

http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.2.165

IIBC 2016-2-21

곡면형 다중모드 간섭 도파로를 사용한 플라즈마 적응 결합기의 구현

Realization of Plasmonic Adaptive Coupler using Curved Multimode Interference Waveguide

호광춘*

Kwang-Chun Ho*

요약 곡면형 플라즈마 도파로에 기초한 나노 크기의 전력분배기가 다중모드 간섭 결합기의 특성을 이용하여 설계되었다. 플라즈마 곡면형 다중모드 간섭 결합기(PC-MMIC)의 적응 특성을 쉽게 분석하기 위하여 등각변환 해석법을 이용하여 곡면형 구조를 평면형 구조로 등가 변환하였다. 또한, 3D 전송구조의 전파특성과 최적의 설계변수를 선택하기 위하여 유효 유전체 방법과 종방향 모드 전송 선로 해석법을 적용하였다. 설계된 2×2 PC-MMIC는 휘어진 구조에 기 인하여 quasi-TM 모드에서는 PC-MMIC의 특성이 나타나지 않았으며, quasi-TE 모드의 경우 50%:50%의 비율로 출력되는 3dB 결합특성이 나타나지 않았다. 더욱이, 곡률 반경이 작은 부분 보다 큰 부분에서 입사된 신호가 더욱 좋은 결합특성을 나타내었다.

Abstract Nano-scale power splitter based on curved plasmonic waveguides are designed by utilizing the multimode interference (MMI) coupler. To analyze easily the adaptive properties of plasmonic curved multimode interference coupler(PC-MMIC), the curved form transforms equivalently into a planar form by using conformal transformation method. Also, effective dielectric method and longitudinal modal transmission-line theory are used for simulating the light propagation and optimizing the structural parameters at 3-D guiding geometry. The designed 2×2 PC-MMIC does not work well for quasi-TM mode case due to the bending structure, and it does not exist 3dB coupling property, in which the power splitting ratio is 50%:50%, for quasi-TE mode case. Further, the coupling efficiency is better when the signal is incident at channel with large curvature radius than small curvature radius.

Key Words : Plasmonic curved MMI coupler, Power splitting ratio, Equivalent network

1. 서 론

분할 비율이 다른 전력 분배율 (power splitting ratio: PSR)을 갖는 다중모드 간섭 (multimode interference: MMI) 결합기는 high-Q 링 공진기^[1, 2], 사다리 구조의

광학 필터, 루프 거울 부분 반사경^[3]과 같은 광 집적 회로에 적용하여 폭 넓게 사용할 수 있는 매력적인 소자이다. 앞선 연구 논문들에서 평면 직사각형 형태의 전형적인 MMI 결합기는 주로 분할 비율이 다른 PSR^[4]을 얻기 위하여 제안되고 설계되어 왔다. 따라서 다양한 형태의

*종신회원, 한성대학교 정보통신공학과
접수일자 2015년 11월 27일, 수정완료 2016년 3월 17일
게재확정일자 2016년 4월 8일

Received: 27 November, 2015 / Revised: 17 March, 2016 /
Accepted: 8 April, 2016

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

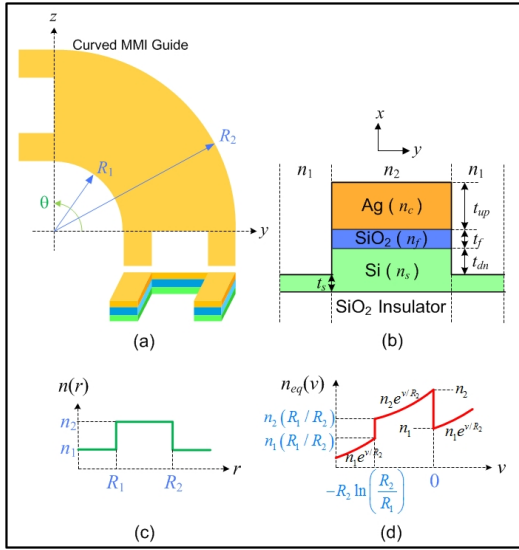


그림 1. 곡면형 MMIC를 사용한 플라즈마 적응 결합기의 (a) 기하학적 3-D 구조, (b) rib-형 도파로 단면도, (c) rib-형 도파로의 유효 굴절률 분포, (d) 등각 변환이론을 적용한 곡면형 도파로의 등가 유효 굴절률 분포.

