

곡면형 도파로를 사용한 편광 무의존성 방향성 결합기의 구현

Implementation of Polarization-Insensitive Directional Coupler using Curved Waveguides

호광춘*

Kwang-Chun Ho *

요약 등각변환 해석법과 종방향 모드 전송선로 이론을 이용하여 이중 샌드위치 Rib-형 도파로에 기초한 곡면형 편광 무의존성 방향성 결합기(PI-CDC)의 편광특성을 자세하게 탐구하였다. 제안한 곡면형 방향성 결합기의 편광 무의존성 조건을 얻기 위하여 곡면의 내부 반경 크기에 따라 변하는 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드의 결합길이와 결합효율을 분석하였다. 수치해석 결과, 수 마이크로미터 크기의 곡면형 편광 무의존성 방향성 결합기는 이중 샌드위치 층의 구조적, 물질적 변수들과 곡률반경을 잘 선택함으로써 구현할 수 있음을 보였다. 또한, 곡면형 편광 무의존성 방향성 결합기에서 전파하는 quasi-TE/TM 모드들의 분포 프로필을 분석하였고, 그 분석을 통하여 곡면이 전파특성에 어떤 영향을 미치는지에 대하여 조사하였다.

Abstract The polarization characteristics of polarization-insensitive directional coupler based on double sandwiched rib-type and curved waveguides are explored in detail by using conformal transformation method (CTM) and longitudinal modal transmission-line theory(L-MTLT). To obtain the polarization-insensitive condition of polarization-insensitive curved directional coupler(PI-CDC), the coupling length and coupling efficiency according to the inner radius of PI-CDC are analyzed for quasi-TE and quasi-TM modes. The numerical results show that the PI-CDC with a few micrometer scales can be realized by properly choosing the curvature and structural and material parameters of double sandwiched layers. Furthermore, the mode profiles propagating through PI-CDC are evaluated, and the influence on coupler performance has been investigated.

Key Words : Polarization-Insensitive Coupler, Curved Waveguide, Conformal Mapping

1. 서론

휘거나(bent) 또는 곡선(curved) 형태의 도파로는 집적 광학에서 매우 중요한 소자이다. 평면형 도파로(planar waveguide: PW)와 달리 곡면형 도파로(curved waveguide: CW)는 쉽게 전파 방향을 변경할 수 있으며,

Mach-Zender 변조기에서 광 스위칭을 지원하고 Y형 도파로에서 전력을 효율적으로 분배하는데 사용될 수 있다. 또한, 작은 반경을 갖는 CW를 사용하여 초소형 광학 소자를 제작할 수 있다. 그러나, 불행하게도 이러한 소형 칩은 일정한 반경의 굴곡을 따라 광 신호가 전파할 때 광 신호의 방출로 인하여 전력 손실이 발생한다. 일정한 곡

*종신회원, 한성대학교 정보통신공학과
접수일자: 2014년 10월 29일, 수정완료: 2016년 1월 7일
게재확정일자: 2016년 2월 5일

Received: 29 October, 2014 / Revised: 7 January, 2016 /
Accepted: 5 February, 2016

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

를반경을 갖는 CW는 휘어진 각 부분마다 전파하는 고유 모드 간의 불일치로 인하여 CW 제작 시에 가장 큰 문제의 원인인 전이 손실(transition loss)을 발생시킨다.

그럼에도 불구하고 두 개의 휘어진 도파로로 구성된 곡면형 방향성 결합기(curved directional coupler: CDC)는 결합 영역을 따라 비상수 결합 계수를 가지고 있기 때문에 평면형 방향성 결합기(planar directional coupler: PDC)보다 좋은 결합 성능과 출력 방향을 조절할 수 있는 방향성(directionality)을 갖는다. 본 논문에서는 원하는 방향으로 쉽게 광 신호를 출력하고, TE/TM 모드의 특성에 의존하지 않는 나노 scale 편광 무의존성 곡면형 방향성 결합기를 설계하기 위하여 새로운 형태의 PI-CDC (polarization-insensitive curved directional coupler)를 제안하였다. PI-CDC에서 도파로의 곡률 반경과 두 도파로 간의 설계 변수들을 조정하여 도파로 구조 설계의 자유도를 높일 뿐만 아니라, 소자 제조의 어려움을 감소시킬 수 있다.

