

논문 2011-3-7

# 나노 크기의 세 채널 플라즈마 방향성 결합기의 전력분배

## Power Splitting of Plasmonic Directional Couplers with Nano-scale Three Channels

호광춘\*

Kwang-Chun Ho

**요약** 세 채널로 구성된 나노 크기의 플라즈마 방향성 결합기가 모드 결합효과와 릿형 전송구조를 사용하여 설계되었다. 종방향 모드 전송선로 해석법을 이용하여 방향성 결합기에서 전파하는 빛의 전파특성과 설계특성들을 분석하였다. 전력분배기로 동작하는 플라즈마 방향성 결합기는 약 200~250 nm의 전송 폭을 갖는 나노 크기로 설계하였다. 최적의 전력분배율을 얻기 위하여 중심 채널의 폭 변화에 따른 전송 모드들의 굴절률을 분석하였다. 결국, 하향 채널에서 입사된 광 신호를 각 채널을 통하여 출력하는 나노 크기의 플라즈마 방향성 결합기가 설계되었다.

**Abstract** Directional couplers based on plasmonic waveguides with nano-scale three channels are designed by utilizing mode coupling effect as well as rib-guiding structure. Longitudinal modal transmission-line theory(L-MTLT) is used for simulating the light propagation and optimizing the design parameters. The designed plasmonic coupler operating as power splitter has nano-scale size of about 200~250 nm width. In order to achieve the desired power splitting ratio, the refractive index of guiding modes is evaluated along the width variation of center channel. Finally, a power splitter based on triple rib directional coupler, which ensures maximum power transfer from one outermost guide to the other outermost guide, is designed.

**Key Words :** Longitudinal Modal Transmission-Line Theory, Directional Coupler, Coupling Efficiency

### 1. 서 론

오늘날 plasmonic 도파로는 회절에 기인한 손실 없이 광 신호를 도파로에 집약할 수 있는 성능으로 인하여 많은 관심을 끌고 있는 소자이다. 광 신호를 전송선로에 집약할 수 있는 특성으로 인하여, CMOS 전자소자들과 같이 나노 크기의 도파로를 사용하여 광소자 제작이 가능하다<sup>[1-3]</sup>. Plasmonic 소자들은 같은 plasmonic 회로에서 광 신호와 전기 신호를 모두 전송하거나 처리할 수 있기 때문에 포토닉스나 전자회로의 장점을 결합한 초고속 신호처리나 능동소자들을 쉽게 구현할 수 있다<sup>[4]</sup>.

최근 메탈-절연체-메탈로 구성된 나노 크기의 도파로

를 사용한 3차원 구조의 plasmonic 전송소자가 제안되어 왔다. 그러나, 이들 소자들은 높은 전송 손실을 갖기 때문에 전파거리가 수  $\mu\text{m}$ 로 현저하게 짧다. 실질적으로 사용 가능한 광소자 제작 시에 전파거리는 수 백  $\mu\text{m}$ 가 되어야 한다<sup>[5, 6]</sup>. 이를 위하여 본 논문에서는 그림 1(b)에서 보듯이 SiO<sub>2</sub>에 기반을 둔 혼성 plasmonic 도파로를 사용하여 광 신호의 집적도를 높였으며 낮은 전송 손실을 갖도록 구성하였다.

저자가 조사해본 바로는 지금까지 혼성 plasmonic 도파로를 사용하여 나노크기의 세 채널 방향성 결합기를 설계하고 분석한 결과는 거의 없는 것으로 알고 있다.

결국, 본 논문에서는 나노 크기의 세 채널 plasmonic 방향성 결합기를 설계하고 분석할 때 효율적으로 적용이 가능한 유효 유전체 방법 (Effective Dielectric Method:

\*정회원, 한성대학교 정보통신공학과  
접수일자 2011.4.5, 수정일자 2011.5.25  
게재확정일자 2011.6.10

EDM<sup>[7]</sup>을 기반으로 하는 정확한 중방향 모드 전송선로 이론(L-MTLT)<sup>[8]</sup>을 적용하여 나노 크기의 전송폭으로 구성된 결합기의 설계 특성과 그 결합길이를 분석하였다.

