

<http://dx.doi.org/10.7236/JIWIT.2012.12.3.217>

JIWIT 2012-3-28

## Rib-형 결합기를 이용한 플라즈마 광 편파기의 구현

### Implementation of Plasmonic Optical Polarizer using Rib-type Coupler

호광춘\*

Kwang-Chun Ho

**요약** 모드 전송선로 이론을 이용하여 플라즈마 광 편파기의 편파특성을 정확하게 분석하였다. 제안한 해석법의 타당성 및 정확성을 분석하기 위하여 새로운 편파조건인 모드 억압비율(mode suppression ratio)을 정의하였다. 수치해석 결과, 플라즈마 광 편파기는 유전체로 구성된 전형적인 광 편파기에 비하여 편파거리가 현저하게 짧은  $10\ \mu\text{m}$ 로 나타났다. 또한, 플라즈마 광 편파기를 구성하는 금속 성분인 Ag에 기인한 삽입손실은  $-1\ \text{dB}$  이하로 무시할 정도로 작았다.

**Abstract** Using modal transmission-line theory (MTLT), it explores rigorously the polarization characteristics of plasmonic optical polarizer. To verify the validity of the approach proposed in this paper, a novel polarization condition, which is called mode suppression ratio, is defined. The numerical results reveal that the polarization length of plasmonic optical polarizer is  $10\ \mu\text{m}$  dramatically shorter than that of conventional dielectric optical polarizer. Furthermore, the insertion loss of plasmonic polarizer consisting of metal Ag is small enough to be neglected below  $-1\ \text{dB}$ .

**Key Words** : Plasmonic Optical Polarizer, Equivalent Network, Mode Suppression Ratio

## 1. 서론

SOI (silicon-on-insulator) 기반으로 제작된 집적광학 소자는 높은 편향성을 나타내는 광소자이다<sup>[1, 2]</sup>. 그러므로, TE 모드나 TM 모드 편향기로써 동작하는 광소자를 설계할 때 널리 사용한다. 일반적으로 단일 모드 광통신 시스템에서 방대한 양의 자료를 초고속으로 전송하는 광통신 시스템에서 굵어진 전송선로에 의하여 상당한 양의 편향 왜곡 (cross-talk)이 발생한다. 이와 같은 왜곡을 줄이고 편향성을 향상시키기 위하여 서로 직교특성을 나타

내는 TE-TM 모드를 동시에 입사하고, 출력 단에서 서로 다른 도파로를 통하여 분리하는 편파기의 집적이 필수적이다.

유전체 도파로 구조에 집적된 금속 클래딩 (cladding)은 금속 층의 두께와 길이에 의존하여 전파하는 광신호를 감쇠시킨다<sup>[3]</sup>. 그러나, 최근 금속과 유전체의 경계면에서 전파하는 광신호의 우수한 집적성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 바이오 센싱(bio-sensing)이나 편향 변환 (polarization conversion)을 위한 집적소자 제작에 사용하기 위하여 연구하고 있다<sup>[4, 5]</sup>.

\*종신회원, 한성대학교 정보통신공학과  
접수일자 2012년 4월 3일, 수정완료 2012년 5월 5일  
게재확정일자 2012년 6월 8일

Received: 3 April, 2012 / Revised: 5 May, 2012 /

Accepted: 8 June, 2012

\*Corresponding Author: kwangho@hansung.ac.kr

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

본 논문에서는 금속으로 코팅된 rib-형 전송구조가 SOI 기반의 집적 광소자에서 어떻게 편파특성을 향상시킬 수 있는지를 분석하였다. 이를 위하여 모든 특성의 전송구조에서 플라즈마 광 편파기의 편파특성을 정확하고 쉽게 분석할 수 있는 모드 전송선로 이론 (modal transmission-line technique; MTLT)을 제안하였다. 또한, 최적의 TE-TM 모드 편파거리 (polarization length)를 결정하기 위하여 결합효율에 기초한 새로운 편파조건 (polarization condition)인 모드억압 비율 (mode-suppression ratio)을 정의하여 플라즈마 광 편파기의 특성을 분석하였다.

## II. 플라즈마 광 편파기의 편파조건

플라즈마 광 편파기와 같이 SOI에 기초한 rib-형 광 전송구조로 형성된 편파기는 립 형 도파로의 높이와 그 전송 폭에 따라 전송 굴절률이 변화하며 이에 의존하여 전송 모드들 사이의 결합효율이 증가하거나 감소하여 다양한 형태의 편파특성을 나타낸다. 이러한 변수들에 의존하는 3차원 플라즈마 광 편파기가 그림 1(a)에 자세하게 도시되어 있다. 그때 그림 1(b)에서 보듯이, 플라즈마 rib-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  $\text{SiO}_2$ , 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<sup>[6]</sup>을 사용하여 계산하였으며, 실질적인 실험 데이터인  $e_m(y), h_m(y)$   $\omega_p = 1.37 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ 의 플라즈마 주파수를 적용하여 산출하였다.