Fig. 1. (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 conformal transformation theory of plasmonic adaptive coupler using curved MMIC.

PSR을 발생시키기 위한 합리적인 방법을 찾는 것은 MMI 결합기에 기초한 모든 광학 신호 처리 장치를 구현하기 위하여 매우 중요한 연구이다.

근본적으로, PSR을 자유롭게 선택할 수 있는 방법은 MMI 결합기 내의 임의의 위치에 다른 위상차를 발생시키는 물질을 삽입하거나, MMI 결합기의 구조를 나비형 (butterfly-like)이나 테이퍼형 (tapered-like)과 같이 특별한 형태로 제작하여 유효굴절률을 바꾸는 것이다. 그러나 이와 같은 방법으로 MMI 결합기에서 PSR을 자유롭게 선택할 수 있는 장치들을 구현 할 수 있으나, 광학 신호 처리 장치에서 자주 발생하는 광신호의 출력 방향을 MMI 결합기 자체로 조절하는 것은 사실상 불가능하다. 출력 방향을 조절하기 위하여 방향성 결합기 (directional coupler)와 같은 다른 형태의 광소자와 연결해야만 한다.

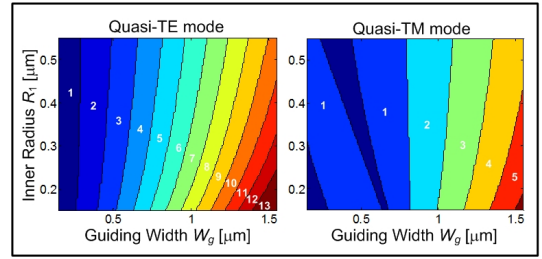


그림 2. PC-MMIC의 전송 폭 W_g 와 내부 반경 R_1 에 따라서 발생하는 모드의 수.

Fig. 2. The number of modes according to the guiding width W_g and inner radius R_1 of PC-MMIC.

MMI 결합기의 출력 방향을 스스로 조절할 수 있는 또 다른 방법은 MMI 결합기를 곡면형으로 제작하여 사용하면 된다. 본 논문에서는 원하는 방향으로 쉽게 광 신호를 출력하는 곡면형 MMI 결합기를 설계하기 위한 새로운 형태의 PC-MMIC(plasmonic curved multimode interference coupler)를 제안하였다. PC-MMIC에서 도파로의 곡률 반경, 도파로 폭과 같은 설계 변수를 조정하면 도파로 구조 설계의 자유도를 높일 뿐만 아니라, 소자 제조의 어려움을 감소시킬 수 있다. 또한, 광소자를 제작할 때 높은 집적도의 소자 제작이나, 나노 크기의 소형 소자를 제작하는데 빛의 회절특성으로 인하여 많은 문제가 발생한다. 이 문제를 해결하기 위하여 그림 1(b)에서 보듯이 유전체 결합 표면 플라즈마 도파로 (dielectric loaded surface plasmon: DLSP) 구조^[5]를 사용하여 PC-MMIC를 설계하였다.

본 논문은, 2장에 PC-MMIC를 제작하기 위한 설계원리와 모드특성을 자세하게 언급하였으며, 그 결합특성을 수치 해석적으로 입증하기 위한 유효 유전체 방법 (Effective Dielectric Method: EDM)^[6]을 기반으로 하는 종방향 모드 전송선로 해석법 (longitudinal modal transmission-line theory: L-MTLT)^[7]을 3장에 기술하였다. 또한, PC-MMIC의 결합특성에 기초한 PSR를 수치 해석적으로 분석하였다. 마지막으로, 4장에서 본 논문의 결론을 정리하였다.