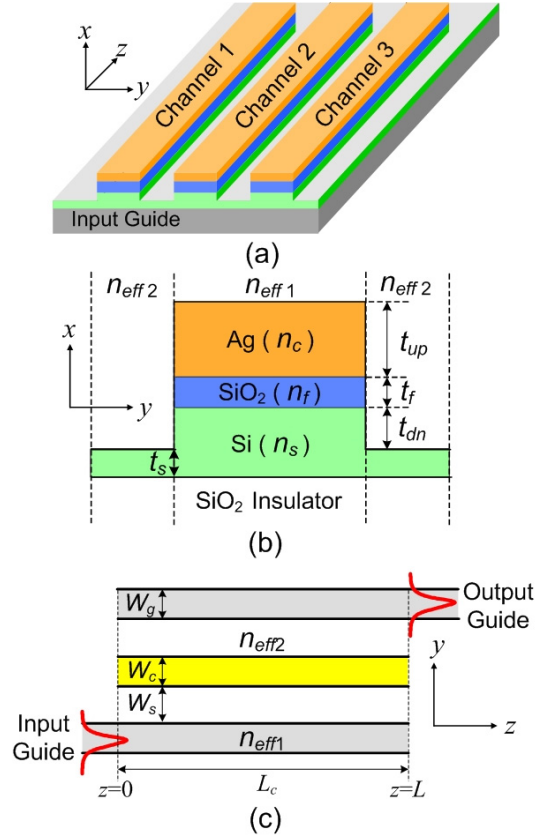


그림 1. (a) 세 채널로 구성된 plasmonic 결합기의 3D 기하학적 구조, (b) rib 도파로의 단면도, (c) 전체적인 2D 평면도.

Fig. 1. (a) 3D geometric configuration of plasmonic coupler with three channels. (b) Side view of the rib guide. (c) Top view of coupler.

## II. Plasmonic 결합기의 전송특성

Plasmonic 결합기와 같이 rib형 광 전송구조로 형성된 방향성 결합기는 rib형 도파로의 높이와 그 전송 폭에 따라 전송 굴절률이 변화하며 이에 의존하여 전송 모드들 사이의 결합효율이 증가하거나 감소한다. 이러한 변수들에 의존하는 3D 구조의 결합기가 그림 1(a)에 자세하게 도시되어 있다. 그때 그림 1(b)에서 보듯이, 결합기는 두

께  $t_s = 100 \text{ nm}$ ,  $t_{dn} = 200 \text{ nm}$ , 굴절률  $n_s = 3.455$ 인 Si, 두께  $t_f = 10 \text{ nm}$ , 굴절률  $n_f = 1.445$ 인 SiO<sub>2</sub>, 두께  $t_{up} = 100 \text{ nm}$ , 굴절률  $n_{up} = 0.1453 + 11.3587i$ 인 Ag 층들로 구성된 전송 채널을 갖도록 설계하였다. 은으로 구성된 금속 층은 금과 같은 다른 금속을 사용하여 설계가 가능하다. 그러나, 은에 비하여 전도도가 낮은 금을 사용하였을 경우 혼성 plasmonic 도파로의 전파 손실이 증가하는 현상이 발생할 수 있다.

또한, 채널 1과 3의 폭은  $W_g = 200 \text{ nm}$ 로 설계하였으며, 각 채널들 사이의 결합영역 폭은  $W_s = 100 \text{ nm}$ 로 선택하였다. 그리고, 설계 변수로 사용될 채널 2의 전송 폭은  $W_c$ 로 선정하였다. 그때 결합기에 존재하는 모드는 본질으로 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.