CW의 첫 번째 이론적인 분석은 1969년 Marcatili에 의해 수행되었다^[1]. 그 이후 등각변환 해석법(conformal transformation method: CTM)^[2], 유한차분 해석법(finite-difference method)^[3], 모드매칭 해석법(mode-matching method)^[4]과 같은 다양한 모델 및 방법들이 제안되어 왔고 발전되어 왔다. 또한, Beamprop^[5]과 Fimmwave^[6]와 같은 상용 소프트웨어 패키지를 사용하여 분석하고 구현되기도 하였다. 그러나, 앞에서 언급하였듯이 CW는 휘어진 모양 때문에 휨 손실(bending loss)이 발생하고 이는 PI-CDC 설계 시에 매우 중요한 변수로 작용한다. 따라서, 우수한 특성을 가진 PI-CDC를 설계하기 위하여 휘어진 도파로들 사이의 결합특성을 정확하게 분석할 수 있는 방법이 필요하다.

이를 위하여 본 논문에서는 CW를 PW의 형태로 변환하여 CW의 굽힘 효과를 직관적으로 분석할 수 있는 CTM를 이용하여 제안한 PI-CDC를 PI-PDC로 변환하였다. 더욱이, 그 결합특성을 수치 해석적으로 입증하기 위하여 유효 유전체 방법(effective dielectric method: EDM)^[7]을 기반으로 하는 종방향 모드 전송선로 해석법(longitudinal modal transmission-line theory: L-MTLT)^[8]을 적용하여 결합효율을 정의하고 그 특성을 분석하였다.

II. PI-CDC의 설계원리

PW에서 기본 모드는 도파로의 중심을 따라 전파하지만, CW에서는 중심으로부터 약간 벗어난 위치에서 전파한다. 이와 같은 불일치로 인하여 PW와 CW가 연결된 접합면에서 광 신호의 전환(transition)은 많은 손실을 발생시킨다. 이와 같은 현상을 직관적으로 분석하기 위하여 CW를 PW의 형태로 변환하는 CTM의 적용이 필수적이다. 만일, $n(x, y)$ 가 rib-형 도파로의 종방향(transverse) 굴절률이고 (x, y) 가 종방향 좌표(도파로의 내/외부 경계에서 $x = R_1, R_2$)를 나타낸다면, 그때 CTM를 CW에 적용하면 다음과 같은 변환이 가능하다.

$$(x, y) \rightarrow (u, v) : u = x, v = R_2 \ln\left(\frac{y}{R_2}\right) \quad (1)$$

이때 외부 곡률반경 R_2 를 갖는 CW는 다음과 같은 굴절률 분포의 PW 처럼 동작한다.

$$n_{eq}(v) = n(r) \exp\left(\frac{v}{R_2}\right) \quad (2)$$

이와 같은 CTM에 대한 자세한 내용이 그림 1에 도시되어 있다.

그림 1과 식 (1), (2)에서 설명한 CTM에 기초하여, 본 논문에서 제안한 PI-CDC를 PI-PDC로 등각변환(conformal mapping)을 수행하였다. 그림 2에서 보듯이, 그림 2(c)와 같은 굴절률 분포를 갖는 PI-CDC가 CMT를 적용하면 그림 2(d)와 같은 비선형 굴절률 분포를 갖는

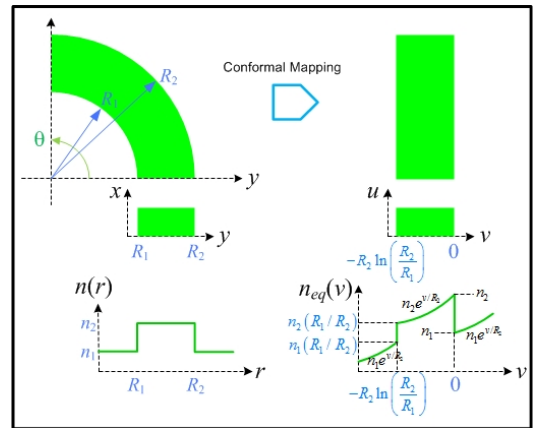


그림 1. 곡면형 도파로와 평면형 도파로 사이의 등각 변환.
Fig. 1. Conformal mapping between a curved waveguide and a straight waveguide.

