 결합길이  $19.77 \mu\text{m}$ 를 전파한 후에 상/하향 도파로를 통하여 약 50%의 전력이 균등하게 분배되어 출력되었다. 반면에, TM 모드의 입사전력은

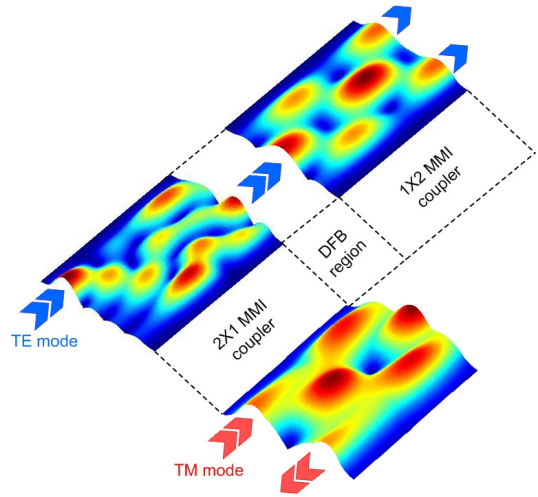


그림 4. DFB 구조형 플라즈마 다중모드 간섭 결합기에서 전파하는 TE, TM 모드들의 3D 전력분배율 ( $P_{SR}$ ).

Fig. 4. 3D power splitting ratio ( $P_{SR}$ ) of TE and TM modes propagating at DFB-assisted plasmonic MMI coupler.

$z = L_{cl}$ 의 경계면에서 반사되어 1<sup>st</sup> P-MMIC의 하향 도파로를 통하여  $z = 0$ 에서 출력되었다. 그때, 그림에서 보듯이 TM 모드의 전파전력은 1<sup>st</sup> P-MMIC 내에서 입사전력과 반사전력이 서로 결합된 중첩 형태로 나타났다.

### V. 결론

3D 구조인 2개의 플라즈마 다중모드 간섭 결합기 (P-MMIC)와 DFB 전송구조를 결합한 새로운 초소형 PBS의 설계기법을 제시하였으며, 종방향 모드 전송선로 이론 (L-MTLT)과 등가 망 해석법 (EDM)을 사용하여 그 전송특성을 수치 해석하였다. 설계된 편향기는  $2 \times 1$  P-MMIC 영역에서 결합길이  $19.77 \mu\text{m}$ 을 진행한 후에 동시에 입사된 TE, TM 모드들의 약 90%에 해당하는 전력을 중앙 도파로를 통하여 방출하였다.

또한, 1<sup>st</sup> P-MMIC의 중앙 도파로와 연결된 DFB 구조의 필터특성으로부터 TE 모드는 약 99%가 투과 되었으며, TM 모드는 거의 모든 전력이 반사되었으며 대역폭은 약 20 nm 로 광대역 특성을 나타냈다. 결국, 본 논문에서 처음 제안한 DFB 구조형 P-MMIC에 기초한 PBS는 기존에 제안한 구조들에 비하여 제작 및 소형화에 좋

은 대안이 될 수 있음을 보였다.

## References

- [1] M. H. Hu, Z. Huang, R. Scarmozzino, M. Levy, and R. M. Osgood, "Tunable Mach-Zehnder polarization splitter using height-tapered Y-branches," *IEEE Photon. Technol. Letters*, Vol. 9, No. 6, pp. 773-775, Jun. 1997.
- [2] L. B. Soldano, A. H. de Vreede, M. K. Smit, B. H. Verbeek, E. G. Metaal, and F. H. Groen, "Mach-Zehnder interferometer polarization splitter in InGaAsP-InP," *IEEE Photon. Technol. Letters*, Vol. 6, No. 3, pp. 402-405, Mar. 1994.
- [3] I. Kiyat, A. Aydinli, and N. Dagli, "A compact silicon-on-insulator polarization splitter," *IEEE Photon. Technol. Letters*, Vol. 17, No. 3, pp. 100-102, Mar. 2005.
- [4] A. Miliou, R. Srivastava, and R. V. Ramaswamy, "A 1.3-mm directional coupler polarization splitter by ion exchange," *J. Lightw. Technol.*, Vol. 11, No. 2, pp. 220-225, Feb. 1993.
- [5] J. M. Hong, H. H. Ryu, S. R. Park, J. W. Jeong, S. G. Lee, E.-H. Lee, S.-G. Park, D. Woo, S. Kim, and B.-H. O, "Design and fabrication of a significantly shortened multimode interference coupler for polarization splitter application," *IEEE Photon. Technol. Letters*, Vol. 15, No. 1, pp. 72-75, Jan. 2003.
- [6] Y. Shi, D. Dai, and S. He, "Proposal for an Ultracompact Polarization-Beam Splitter Based on a Photonic-Crystal-Assisted Multimode Interference Coupler," *IEEE Photon. Technol. Letters*, Vol. 19, No. 11, pp. 825-827, Jun. 2007.
- [7] R. Zia, J. A. Schuller, A. Chandran, M. L. Brongersma, "Plasmonics: the next chip-scale technology," *Mater. Today*, Vol. 9, pp. 20-27, 2006.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] K. C. Ho, "Implementation of Distributed Feedback Filters using Cascaded Gratings with Different Period," *The J. of IWIT*, Vol. 13, No. 1, pp. 77-82, 2013.
- [12] 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.
- [13] 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, Optical Biosensors and Bioelectronics>

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.