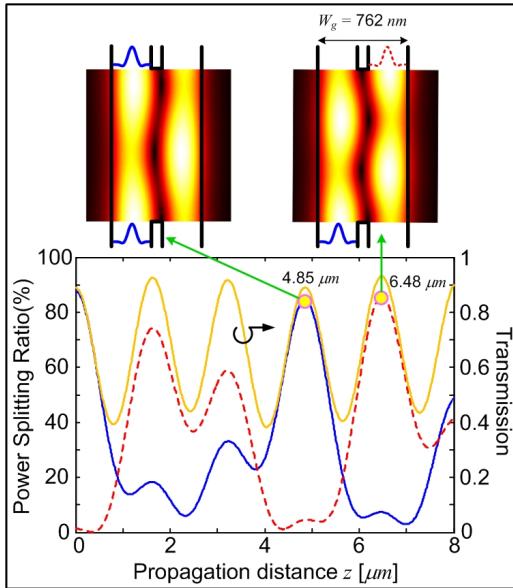


그림 3. Quasi-TE 모드에 대한 곡면형 MMI 결합기의 전송율과 전력분배율.
 Fig. 3. Transmission and power splitting ratio of curved MMI coupler for Quasi-TE mode.

II. PC-MMIC의 전송특성

평면형 MMIC에서 기본 모드는 도파로의 중심을 따라 전파하지만, 곡면형 MMIC에서는 중심으로부터 약간 벗어난 위치에서 전파한다. 그러므로 곡면형 MMIC의 전송 특성을 직관적으로 쉽게 분석하기 위하여 곡면형 도파로를 평면형 도파로의 형태로 변환하는 등각변환 해석법 (conformal transformation method: CTM) [8]의 적용이 필수적이다. 만일, $n(x,y)$ 가 rib-형 MMIC의 종방향 굴절률이고 (x,y) 가 종방향 좌표 (MMIC 내/외부 경계에서 $x = R_1, R_2$)를 나타낸다면, 그때 CTM을 적용한 평면과 곡면 좌표 사이에 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 곡면형 MMIC의 굴절률 분포는 아래와 같은 등가식에 의존하여 평면형 MMIC 처럼 동작한다.

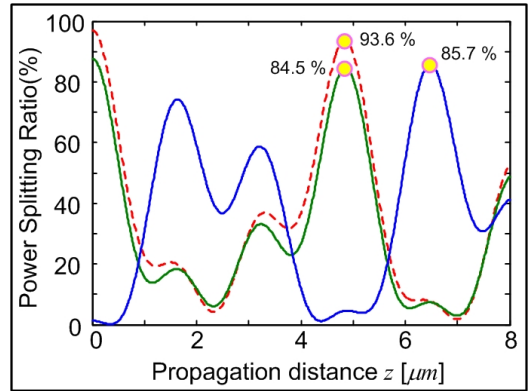


그림 4. 입력 도파로에 따른 Quasi-TE 모드에 대한 곡면형 MMI 결합기의 전력분배율.
 Fig. 4. Power splitting ratio of curved MMI coupler for Quasi-TE mode according to input waveguide.

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

이와 같은 CTM에 대한 자세한 내용이 그림 1(c), (d)에 도시되어 있다.

그림 1(d)에 주어진 등가 유효 굴절률 분포에 기초하여 본 논문에서 제안한 PC-MMIC의 최적 전송조건을 분석하였다. 설계된 PC-MMIC은 그림 1(b)에서 보듯이, 플라즈마 rib-형 구조는 두께 $t_s = 100 \text{ nm}$, $t_{dn} = 200 \text{ nm}$ 인 굴절률 $n_s = 3.455$ 의 Si, 두께 $t_f = 10 \text{ nm}$ 인 굴절률 $n_f = 1.445$ 의 SiO_2 , 두께 $t_{up} = 100 \text{ nm}$ 인 굴절률 $n_{up} = 0.1453 + 11.3587i$ 의 은 (Ag)으로 구성된 DLSP 도파로 형태의 구조로 설계하였다. 또한, 입/출력 채널의 폭은 200 nm 로 선택하였다. 그때 PC-MMIC에 존재하는 모드는 본질적으로 전파 방향에 따라 quasi-TE 모드와 quasi-TM 모드로 분류한다.