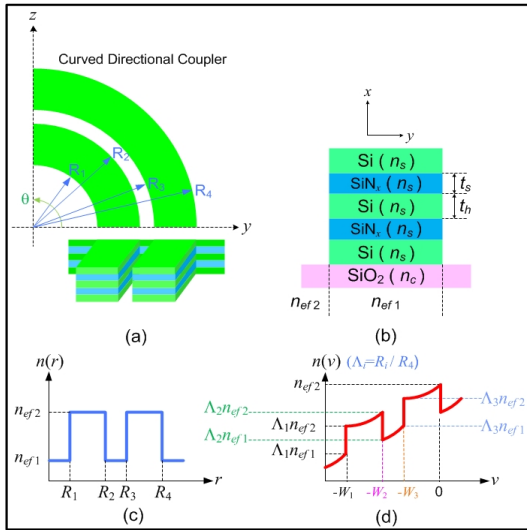


그림 2. 곡면형 도파로를 사용한 편광 무의존성 방향성 결합기의 (a) 기하학적 3-D 구조, (b) rib-형 도파로 단면도, (c) rib-형 도파로의 유효 굴절률 분포, (d) CTM을 적용한 곡면형 도파로의 등가 유효 굴절률 분포.

Fig. 2. (a) 3-D geometric configuration, (b) side view of the rib-type guide, (c) effective index profile of rib guide, and (d) the equivalent index profile of curved guide in CTM of polarization-insensitive directional coupler using curved waveguides.

PI-PDC로 등가화될 수 있다. 이때, PI-PDC의 곡률반경 비율(Λ_i)과 도파로의 폭(W_i)은 다음과 같이 정의된다.

$$\Lambda_i = \frac{R_i}{R_4}, W_i = R_4 \ln \left(\frac{R_4}{R_i} \right) \quad (3)$$

III. PI-CDC의 결합특성

본 논문에서 제안한 광 PI-CDC의 3-D 기하학적 구조가 그림 2(a), (b)에 자세하게 도시되어있다. 그림 2(b)에서 보듯이, PI-CDC는 굴절률 $n_c = 1.46$ 인 SiO₂ 기판 위에 두께 $t_h = 200\text{nm}$, 굴절률 $n_h = 3.48$ 인 Si와 두께 t_s , 굴절률 n_s 인 SiN_x가 이층으로 적층된 rib-형 도파로 구조로 설계하였다. 여기서, SiN_x의 두께와 굴절률은 편광 무의존성 특성을 만족하도록 수치해석을 통하여 결정되는 변수들이며, 굴절률은 nitride 농도 x 에 의존하여

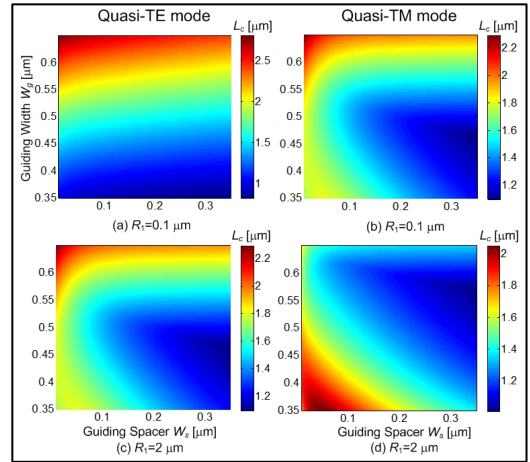


그림 3. Quasi-TE/TM 모드에 대한 PI-CDC의 도파로 폭 W_g 와 도파로 사이의 간격 W_s 에 따른 결합길이의 변화.

Fig. 3. Variation of the coupling length along guiding width W_g and spacer W_s of PI-CDC for Quasi-TE/TM mode.