그림 1(a)에서 파장  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 의 모드가 결합기의  $y$ -축을 따라 입사한다고 가정하자. 이때,  $y$ -축 방향에서의 전파상수는 다음과 같다.

$$k_x^{(j)2} + k_y^2 + k_z^2 = k_x^{(j)2} + \beta^2 = k_0^2 \epsilon_j \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_j$ 는  $j$ -번째 전송 층의 그 유전율을 나타내며,  $yz$ -평면상의 그 전파 상수이다. 그때, 아래와 같은 모드 전송선로 이론의 횡 방향 공진 조건<sup>[8]</sup>을 이용하면, 그 전파 상수  $\beta$ 가 결정된다.

$$|Z_{up}(\beta) + Z_{dn}(\beta)| = 0 \quad (2)$$

여기서,  $Z_{up}(\beta)$ 과  $Z_{dn}(\beta)$ 은  $x$ -축 상의 임의의 위치에서 각각 위와 아래로 본 그 임피던스를 나타내며, 그 축을 따라 구성된 등가 전송선로의 그 전파상수와 특성 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_j = \begin{cases} \frac{\omega \mu_0}{k_x^{(j)}} & (TE_{nm}^z \text{ mode}) \\ \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_j}{k_x^{(j)}} & (TM_{nm}^z \text{ mode}) \end{cases} \quad (3)$$

결국,  $xy$ -평면 상에서  $y$ -축 방향으로 계산된 식 (2)

의 고유치 문제로부터 각 영역들의 그 유효 굴절률 ( $n_{eff}$ )을 결정할 수 있으며, 그림 1(c)와 같은 등가 2D 구조를 얻을 수 있다. 그러므로, 등가화된 이 2D 전송구조에 모드 전송선로 이론을 적용하여 결합기에 전파하는 혼성 모드들 간의 결합특성을 분석할 수 있다.

세 채널 방향성 결합기의 전송 특성을 정확하게 해석하기 위하여 먼저 그림 1에 주어진 방향성 결합기에서 3개의 모드만이 존재하도록 채널 2의 두께  $W_c$ 를 결정해야 한다. 이를 위하여 그림 1(c)의 2D 구조에 대한  $TE_{01}^z$  모드의 산란도 (dispersion curve)를 수치해석 하였다. 그림 2에서 보듯이 3개의 모드가 존재하는 채널 2의 두께  $W_c$ 는  $100 \sim 380 \text{ nm}$  이다. 이 중에서도 입력 모드의 분포가 가장 좋은 (전력전송이 최대가 되는) 두께  $W_c = 250 \text{ nm}$ 에 대하여 그 결합효율을 해석하였다.

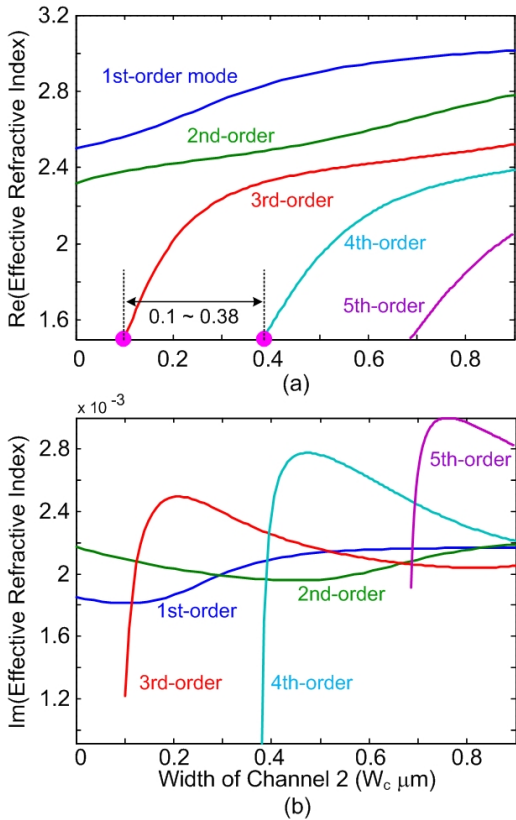


그림 2. 채널 2의 전송 폭 변화에 따른 모드들의 유효굴절률: (a) 실수 값, (b) 허수 값.  
Fig. 2. Effective refractive index of modes along with width of channel 2: (a) real value, (b) imaginary value.

