

<http://dx.doi.org/10.7236/JIWIT.2012.12.5.55>

JIWIT 2012-5-7

실리콘 도파로에 기초한 플리즈마 격자 구조형 방향성 결합기의 설계 및 분석

Design and Analysis of Plasmonic Grating-Assisted Directional Coupler based on Silicon Waveguide

호광춘*

Kwang-Chun Ho

요약 종방향 모드 전송선로 이론을 이용하여 실리콘 도파로에 기초한 플라즈마 격자 구조형 방향성 결합기의 최대 전력전송 특성을 정확하게 분석하였다. 정확한 해석적 수식과 기, 우 모드 사이의 간섭특성에 의존하는 결합효율을 정의하여 전파 거리에 따른 TE 모드의 전력변화를 수치해석 하였다. 수치해석 결과, 최대 전력전송은 P-GADC에서 전파하는 중첩모드들의 삽입손실이 서로 같은 격자주기 $\Lambda_{eq} = 10.26 \mu m$ 에서 발생하였다. 즉, GADC의 전형적인 최대 전력전송 조건인 위상정합 조건이나 최소간격 조건과 다른 결과를 나타내었다.

Abstract Longitudinal transmission-line modal theory is applied to analyze maximum power transfer in plasmonic grating-assisted directional couplers (P-GADC) based on silicon waveguide. By defining a coupling efficiency amenable to rigorous analytical solutions and interference between even and odd modes, the power exchange of TE modes as a function of propagation distance is evaluated. The numerical result reveals that maximum power transfer occurs at a grating period $\Lambda_{eq} = 10.26 \mu m$, in which the insertion loss of supermodes is equal to each other. That is, it is generally different from conventional phase-matching condition or minimum gap condition of GADC.

Key Words : Plasmonic GADC, Coupling efficiency, Supermodes

1. 서론

SOI(silicon-on-insulator) 도파로에 기초한 광 집적소자들은 저렴한 가격과 높은 집적성 때문에 큰 규모의 포토닉 집적소자, 고속 마이크로프로세서의 광 클럭, 소형 파장 분할 다중화 (WDM) 레이저 소스와 같은 광통신용

소자들에 널리 사용된다^[1]. 또한, 플라즈마 특성의 금속 층을 SOI 도파로와 결합하면 초소형의 포토닉 집적소자들을 구현할 수 있고, 낮은 방사 손실 (radiation loss)을 갖는 초강도의 전자기파 모드들을 전송할 수 있다^[2].

본 논문에서는 이와 같은 SOI 도파로와 금속 층의 장점들을 결합한 새로운 플리즈마 격자 구조형 방향성 결

*충신회원, 한성대학교 정보통신공학과
접수일자 2012년 8월 20일, 수정완료 2012년 9월 25일
게재확정일자 2012년 10월 12일

Received: 20 August, 2012 / Revised: 25 September, 2012 /

Accepted: 12 October, 2012

*Corresponding Author: kwangho@hansung.ac.kr

Dept. of Information and Communications Engineering, Hansung University, Korea

합기 (P-GADC)를 구현하였다. 즉, SOI 기반에 금속 층인 Ag를 코팅한 새로운 구조의 P-GADC를 제시 하였다. 그림 1(a)에서 보듯이, 우선 두 개의 동기화된 평면 도파로로 구성하였다. 구성된 각 도파로는 오직 하나의 모드만을 전파하고, 서로 결합되지 않도록 설계하였다. 그때 두 도파로에서 전파하는 모드들을 강하게 결합시키기 위하여 도파로 사이에 격자 구조 (grating)를 설치하였다. 이와 같이 두 개의 평면 도파로와 격자로 구성된 소자를 GADC라 한다. 이 결합기구조는 입-출력 결합기, 광 파장 필터, 파장 분할 소자 [3]처럼 많은 광 응용에 중요한 소자이다.

지금 까지 결합 모드이론 (Coupled mode theory: CMT) 이 GADC를 분석하기 위하여 널리 사용되어 왔다 [4]. 또한, CMT와 함께 전달 행렬 해석법 (Transfer matrix method: TMM)이 GADC의 전력결합과 분산특성을 분석하기 위하여 모드 정합기술 (Mode-matching technique)에 기초하여 사용하여 왔다 [5].