결정된다.

또한, PI-CDC에서 광 신호를 전달하는 입/출력 도파로의 폭은 $W_g (= R_2 - R_1 = R_4 - R_3)$ 로 설계하였으며, 상/하향 도파로들 사이의 간격은 $W_s (= R_3 - R_2)$ 로 선택하였다. 그 때 PI-CDC에 존재하는 모드는 본질적으로 전파 방향에 따라 quasi-TE 모드 (z 축에 대한 TE 모드)와 quasi-TM 모드 (z 축에 대한 TM 모드)로 분류된다.

PI-CDC에서 전파하는 quasi-모드들의 편광 무의존성 특성을 정확하게 해석하기 위하여, 먼저 그림 2(d)의 CTM을 사용하여 PI-CDC를 PI-PDC로 변환하고, 변환된 3D 구조인 PI-PDC에 EDM을 적용하여 유효 굴절률 (n_{ef1}, n_{ef2})로 구성된 2D 전송구조를 설계한다. 마지막으로 등가화된 2D PI-PDC에서 발생하는 모드들의 결합 길이와 결합효율을 L-MTLT를 사용하여 유도하고 분석하였다.

L-MTLT의 원리를 적용하여 각 입/출력 단에서의 quasi-TE/TM 모드에 대한 등가 관계식과 quasi-TE/TM 모드의 직교조건을 적용하고 풀면 다음과 같은 PI-PDC의 결합효율 (coupling efficiency)을 정의할 수 있으며, 이는 입/출력 전력 사이의 비율을 나타낸다^[8].

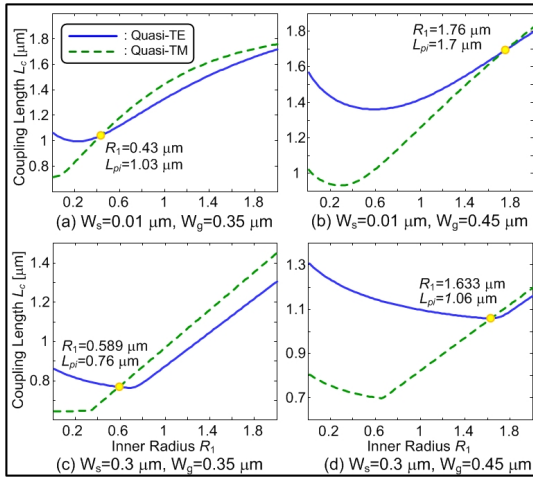


그림 4. PI-CDC의 내부 반경 R_1 에 따른 결합길이의 변화: (a)–(d)는 각각 다른 도파로 간격 W_s 와 도파로 폭 W_g 에 대한 결과이다.

Fig. 4. Variation of the coupling length along inner radius R_1 of PI-CDC. Here, (a)–(d) is for the spacer width W_s and guiding width W_g with different values, respectively.

$$\eta_{TE} = \left(\frac{\beta_{out}}{\beta_m} \right) \left| \sum_{m=1}^2 T_{in,m} T_{m,out} e^{i\beta_m L_c} \right|^2 \quad (\text{quasi-TE})$$

$$\eta_{TM} = \left(\frac{\beta_{out}}{\beta_m} \right) \left| \sum_{m=1}^2 Q_{m,m} Q_{m,out} e^{i\beta_m L_c} \right|^2 \quad (\text{quasi-TM}) \quad (4)$$

여기서, β 는 각 영역에서의 전파상수를 나타내며, T, Q 는 입/출력 단에서 발생하는 입/출력 변환기의 변환상수 (transformation coefficient)이며 다음과 같이 주어진다.

$$T_{a,b} = \int_{cs} e_a(y) e_b^*(y) dy, \quad Q_{a,b} = \int_{cs} h_a(y) h_b^*(y) dy \quad (5)$$

식 (5)에서 $e_m(y), h_m(y)$ 는 결합영역(coupling region)에서 m -번째 모드의 횡방향 필드분포를 각각 나타내며, quasi-TE/TM 모드의 결합 특성을 분석할 수 있는 결합 길이 (coupling length) L_c 는 아래와 같이 정의된다.