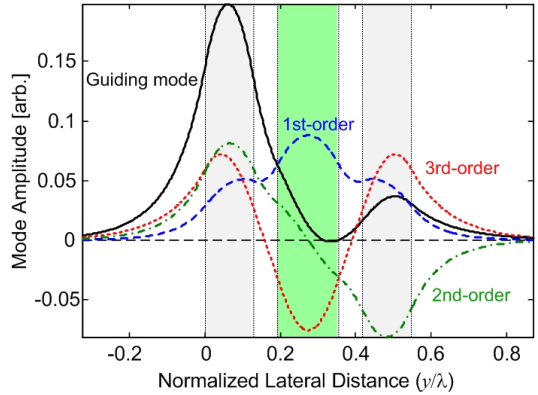


그림 3. 결합기에서 전파하는 모드들의 lateral 필드분포와 3개의 전파모드들이 결합된 전송모드.  
Fig. 3. Lateral field distribution of modes propagating at coupler, and guiding mode composed by the 3 modes.

그리고, 그림 3에서 보듯이 모드 전송선로 해석법의 공진조건을 적용하여 입력 단에서 발생하는 3개의 모드들에 대한 전개분포를 도시하였다. 그림에서 보듯이 3개의 모드만이 채널 1의 입력 경계면에 존재하고 대부분의 전력이 채널 1을 통하여 입력됨을 알 수 있다.

### III. Plasmonic 결합기의 결합효율

그림 1(c)에서 보듯이 결합기를 통하여 전파하는 필드는  $x$ -축 상의 변화가 없고, 입력 모드는 상향 도파로를 통하여 입사 되어 세 채널을 통하여 전송된다고 가정하였다. 그때, 식 (2)에 주어진 등가 전송선로의 횡 방향 공진조건을 전파상수  $\beta$ 에 대하여 적용하면 입/출력 단에서의  $TE_{nm}^z$  모드에 대한 정확한 횡 방향 전개 성분은

$$E_r(y, z) = V_r(z)e_r(y) \quad (4)$$

와 같으며, 결합기 내에서 전파하는 전개는 그림 3에 주어진  $N = 3$ 개의 전파모드들이 아래와 같이 선형적으로 결합하여 표현된다.

$$E_{mmi}(y, z) = \sum_{m=1}^N V_m(z)e_m(y) \quad (5)$$

여기서,  $r$ 은 입/출력 영역에서 각각  $in$  또는  $out$ 을 나

타내며,  $V_m(z) = V_m(0)e^{ik_z z}$  는  $m$ -번째 모드의 모드 전압, 그리고  $e_m(y)$  는  $m$ -번째 모드의 횡방향 필드 분포를 각각 나타낸다.

결국, 입력 경계면  $z = 0$  에서 식 (4)와 (5)의 전개 분포에 대하여 경계조건을 적용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$V_{in}(0)e_{in}(y) = \sum_{m=1}^N V_m(0)e_m(y) \quad (6)$$

여기서,  $V_{in}$  은 입력 단에 걸리는 모드 전압이며,  $e_{in}(y)$  은 입력 단에서 입사되는 횡방향 필드 분포이다.

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

$$V_{out}(L)e_{out}(y) = \sum_{m=1}^N V_m(L)e_m(y) \quad (7)$$

이때 위의 식 (6)에  $TE_{nm}^z$  모드의 직교조건<sup>[8, 9]</sup>을 적용하고 풀면 다음과 같다.

$$V_m(0) = T_{in,m} V_{in}(0) \quad (8)$$

여기서, 입력 변환상수 (input transformation coefficient)  $T_{in,m}$  은 아래와 같이 주어진다.

$$T_{in,m} = \int_{cs} e_{in}(y)e_m^*(y)dS \quad (9)$$

결국, 출력 정규화 조건을 적용하여 식 (7)을 출력 전압에 대하여 풀면

$$V_{out}(L) = \sum_{m=1}^N \left\{ T_{m,out} V_m(0)e^{ik_z m L} \right\} \quad (10)$$