또한, 입, 출력 도파로 (bar, cross guide)들의 폭은  $W_g = 200 \text{ nm}$ 로 설계하였으며, 플라즈마 광 편파기의 도파로들 사이의 간격은  $W_s = 400 \text{ nm}$ 로 선택하였다. 그때 플라즈마 광 편파기에 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, 플라즈마 광 편파기의 편파 특성을 정확하게 해석하기 위하여 그림 1(c)에 주어진 평면도에 도시되어 있는 편파 영역에서 전파하는 TE, TM 모드들의 복소 유효굴절률을  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 의 동작파장에서 수치해석 하였다. 그림 2에서 보듯이, 플라즈마 광 편파기의 금속 클래딩 (cladding)의 두께  $t_{up}$ 가 증가함에 따라 플라즈마 모드들의 전파특성을 결정하는 유효굴절률의 실수 값과 전파 거리를 결정하는 손실특성인 유효굴절률의 허수 값이 지속적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

더욱이,  $\text{SiO}_2$ 의 두께  $t_f$ 가  $20 \text{ nm}$ 일 때 전파하는 TE, TM 모드들의 유효굴절률 값은 거의 비슷하게 나타났다. 결국, 본 논문에서는 더욱 소형화된 플라즈마 광 편파기를 구현하기 위하여 TE, TM 모드들의 굴절률 차가 거의 없는  $t_f = 20 \text{ nm}$ 로 선택하였으며, 그림 2(b)에서 보듯이 전파에 따른 삽입손실이 일정한 값으로 수렴하는  $t_{up} = 40 \text{ nm}$ 에서 금속 Ag의 두께를 결정하였다.

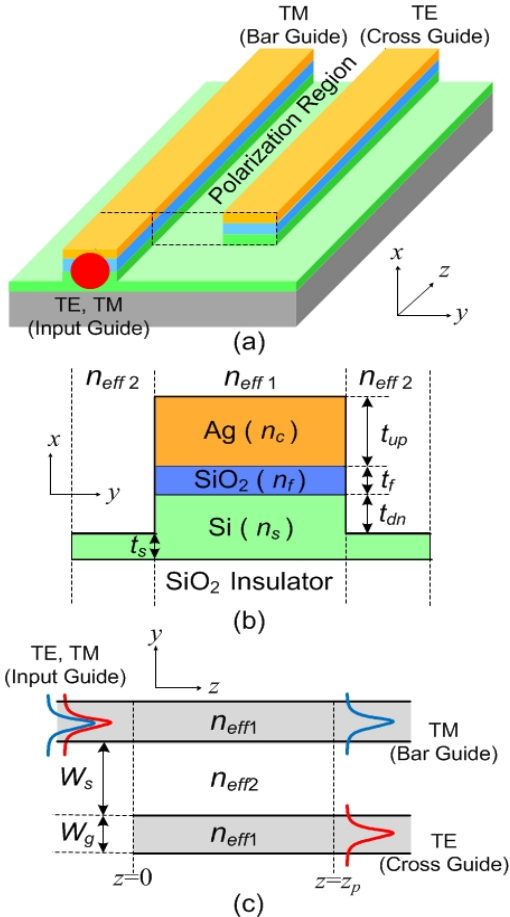


그림 1. (a) 플라즈마 광 편파기의 3차원 기하학적 구조. (b) 립 도파로의 단면도. (c) 광 편파기의 전체적인 평면도.

Fig. 1. (a) 3-D geometric configuration of plasmonic optical polarizer. (b) Side view of the rib guide. (c) Top view of optical polarizer.