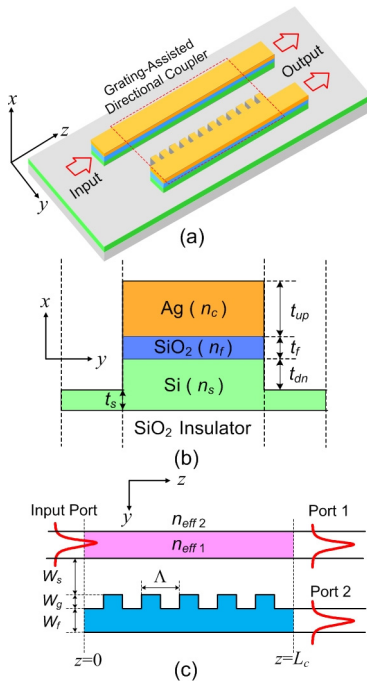


그림 1. (a) P-GADC의 3차원 기하학적 구조. (b) 릿-형 도파로의 단면도. (c) P-GADC의 전체적인 평면도.

Fig 1. (a) 3D geometric configuration of P-GADC. (b) Side view of the rib-type waveguide. (c) Top view of P-GADC.

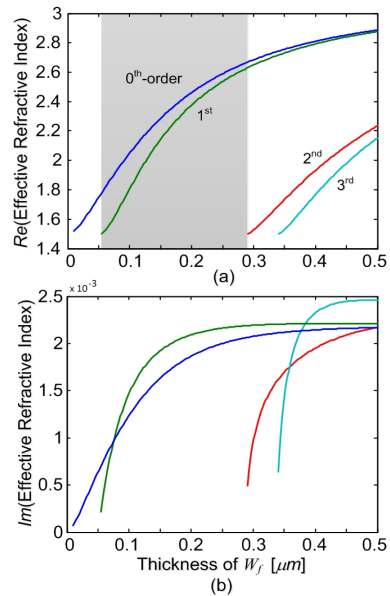


그림 2. 전송 층의 두께에 따른 유효굴절률의 변화: (a) 실수 값, (b) 허수 값.

Fig 2. Variation of effective refractive index of modes along with thickness of guiding layer: (a) real value, (b) imaginary value.

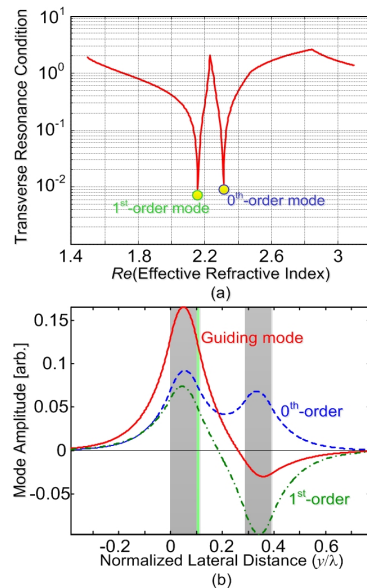


그림 3. P-GADC에서 발생한 (a) 2개의 중첩모드와 (b) 그에 대응하는 필드분포.

Fig 3. (a) Two supermodes, and (b) the corresponding field distribution excited in P-GADC.

그러나, CMT나 TMM은 소자 내에서 전송되는 모드들이 서로 직교특성을 만족한다는 가정 하에 적용된 분석 방법이다. 그러므로, 이들 해석법들은 주기적인 섭동 (perturbation)이 약하거나 결합되는 도파로들의 전파특성이 유사할 때 정확한 수치해석 결과를 제공한다. 반면에, CMT나 TMM은 격자 섭동이 강하거나 금속 층과 같이 삽입손실 (Insertion loss)이 큰 물질로 구성된 P-GADC를 수치 해석하기에는 정확성이 다소 떨어질 수 있다. 특히, 본 논문에서 제시한 P-GADC와 같이 누설 (leaky) 특성이 강한 소자의 분석은 매우 어렵다.

이를 위하여 본 논문에서는 종방향 모드 전송선로 이론 (Longitudinal modal transmission-line theory; L-MTLT)^[6]을 사용하여 제안한 P-GADC의 광학적 전파특성들을 정확하고 쉽게 분석하였다. 먼저, 2장에 L-MTLT에 기초한 P-GADC에서 전파하는 중첩모드 (supermodes)들의 필드 분포와 분산특성을 분석하였고, 모드들의 결합특성을 해석하기 위한 결합효율 (Coupling efficiency)을 유도하였다. 다음으로, 3장에 격자 주기에 따른 최적의 결합효율을 결정하기 위한 수치해석과 그 결과를 제시하였다.