먼저, PC-MMIC의 최적 전송 특성을 정확하게 해석하기 위하여 PC-MMIC의 결합 영역에서 전파 가능한 quasi-TE/TM 모드의 수를 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 동작파장에서 수치해석 하였다. 그림 2에서 보듯이, PC-MMIC의 결합 영역의 전송폭 $W_g = R_2 \ln(R_2/R_1)$ 가 증가함에 따라 결합영역에서 전파하는 quasi-TE 모드의 수가 지속적으로 증가함을 보였다. 그러나 quasi-TM 모드의 경우 전송폭이 작은 일정 영역에서 전파하는 모두들이 존재하지 않는 현상이 발생하였다. 이는 CTM을 적용하여 유효 굴절률을 그림 1(d)와 같이 근사적으로 등가화시킴으로 발

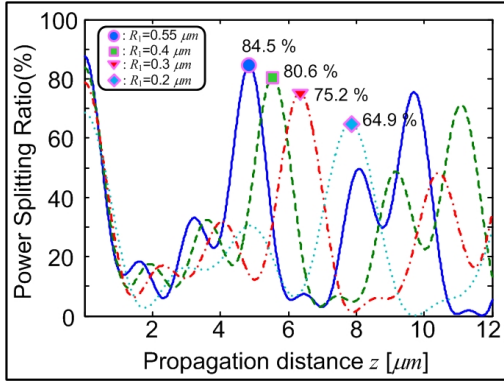


그림 5. 내부 반경 R_1 에 따른 Quasi-TE 모드에 대한 PC-MMIC의 전력분배율.

Fig. 5. Power splitting ratio of curved MMI coupler for Quasi-TE mode according to inner radius R_1 .

생하는 문제에 기인하는 것으로 보인다. 그러므로 본 논문에서 제안한 PC-MMIC의 설계특성은 오직 quasi-TE 모드에 대하여 분석하고 평가하였다.

또한, 그림에서 보듯이 내부 반경 R_1 의 증가에 따른 전파 모드들의 수는 거의 변화 없이 일정하였다. 즉, PC-MMIC의 결합영역에서 전파하는 모드의 수는 결합영역이 얼마나 휘어져 있는지에 민감하게 의존하지 않는다. 결국, 그림 2에 주어진 도해를 사용하여 PC-MMIC에서 전파하는 모드의 수를 선택할 수 있으며, 희망하는 방향에서 광 집적회로에 필요한 PSR를 갖는 결합기를 설계할 수 있다. 이에 대한 자세한 수치 해석적 분석을 다음 장에서 언급하였다.

III. PC-MMIC의 결합특성

그림 1(a)에서 보듯이 PC-MMIC를 통하여 전파하는 광 신호는 내부 반경 R_1 에 접해 있는 상향 채널을 통하여 입력되어 전송된다고 가정하였다. 또한, 2장에서 언급하였듯이 본 논문에서 제안한 PC-MMIC는 quasi-TM 모드에 대하여 정확한 수치 해석적 결과를 제공하지 못하기 때문에 본 장에서는 오직 quasi-TE 모드에 대한 결합특성과 PSR를 분석하였다.