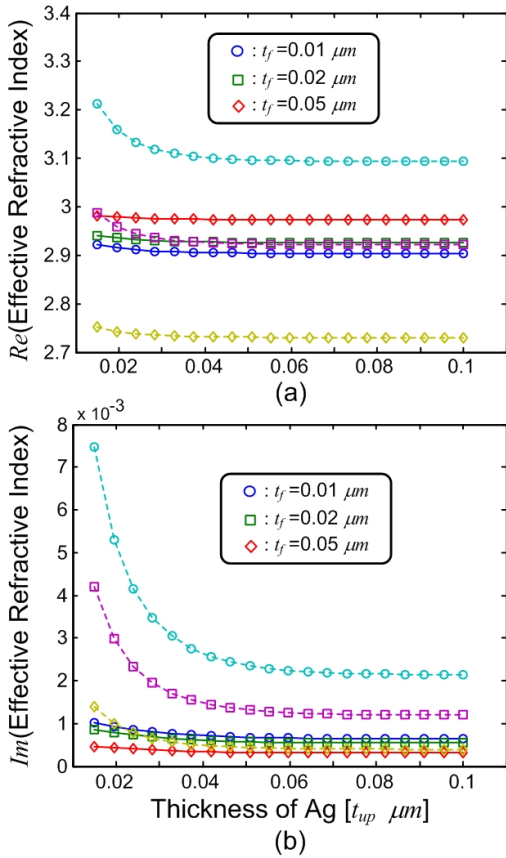


그림 2. 광 편파기의 Ag 두께에 따른 TE, TM 모드들의 유효굴절률: (a) 실수 값, (b) 허수 값. 여기서, 실선은 TE 모드, 점선은 TM 모드를 나타낸다.

Fig. 2. Effective refractive index of modes along with thickness of Ag: (a) real value, (b) imaginary value. Here the solid line and dashed line represent TE and TM mode, respectively.

그때 MILT의 원리를 적용하여 각 입, 출력 단에서의 TE-TM 모드에 대한 등가 관계식을 표현하면 아래와 같다<sup>[7]</sup>.

$$\begin{aligned} E_r(y, z) &= V(z)e(y) \text{ (TE modes)} \\ H_r(y, z) &= I(z)h(y) \text{ (TM modes)} \end{aligned} \quad (1)$$

또한, 플라즈마 광 편파기 내에서 전파하는 전계는 2개의 전파모드들이 아래와 같이 선형적으로 결합하여 표현된다.

$$\begin{aligned} E_c(y, z) &= \sum_{m=1}^2 V_m(z)e_m(y) \text{ (TE modes)} \\ H_c(y, z) &= \sum_{m=1}^2 I_m(z)h_m(y) \text{ (TM modes)} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $r$ 은 입/출력 영역에서 각각  $in$  또는  $out$ 을 나타내며,  $V_m(z), I_m(z)$ 는  $m$ -번째 모드의 모드 전압, 그리고  $e_m(y), h_m(y)$ 는  $m$ -번째 모드의 횡방향 필드분포를 각각 나타낸다.

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

$$\begin{aligned} V_{in}(0)e_{in}(y) &= \sum_{m=1}^2 V_m(0)e_m(y) \text{ (TE modes)} \\ I_{in}(0)h_{in}(y) &= \sum_{m=1}^2 I_m(0)h_m(y) \text{ (TM modes)} \end{aligned} \quad (3)$$

또한, 결합기의 입력 단에서 여기된 전송 모드는 길이  $z=z_p$  만큼 진행한 후 출력 단에서 아래의 경계조건을 만족하며 출력된다.

$$\begin{aligned} &\text{(TE modes)} \\ V_{out}(z_p)e_{out}(y) &= \sum_{m=1}^2 V_m(z_p)e_m(y) \\ &\text{(TM modes)} \\ I_{out}(z_p)h_{out}(y) &= \sum_{m=1}^2 I_m(z_p)h_m(y) \end{aligned} \quad (4)$$

이때 위의 식 (3)과 (4)에  $TE_{nm}^z, TM_{nm}^z$  모드의 직교조건을 적용하고 풀면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{(TE modes)} \\ V_m(0) &= T_{in,m} V_{in}(0), \\ V_{out}(z_p) &= \sum_{m=1}^2 T_{m,out} V_{in}(0) e^{ik_z m z_p} \\ &\text{(TM modes)} \\ I_m(0) &= Q_{in,m} I_{in}(0), \\ I_{out}(z_p) &= \sum_{m=1}^2 Q_{m,out} I_{in}(0) e^{ik_z m z_p} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $T, Q$ 는 입, 출력 단에서 발생하는 입, 출력 변화기 (transformer)의 변환상수 (transformation coefficient)이다. 그러므로, 식 (5)를 정리하면 입력전력에 대한 출력전력의 비율을 나타내는 TE, TM 모드들의 결합효율 (coupling efficiency)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

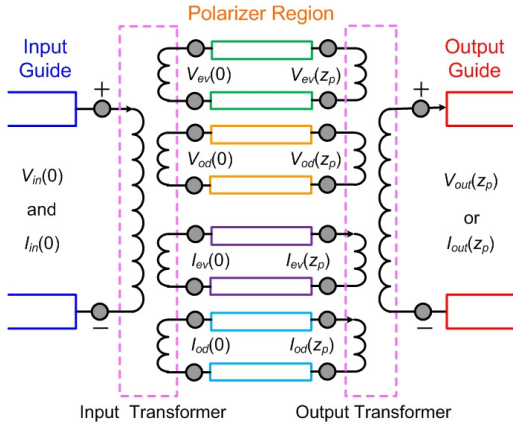


그림 3. 플라즈마 광 편파기의 결합효율을 유도하기 위하여 구성된 등가 전송선로.