II. 플라즈마 GADC의 결합효율

3D P-GADC와 같이 금속 층과 격자 구조를 갖는 립-rib형 전송구조로 형성된 방향성 결합기는 립-형 도파로의 높이와 전송 도파로의 폭에 따라 전송 굴절률이 변화하며 이에 의존하여 전송 모드들 사이의 결합효율이 증가하거나 감소한다. 이러한 변수들에 의존하는 P-GADC가 그림 1에 자세히 도시되어 있다.

그림 1(b)에 도시된 P-GADC의 립-형 구조는 두께 $t_s = 100\text{ nm}$, $t_{dn} = 200\text{ nm}$, 굴절률 $n_s = 3.455$ 인 Si, 두께 $t_f = 20\text{ nm}$, 굴절률 $n_f = 1.445$ 인 SiO₂, 두께 $t_{up} = 40\text{ nm}$, 굴절률 $n_{up} = 0.1453 + 11.3587i$ 인 은 (Ag)으로 구성된 도파로 형태의 구조로 설계하였다. 은의 굴절률은 Drude 모델^[7]을 사용하여 계산하였으며, 실질적인 실험 데이터인 $\omega_p = 1.37 \times 10^{16}\text{ rad/s}$ 의 플라즈마 주파수를 적용하여 산출하였다. 그때, P-GADC에 존재하는 모드는 본질적으로 전파 방향에 따라 준(quasi)-TE 모드와 준-TM 모드로 분류되며, 만일 고려되어지는 전파방향이 z -축이라면 우리는 이 모드들을

각각 TE_{nm}^z 형, TM_{nm}^z 형 혼성 모드 (hybrid mode)라 정의한다.

먼저, 그림 1(c)의 평면도에 도시되어 있는 결합 영역에서 전파하는 모드들의 유효굴절률을 동작파장 $\lambda = 1.55\ \mu\text{m}$ 에서 수치해석 하였다. 이때, 격자구조는 고려하지 않았으며 평면 도파로 사이의 간격은 $W_s + W_g = 300\text{ nm}$ 로 선택하였다. 그림 2에서 보듯이, 전송 도파로의 폭 W_f 가 증가함에 따라 모드들의 전파특성을 결정하는 유효굴절률의 실수 값과 전파 거리를 결정하는 손실특성인 유효굴절률의 허수 값이 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 전송 폭이 52 nm 이상에서 첫 번째 고차 (Higher-order) 플라즈마 모드가 발생하기 시작하였으며, 전송 폭이 280 nm 이상일 때부터 3개 이상의 고차 플라즈마 모드가 발생하기 시작하였다. 결국, 전파거리와 높은 굴절률 차를 이용한 필드 제한 (Field confinement)등을 종합적으로 고려하여 오직 2개의 모드가 전파 가능한 $W_f = 150\text{ nm}$ 를 전송 도파로의 폭으로 선택하였다.

다음으로, 제안한 P-GADC의 최적 결합조건을 분석하기 위하여 설계된 소자에서 전파하는 모드들의 분산특성 (Dispersion curves)을 고려하였다. 주기적인 격자를 포함하고 있는 P-GADC에서 분산특성을 나타내는 전파상수 k_{zn} 는 주기적인 격자로 인하여 발생하는 공간 고조파 (Space harmonics)들로 구성되며, 다음과 같은 복소수 형태로 표현된다.

$$k_{zn} = (\beta + i\alpha) + \frac{2n\pi}{\Lambda} \quad (1)$$

여기서, n 은 n 번째 공간 고조파를 나타내며, Λ 는 격자주기를 나타낸다. 그때, 이 식을 구성하는 0번째 공간 고조파의 전파상수 $\beta + i\alpha$ 를 결정하기 위하여 아래와 같은 L-MTLT의 횡방향 공진조건 (Transverse resonance condition)^[6]을 적용하여 P-GADC에서 전파하는 정확한 모드들의 전파상수와 그 감쇄상수를 결정할 수 있다.

$$\left[\mathbf{Y}_{up}(k_{zn}) + \mathbf{Y}_{dn}(k_{zn}) \right] = 0 \quad (2)$$

여기서, \mathbf{Y}_{up} 과 \mathbf{Y}_{dn} 은 그림 1(c)를 등가화된 전송선로의 임의의 위치에서 위와 아래로 들여다본 입력 어드미턴스 (Admittance) 행렬을 의미한다.