이 된다. 여기서, 출력 변환상수  $T_{m,out}$  은

$$T_{m,out} = \int_{cs} \left\{ e_m(y)e_{out}^*(y)dS \right\} \quad (11)$$

과 같이 정의된다. 그러므로, 식 (8)을 식 (10)에 대입하고

정리하면 입력전력에 대한 출력전력의 비율을 나타내는  $TE_{nm}^z$  모드의 결합효율 (coupling efficiency)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta_{TE_{nm}^z} &= \frac{P_{out}}{P_{in}} = Re \left( \frac{k_{z,out}}{k_{z,in}} \right) \left| \frac{V_{out}(L)}{V_{in}(0)} \right|^2 \\ &= Re \left( \frac{k_{z,out}}{k_{z,in}} \right) \left| \sum_{m=1}^N \left\{ T_{in,m} T_{m,out} e^{ik_z m L} \right\} \right|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,  $k_{z,in}$  과  $k_{z,out}$  은 각각 입력영역  $z < 0$  과 출력영역  $z > L$ 에서  $TE_{nm}^z$  모드의 전파상수를 나타내며, 식 (12)를 유도하기 위하여 구성된 등방향 모드 전송선로 이론에 기초한 등가 전송선로가 그림 4에 자세하게 묘사되어 있다.

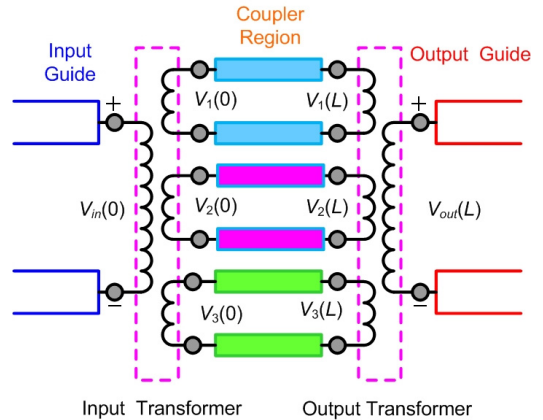


그림 4. Plasmonic 결합기의 결합효율을 유도하기 위하여 구성된 등가 전송선로.  
Fig. 4. Equivalent network connected to define the coupling coefficient of plasmonic coupler.

#### IV. Plasmonic 결합기의 결합길이

앞 장에서 유도하고 정의한 식 (12)의 결합효율을 이용하여 본 논문에서 설계구조를 제시한 plasmonic 결합기의 전송특성을 수치 해석하였다. 즉, 입력 채널을 통하여 입력된 광 신호가 임의의 결합길이  $z = L_c$ 를 진행한 후에 각 채널을 통하여 출력되는 특성을 분석하였다.

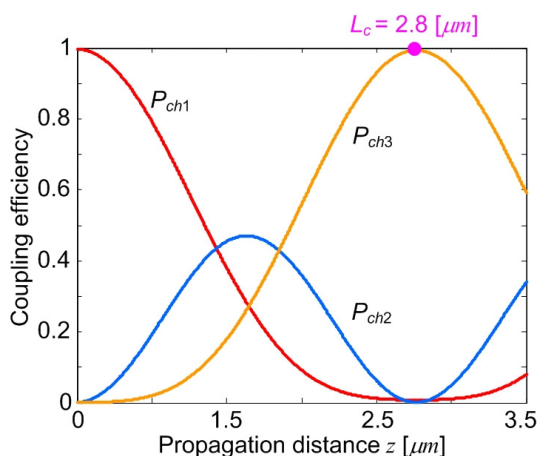


그림 5. 채널 1을 통하여 입력된 광 신호의 결합효율.  
Fig. 5. Coupling efficiency of optical signal incident into channel 1.

먼저,  $TE_{01}^z$  모드에 대하여 결합기의 결합길이  $L_c$ 에 따른 입/출력 신호들의 결합효율을 분석하였다. 그림 5에서 보듯이, 하향 입력 채널에서 입력된 광 신호는 출력 단에서 각 채널을 통하여 전송되며, 그 입력 신호는  $L_c = 2.8 \mu m$ 에서 상향 채널( $P_{ch3}$ )를 통하여 거의 모든 신호를 방출하였으며,  $L_c = 1.7 \mu m$ 에서는 가운데 채널( $P_{ch2}$ )을 통하여 50%의 입력 신호가 그리고 상/하향 채널( $P_{ch1}, P_{ch3}$ )을 통하여 각각 25%의 신호가 출력됨을 보였다.

이를 구체적으로 확인하기 위하여, 그림 6에 결합기 내에서 전파하는 필드의 분포도를 도시하였다. 그림에서 보듯이, 상향 입력 채널을 통하여 입력된 광 신호가 앞서 언급한 것과 같이 각 결합길이에서 잘 출력되고 있으며 주기적으로 이와 같은 결합특성이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한, 전파모드(guiding mode)가 각 채널을 통하여 잘 결합되어 출력됨을 알 수 있다.