Fig. 3. Equivalent network connected to define the coupling coefficient of plasmonic optical polarizer.

(TE modes)

$$\eta_{TE} = \text{Re} \left( \frac{k_{z,out}}{k_{z,in}} \right) \left| \sum_{m=1}^2 \left\{ T_{in,m} T_{m,out} e^{ik_{z,m}z_p} \right\} \right|^2$$

(TM modes)

$$\eta_{TM} = \text{Re} \left( \frac{k_{z,out}}{k_{z,in}} \right) \left| \sum_{m=1}^2 \left\{ Q_{in,m} Q_{m,out} e^{ik_{z,m}z_p} \right\} \right|^2 \quad (6)$$

식 (6)를 유도하기 위하여 구성된 MTLT의 등가 전송선로가 그림 3에 자세하게 묘사되어 있다.

결국, 그림 1에서 보듯이 임의의 편파거리를 진행한 후 상향 또는 하향 전송채널을 통하여 분리되는 TE-TM 모드들의 편파특성을 분석하고, 최적의 편파거리 (polarization length)를 결정하기 위하여 다음과 같은 새로운 편파조건인 모드 억압비율 (mode suppression ratio)을 정의할 수 있다.

$$M_{SR} = \begin{cases} \frac{\eta_{TE}}{\eta_{TM}} \text{ (TM mode suppression)} \\ \frac{\eta_{TM}}{\eta_{TE}} \text{ (TE mode suppression)} \end{cases} \quad (7)$$

위의 식에서 보듯이, 만일 하나의 출력 채널에서 TM 모드가 억압되면 (즉, TM 모드의 결합효율  $\eta_{TM}$ 이 최소가 되면) TM 모드 억압비율  $M_{SR}$ 는 최대가 되면, 그 출력 채널을 통하여 TE 모드가 편파되어 출력된다. 그와 동시에 다른 하나의 출력 채널에서는 TE 모드의 결합효율

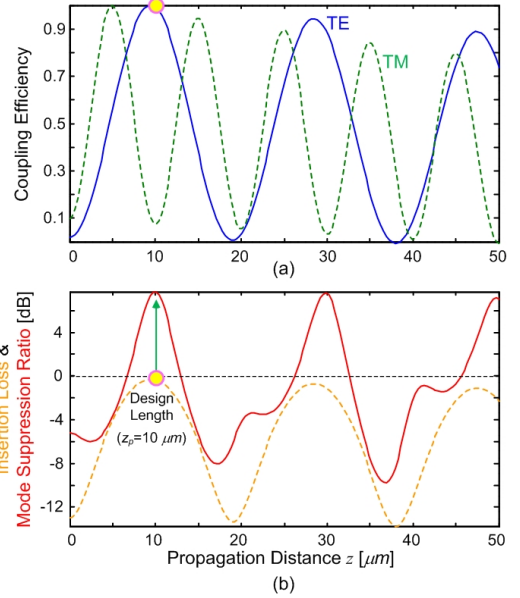


그림 4. 전파 거리에 따른 (a) TE, TM 모드의 결합효율, (b) 삽입손실(점선)과 TM 모드 억압비율(실선).

Fig. 4. (a) Coupling efficiencies of TE, TM modes, (b) insertion loss and mode suppression ratio for TM mode as a function of distance.

$\eta_{TE}$ 이 최소가 되어 (즉, TE 모드 억압비율  $M_{SR}$ 가 최대가 되어) 그 채널을 통하여 TM 모드가 방사된다.

### III. 수치해석 및 고찰

본 논문에서 제안한 플라즈마 광 편파기의 편파특성의 타당성과 정확성을 보이기 위하여 식 (6)과 (7)에 정의한 결합효율과 모드 억압비율을 분석하였다.