결국, 식 (2)의 횡방향 공진조건으로부터 미지수인 고유치 k_{zn} 을 구할 수 있으며, 이 값을 이용하여 P-GADC 내에서 전파하는 정확한 모드들의 그 분산특성뿐만 아니라 P-GADC에서 전파하는 전계나 자계의 분포특성을 평가할 수 있다. 이에 대한 수치해석 결과가 그림 3에 잘 나타나 있다. 그림 3(a)에서 보듯이, 설계된 P-GADC에서 식 (2)를 만족하는 중첩모드는 2개가 발생하였으며 발생한 중첩모드들에 대한 전개분포가 그림 3(b)에 자세하게 도시되어 있다.

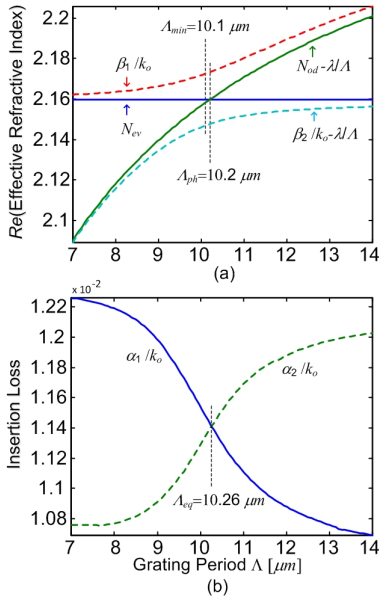


그림 4. P-GADC의 모드 특성: 격자 주기에 따른 (a) 누설파 (점선)와 표면파 (실선)에 대한 분산 곡선과 (b) 삽입 손실.

Fig 4. Modal characteristics of P-GADC: (a) dispersion curves for rigorous leaky-wave (dashed-lines) and surface-wave (solid-lines) modes, and (b) insertion loss as a function of grating period.

다음으로, 결정된 고유치인 k_{zn} 을 구성하는 전파상수 β 와 감쇠상수 α 를 사용하여 P-GADC에서 상호 결합하는 정확한 중첩모드들의 분산특성을 그림 4에 분석하였다. 그림 4(a)의 실선에서 보듯이, 격자 층이 평균 굴절률을 갖는 균일 층으로 대체된 경우 P-GADC의 결합영역에서는 두 개의 표면파 (Surface waves) 모드가 발생하며, 이 모드들은 위상정합 조건 (Phase-matching condition: PMC)

을 나타내는 임의의 한 점에서 서로 일치하는 특성을 나타낸다. 본 논문에서 제안한 구조에서 위상정합 조건은 격자주기 $A_{ph} = 10.2 \mu\text{m}$ 에서 발생하였다. 이 조건은 광소자 특성해석에서 널리 사용되고 있는 CMT에서 광 방향성 결합기의 최적 전력전송을 위한 조건으로 지금까지 널리 사용되어 왔다.

그러나, 주기적인 격자 층으로 구성된 P-GADC의 경우, 근사적인 두 개의 표면파 모드들은 전파상수 β_1, β_2 의 정확한 누설파 (Leaky waves)모드들로 변환된다. 그림 4(a)의 점선에서 보듯이, 두 모드들은 격자주기 $A_{min} = 10.1 \mu\text{m}$ 에서 모드들 사이의 간격이 최소가 되었으며 (즉, 가장 유사한 전파특성을 나타냈으며) 이 최소간격 조건 (Minimum gap condition: MGC)에서 또한 최적 전력전송이 가능하다. 다음으로 최적 전력전송이 가능한 조건은 전파하는 누설파 중첩모드들의 삽입손실이 서로 같은 조건이다. 그림 4(b)에서 보듯이, 설계된 P-GADC는 격자주기 $A_{eq} = 10.26 \mu\text{m}$ 에서 두 누설파 모드들의 삽입손실이 일치하였다.