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \quad (6)$$

여기서, β_0, β_1 는 각각 결합영역에서 전파하는 기본 모드 (fundamental mode)와 1차 상위 모드 (1st higher order

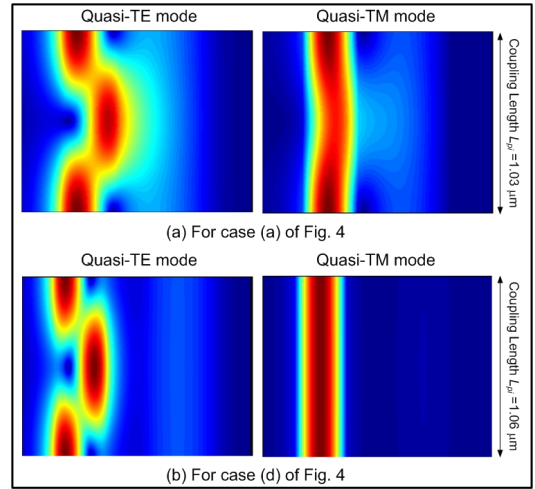


그림 5. PI-CDC 내에서 전파하는 Quasi-TE/TM 모드의 결합효율.

Fig. 5. Coupling efficiency of Quasi-TE/TM mode propagating through PI-CDC.

mode)의 전파상수이다. 결국, 위에서 정의한 식 (4)의 결합효율과 식 (6)의 결합길이를 수치 해석하여 원하는 특성의 PI-PDC를 설계할 수 있다.

IV. 수치해석 및 고찰

본 논문에서 제안한 이중 샌드위치 rib-형 도파로로 형성된 PI-CDC의 편광특성을 자세하게 분석하기 위하여 도파로 폭 W_g 와 도파로 사이의 간격 W_s 에 따라 변하는 식 (6)의 결합길이를 동작파장 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 분석하였다.

그림 3(a)와 (b)에서 보듯이, 내부 반경 $R_1 = 0.1 \mu\text{m}$ 인 경우 quasi-TE/TM 모드의 결합길이는 도파로 폭 W_g 가 증가함에 따라 점진적으로 증가하였다. 반면에 증가하는 도파로 사이의 간격 W_s 에 따른 결합길이의 변화는 거의 없었다. 그러나, 그림 3(c)와 (d)에서 보듯이, 내부 반경 $R_1 = 2 \mu\text{m}$ 인 경우 quasi-TE/TM 모드의 결합길이는 서로 상이한 특성을 나타내었다.

그림에서 보듯이, quasi-TE 모드의 경우 W_g 가 $0.5 \mu\text{m}$ 로부터 증가 또는 감소함에 따라 결합길이는 비선형적으로 증가하였으며, W_s 가 증가함에 따라 결합길이는 감소하는 특성을 나타내었다. 더욱이, W_g 가

0.5 μm 로부터 증가하는 영역에서 결합길이의 증가율이 감소하는 영역에서 보다 크게 나타났다. 반면에 quasi-TM 모드의 경우는 W_g 가 0.6 μm 근처에서 quasi-TE 모드의 경우와 반대의 특성이 나타났다. 즉, 증가하는 영역에서 결합길이의 증가율이 감소하는 영역에서 보다 작게 나타났다. 그러므로, 분석 결과를 종합해 보면 quasi-TE/TM 모드의 결합길이는 내부 반경 R_1 의 변화에 따라 현저하게 다르게 변하기 때문에, 두 모드들 사이에 편광 무의존성 조건을 만족하는 조건이 존재할 수 있다는 것이다.

이와 같은 결과를 구체적으로 확인하기 위하여 그림 4에 내부 반경 R_1 , 도파로 폭 W_g , 도파로 사이의 간격 W_s 에 따른 quasi-TE/TM 모드의 결합길이를 수치해석하였다. 그림에서 보듯이, 편광 무의존성 조건을 만족하는 결합길이 L_{pi} 는 W_g 가 증가함에 따라 다소 증가하였으나, W_s 가 증가함에 따라서는 약간 감소하였다. 그러나, 편광 무의존성 조건을 만족하는 내부 반경 R_1 은 W_g 와 W_s 의 선택에 따라 크기가 증가하거나 감소함을 보였다.