그림 4(b)에서 보듯이 상향 입력 도파로를 통하여 동시에 입사된 TE-TM 모드는 편파거리  $z_p = 10 \mu\text{m}$ 에서 TM 모드 억압비율  $M_{SR}$ 이 약 8 dB 이상으로 최대가 되었으며, 그 삽입손실  $I_{loss} = 10 \log(\eta_{TE})$ 은 -0.5 dB로 무시할 정도로 작았다. 그러므로, 그림 4(a)에서 보듯이 편파거리  $z_p = 10 \mu\text{m}$ 에서 TE 모드는 cross 도파로 (실선으로 표시)를 통하여 TM 모드는 bar 도파로 (점선으로 표시)를 통하여 편파되어 출력됨을 확인할 수 있다.

본 논문에서 설계한 플라즈마 광 편파기가 편파거리  $z_p = 10 \mu\text{m}$ 에서 잘 편파되어 출력됨을 구체적으로 보

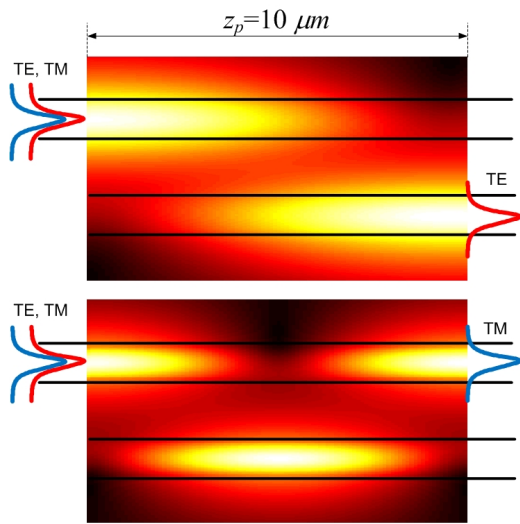


그림 5. Plasmonic 광 편파기 내에서 전파하는 TE, TM 모드의 필드 분포.

Fig. 5. Field distribution of TE and TM modes propagating through plasmonic optical polarizer.

이기 위하여 그림 5에 TE-TM 모드 편파특성에 대한 3차원 전송도를 도시하였다. 그림에서 보듯이, 상향채널을 통하여 입사된 TE-TM 모드가 편파거리를 진행한 후에 TE 모드는 하향채널을 통하여, 그리고 TM 모드는 상향채널을 통하여 분리됨을 잘 보여주고 있다.

결국, 얻어진 수치 해석적 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 전송구조가 동작 특성에 매우 민감한 플라즈마 광 편파기를 설계할 때 기존에 널리 사용되는 결합모드 이론 (coupled-mode method; CMM)이나 빔전파 이론 (beam propagation method; BPM)과 같은 근사적인 해석법들은 정확한 편파 특성들을 제공하기 어렵기 때문에, 본 논문에서 제안한 식 (7)의 모드 억압비율을 사용해야만 쉽고 정확하게 편파거리를 결정할 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 모든 형태의 전송구조에서 플라즈마 광 편파기의 편파특성을 정확하고 쉽게 분석할 수 있는 새로운 편파조건인 모드억압 비율 (mode-suppression ratio: MSR)을 정의하여 광 편파기의 특성을 분석하였다.

분석 결과, 본 논문에서 제안한 SOI 기반의 플라즈마 광 편파기는 나노 크기로 제작이 가능하며 유전체로 구

성된 전형적인 광 편파기에 비하여 TE-TM 모드의 편파 거리가  $z_p = 10 \mu\text{m}$ 로 매우 짧게 나타났다. 더욱이, rib-형 도파로를 구성하는 금속 층에 기인한 삽입손실도  $-1\text{dB}$  이하로 무시할 정도로 작게 나타났다.

결국, 이와 같은 결과들을 종합하면, 금속 층을 포함한 플라즈마 광 편파기의 편파특성을 결정할 때 본 논문에서 제안한 MTLT가 정확하고 좋은 수치 해석적 알고리즘을 제공할 수 있다.

#### 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] K. Rollke, W. Sohler, "Metal-clad waveguide as cutoff polarizer for integrated optics", *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 13, pp. 141~145, 1977.
- [4] W. L. Barnes, A. Dereux and T. W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics," *Nature* 424, pp. 824-830, 2003.
- [5] R.A. Soref, J. Schmidtchen, K. Petermann, "Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO<sub>2</sub>," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 1971-1974, 1991.
- [6] C. Oubre, and P. Nordlander, "Optical properties of metalodielectric nanostructures calculated using the finite difference time domain method," *J. Phys. Chem.*, Vol. 108, pp. 17740-17747, 2004.
- [7] L. B. Felsen and N. Marcuvitz, *Radiation and Scattering of Waves*, pp. 187 - 190, IEEE Press, 1994.
- [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.