결국, 위에서 제시한 3가지 조건에서 발생하는 P-GADC의 전력전송 특성을 분석하기 위하여 L-MTLT에 기초한 결합효율을 유도하였다. 먼저, 입/출력단에서 발생하는 횡방향 전계성분은 아래와 같은 모드 함수들로 표현할 수 있다.

$$E_r(y, z) = V_r(z)e_r(y). \quad (3)$$

이 표면파 형태의 모드들이 P-GADC 결합영역에 입사된 경우, 격자구조에 기인한 무한한 수의 공간 고조파 (Space harmonics)들이 여기되고, 그 전계성분은 다음과 같이 L-MTLT 식으로 표현할 수 있다.

$$E_c(y, z) \cong V_1 e^{ik_1 z} \sum_n e_{jn}^{(1)}(y) e^{i\Lambda_n z} + V_2 e^{ik_2 z} \sum_n e_{jn}^{(2)}(y) e^{i\Lambda_n z}. \quad (4)$$

이때, 입력 경계면에 입사된 표면파 모드와 여기된 누설파 모드들 사이에 경계조건 (모드들의 연속조건)을 적용하면

$$V_m(0)e_m(y) \cong V_1(0) \sum_n e_{jn}^{(1)}(y) + V_2(0) \sum_n e_{jn}^{(2)}(y), \quad (5)$$

와 같고, 양변에 $\sum k_{zm(1,2)} e_{jm}^{(1,2)}(y)$ 을 곱하고 전송구조의 단면적에 대하여 적분하면 누설과 모드들의 직교조건으로부터

$$V_1(0) = A_1 V_{in}(0), \quad V_2(0) = A_2 V_{in}(0), \quad (6)$$

을 얻을 수 있다. 여기서, 입력 변압계수 (Transformer Coefficient) $A_{(1,2)}$ 는

$$A_{(1,2)} = \frac{1}{C_{(1,2)}} \int_{cs} \left\{ e_m(y) \sum_m k_{zm(1,2)} e_{jm}^{(1,2)}(y) \right\} dS \quad (7)$$

와 같고, 다층 주기적인 전송구조에서 정규화 상수 $C_{(1,2)}$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\int_{cs} \left\{ \sum_m k_{zm,c} e_{jm}^{(c)}(y) \sum_n e_{jn}^{(v)}(y) \right\} dS = C_v \delta_{cv} \quad (8)$$

입력 단에서와 같이 P-GADC 내에서 전파한 누설과 모드들은 출력 경계면에서 연속조건을 만족하며

$$V_{out}(L_c) e_{out}(y) \cong V_1 e^{ik_1 L_c} \sum_n e_{jn}^{(1)}(y) e^{i(2n\pi/\Lambda)L_c} + V_2 e^{ik_2 L_c} \sum_n e_{jn}^{(2)}(y) e^{i(2n\pi/\Lambda)L_c}, \quad (9)$$

와 같이 정의할 수 있고, 이 식에 전파하는 모드들의 전력 정규화 조건을 적용하면 아래와 같은 출력 모드 전압을 얻을 수 있다.

$$V_{out}(L_c) = (A_1 B_1 e^{ik_1 L_c} + A_2 B_2 e^{ik_2 L_c}) \equiv T_f V_{in}(0), \quad (10)$$

여기서, 출력 변압계수 $B_{(1,2)}$ 는

$$B_{(1,2)} = \int_{cs} \left\{ e_{out}^*(y) \sum_n e_{jn}^{(1,2)}(y) e^{i(2n\pi/\Lambda)L_c} \right\} dS \quad (11)$$

와 같다. 결국, TE 모드에 대한 결합효율 (Coupling efficiency)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta_{TE} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\text{Re}(k_{z,out})}{\text{Re}(k_{z,in})} |T_f|^2. \quad (12)$$

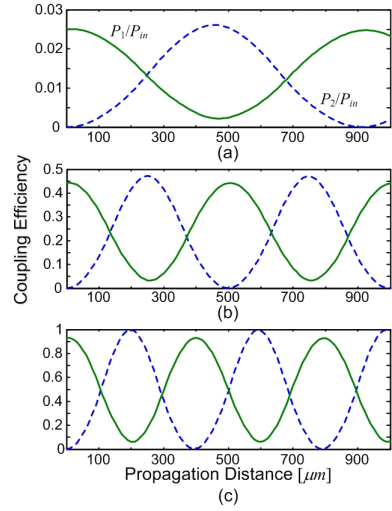


그림 5. P-GADC에서 전파하는 중첩모드들의 결합 효율. (a) Λ_{min} 의 경우, (b) Λ_{ph} 의 경우, (c) Λ_{eq} 의 경우.