결국, 그림 4에서 보듯이 본 논문에서 구현한 편광 무의존성 조건을 만족하는 PI-CDC의 결합길이 ($L_{pi} < 2 \mu\text{m}$)는 기존에 구조적 설계를 통하여 얻은 PI-PDC의 조건($L_{pi} > 100 \mu\text{m}$)보다 수십 배에서 수백 배 소형화된 PI-CDC가 설계될 수 있음을 알 수 있다. 또한, PI-CDC의 회전각 θ 와 CTM을 사용하여 등가화된 PI-PDC의 전파거리 $z = L_{pi}$ 사이의 관계를 통하여 원하는 회전각에서 광 신호를 출력되는 PI-CDC를 설계할 수 있다. 즉, 다른 광소자와 결합하기 위하여 출력방향을 매우 자유롭게 조절할 수 있는 flexible PI-CDC의 설계가 가능하다.

마지막으로, 본 논문에서 설계한 PI-CDC가 그림 4의 편광 무의존성 조건에서 잘 동작함을 구체적으로 보이기 위하여 그림 5에 quasi-TE/TM 모드들의 전파특성에 대한 3차원 결합효율을 도시하였다. 그림에서 보듯이, 상향 채널을 통하여 입사된 quasi-TE/TM 모드가 편파거리 $L_{pi} = 1.03 \mu\text{m}$ 과 $1.06 \mu\text{m}$ 를 진행한 후에 두 모드 모두 같은 채널을 통하여 최대 전력이 잘 출력됨을 보여주고 있다. 더욱이, 내부 반경이 큰 경우($R_1 = 1.633 \mu\text{m}$)에서 보다 내부 반경이 작은 경우($R_1 = 0.43 \mu\text{m}$)에서

PI-CDC의 휘어짐이 커지기 때문에 외부 반경 R_4 를 통하여 PI-CDC 밖으로 누설(leaky)되는 전송 전력이 현저하게 발생함을 보여 주고 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 이중 샌드위치 rib-형 전송구조를 사용하여 곡면형 편광 무의존성 방향성 결합기(PI-CDC)를 제안하였으며, 그 설계 특성을 분석하였다. PI-CDC를 직관적으로 분석하기 위하여 등각변환 해석법(CTM)을 사용하여 곡면 형태의 PI-CDC를 평면 형태의 PI-PDC로 등가화하였고, 종방향 모드 전송선로 해석(L-MTLT)을 적용하여 그 결합길이와 결합효율을 분석하였다.

분석 결과, 제안한 PI-CDC의 결합길이는 나노 크기(nano-scale)로 제작이 가능하기 때문에 기존에 널리 사용하고 있는 마이크로 크기(micro-scale)의 PI-PDC 보다 현저하게 초소형 소자로 제작할 수 있음을 보였다. 더욱이, PI-CDC는 휘어짐 특성에 기인하여 결합하는 방향이 자유롭기(flexible) 때문에 매우 효과적으로 다양한 기능성 광소자들과 집적하여 사용할 수 있다.

References

- [1] E. A. J. Marcatili, "Bends in optical dielectric guides", Bell Sys. Tech. J. Vol. 48, pp. 2103 - 2132, 1969.
- [2] M. Heiblum and J. H. Harris, "Analysis of curved waveguides by conformal transformation", IEEE J. Quantum Electron. Vol. QE-11, pp. 75 - 83, 1975.
- [3] T. Yamamoto and M. Koshiba, "Numerical analysis of curvature loss in optical waveguides by finite-element method", J. Lightwave Technol. Vol. 11, pp. 1579 - 1583, 1993.
- [4] L. Prkna, M. Hubalek and J. Ctyroky, "Vectorial eigenmode solver for bentwaveguides based on mode matching", IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 13, pp. 2057 - 2059, 2004.
- [5] Details available from www.rsoftinc.com.
- [6] Details available from www.rsoftinc.com.

- [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, No. 2, pp. 270-274, 2005.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.