본 논문에서는 도시하지 않았지만, 주기적으로 발생하는 결합특성은 전파거리  $z$ 가 증가함에 따라 현저하게 감소하였다. 즉, 출력 신호의 세기가 현저하게 감소하였다. 이와 같은 현상은 그림 2(b)에서 보듯이 본 논문에서 설계한 plasmonic 결합기는  $10^{-3}$  차수의 전파 손실이 존재하는 전송구조이므로 발생하는 결과라 할 수 있다.

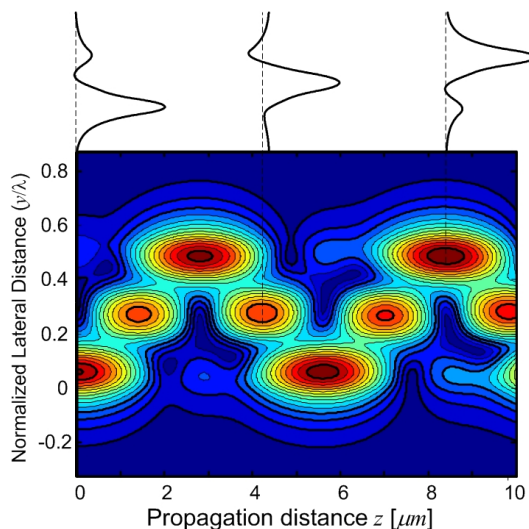


그림 6. Plasmonic 결합기 내에서 전파하는 필드 분포도.  
Fig. 6. Contour of field distribution propagating through plasmonic coupler.

## V. 결 론

3D 구조인 광 plasmonic 방향성 결합기의 설계 및 특성을 분석하기 위하여 모드 전송선로 이론과 유효 유전체 방법을 결합하여 그 결합기의 결합특성을 수치 해석하였다.

그 결과 본 논문에서 제안한 나노 크기의 결합기는 하향 입력 채널을 통하여 입사된 혼성모드들을 결합길이  $L_c = 2.8 \mu m$ 에서 상향 채널( $P_{ch3}$ )를 통하여 신호를 방출하였으며, 결합길이  $L_c = 1.7 \mu m$ 에서는 1 : 2 : 1의 비율로 광 신호를 각 채널을 통하여 방출하였다.

이와 같은 결과들은 금속 층을 포함한 plasmonic 광 결합기의 전송특성과 설계특성을 결정 할 때 본 논문에서 제안한 등가전송 선로 해석법이 훨씬 쉽고 좋은 수치 해석적 알고리즘을 제공할 수 있다는 것을 보여 주는 것이다.

## 참 고 문 헌

[1] B. Wang and G. P. Wang, "Surface plasmonic polariton propagation in nanoscale metal gap

- waveguides,” *Opt. Lett.*, vol. 29, pp. 1992–1994, 2004.
- [2] K. Tanaka, M. Tanaka, and T. Sugiyama, “Simulation of practical nanometric optical circuits based on surface plasmon polariton gap waveguides,” *Opt. Express*, vol. 13, pp. 256–266, 2005.
- [3] L.Liu, Z. H. Han, and S. L. He, “Novel surface plasmon waveguide for high integration,” *Opt. Express*, vol. 13, pp. 6645–6650, 2005.
- [4] E. Ozbay, “Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions,” *Science*, vol. 311, pp. 189–193, 2006.
- [5] D. Dai and S. He, “A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confinement,” *Opt. Express*, vol. 17, pp. 16646–16653, 2009.
- [6] R. F. Oulton, V. J. Sorger, D. A. Genov, D. F. P. Pile, and X. Zhang, “A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation,” *Nat. Photonics*, vol. 2, pp. 496–500, 2008.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 호광춘, “초소형 전송폭을 갖는 광 다중모드 간섭 결합기의 설계,” *한국인터넷방송통신학회 논문지*, 제11권 1호, pp. 47–52, 2011.

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.

## 저자 소개

### 호 광 춘(정회원)

- 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>