Fig 5. Coupling efficiency of supermodes propagating through P-GADC at (a) Λ_{min} , (b) Λ_{ph} , and (c) Λ_{eq} .

III. 수치해석 및 고찰

본 논문에서 제안한 P-GADC의 결합특성에 대한 타당성과 정확성을 보이기 위하여 식 (12)에 정의한 결합효율을 분석하였다.

먼저, 그림 (4)에서 언급한 최소간격 조건 Λ_{min} 과 위상정합 조건 Λ_{ph} 에서 발생하는 결합효율을 평가하였다. 그림 5(a)와 (b)에서 보듯이, 최소간격 조건에서 입사된 광 신호는 결합길이 (Coupling length) $L_c = 480 \mu\text{m}$ 에서 평균 2.5%의 미약한 신호가 하향 도파로 (Port 2)로 전송되었고, 위상정합 조건에서 광 신호는 결합길이 $L_c = 250 \mu\text{m}$ 에서 평균 47%의 신호가 전송되었다.

다음으로, 전파하는 누설과 중첩모드들의 삽입손실이 서로 같은 조건 Λ_{eq} 에서 발생하는 결합효율을 평가하였다. 그림 5(c)에서 보듯이, 입사된 광 신호는 결합길이 $L_c = 200 \mu\text{m}$ 에서 평균 99%의 모든 신호가 하향 도파로를 통하여 전송되었다.

결국, 이와 같은 수치 해석적 사실로부터 다음과 같은 결론을 이끌 수 있다. 본 논문에서 제안한 P-GADC는 금속 층으로 구성된 플라즈마 특성에 기인하여 유전체로

구성된 GADC에서 최적 전력전송 조건으로 사용되는 MGC이나 PMC이 아닌 삽입손실이 서로 같은 조건에서 발생하였다.

IV. 결론

실리콘 도파로에 기초한 3D 플라즈마 격자 구조형 방향성 결합기 (P-GADC)를 제안하였다. 제안한 P-GADC의 전파특성과 최대 결합효율을 갖는 최적 전력전송 특성을 정확하게 분석하기 위하여 횡방향 모드 전송선로 이론 (L-MTLT)을 이용하였다.

분석결과, P-GADC에서 최적 전력전송은 표면파 모드들의 PMC 또는 정확한 누설과 모드들의 MGC가 아닌 전파하는 누설과 중첩모드들의 삽입손실이 서로 같은 조건에서 발생함을 보였다.

결국, 금속 층으로 구성된 GADC의 전파 및 결합특성은 금속의 삽입손실에 의해 좌우되며, 삽입손실이 서로 같은 모드들은 가장 좋은 결합효율과 가장 짧은 결합길이를 갖는 것으로 확인되었다.

참고 문헌

[1] D. Duchesne, P. Cheben, R. Morandotti, B. Lamontagne, D. X. Xu, S. Janz, and D. Christodoulides, "Group-index birefringence and loss measurements in silicon-on-insulator photonic wire waveguides," *Opt. Eng.* 46, 104602, 2007.

[2] G. R. Bhatt, R. Sharma, U. Karthik, and B.K. Das, "Dispersion-Free SOI Interleaver for DWDM Applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 30, pp. 140-146, 2012.

[3] J. M. Senior and S. D. Cusworth, "Devices for wavelength multiplexing and demultiplexing," *Inst. Elec. Eng. Proc.*, vol. 136, Pt. J, no. 3, pp. 183-202, 1989.

[4] D. Marcuse, "Directional couplers made of nonidentical asymmetrical slabs. Part II: Grating-assisted couplers," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-5, pp. 268-273, 1987.

[5] W. P. Huang and J. Hong, "A transfer matrix approach based on local normal modes for coupled waveguides with periodic perturbations," *J. Lightwave Technol.*, vol. 10, pp. 1367-1375, Oct. 1992.

[6] 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.

[7] C. Oubre, and P. Nordlander, "Optical properties of metallo-dielectric nanostructures calculated using the finite difference time domain method," *J. Phys. Chem.*, Vol. 108, pp. 17740-17747, 2004.

[8] 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.

[9] 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.