L-MTLT의 원리를 적용하여 각 입/출력 단에서의 quasi-TE 모드에 대한 등가 관계식과 quasi-TE 모드의

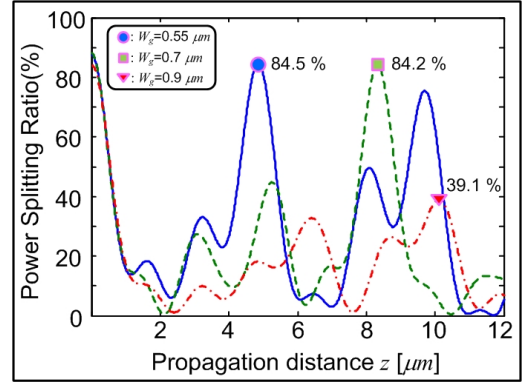


그림 6. 도파로 폭 W_g 에 따른 Quasi-TE 모드에 대한 PC-MMIC의 전력분배율.

Fig. 6. Power splitting ratio of curved MMI coupler for Quasi-TE mode according to guiding width W_g .

직교조건을 사용하면 다음과 같은 PC-MMIC의 결합효율 (coupling efficiency)을 정의할 수 있으며, 이는 입/출력 전력 사이의 비율을 나타낸다^[9].

$$\eta_{TE} = \left(\frac{\beta_{out}}{\beta_{in}} \right) \left| \sum_{m=1}^N T_{in,m} T_{m,out} e^{i\beta_m L_c} \right|^2 \quad (3)$$

여기서, β 는 각 영역에서의 전파상수를 나타내며, N 은 그림 2로부터 선택된 물리적 값들에 의하여 발생된 PC-MMIC 내에서 전송되는 모드들의 수를 의미한다. 또한, T, Q 는 입/출력 단에서 발생하는 입/출력 변환기의 변환상수 (transformation coefficient)이며 다음과 같이 주어진다.

$$T_{a,b} = \int_{cs} e_a(y) e_b^*(y) dy \quad (4)$$

식 (4)에서 $e_m(y)$ 는 결합영역 (coupling region)에서 m -번째 모드의 횡방향 필드분포를 각각 나타낸다.

먼저, 위에서 유도하고 정의한 식 (3)의 결합효율을 이용하여 PC-MMIC의 전송율 (transmission)과 PSR를 수치 해석하였다. 즉, 그림 1(a)에서 보듯이 200 nm의 전송폭을 갖는 상향 채널을 통하여 입력된 기본 모드가 PC-MMIC 내에서 임의의 결합길이 $z = L_{mmi}$ 를 진행한 후에 상/하향 채널을 통하여 출력되는 특성을 분석하였다. 이때 그림 2(a)로부터 quasi-TE 모드에 대한 전송폭 W_g 와 내부 반경 R_1 은 $N=3$ 개의 모드가 발생하여 상

호 간섭되도록 550 nm 로 동일하게 선택하였다.

그림 3에서 보듯이, 상향 채널을 통하여 입사한 광 신호는 결합길이 $L_{\text{mmi}} = 4.85\ \mu\text{m}$ 과 $6.48\ \mu\text{m}$ 에서 각각 상/하향 채널을 통하여 출력되었으며, PSR은 약 84.5%, 전송율은 약 90%로 나타났다. 여기서, 전송율은 $(P_1 + P_2)/P_0$ 로 정의되며, P_0, P_1, P_2 는 각각 입사전력, 상/하향 채널에서 출력되는 출력전력들을 나타낸다. 그러나 전형적인 평면형 MMIC에서 쉽게 설계 가능한, 상/하향 채널을 통하여 50%:50%의 비율로 출력되는 3dB 결합길이는 발생하지 않았다.

더욱이, 평면형 MMIC에서 발생할 수 없는 물리적 특성이 PC-MMIC에서 나타났다. 그림 4에서 보듯이, 입력 채널이 상향 또는 하향 채널인지에 의존하여 출력 채널에서 발생하는 PSR의 크기가 다르게 나타났다. 광 신호가 하향 채널을 통하여 입사된 경우에 PSR이 84.5%에서 93.6%로 약 10% 정도 효율이 좋아짐을 보였다. 이는 곡면형 전송구조에서 곡률 반경이 작은 부분 (R_1 근처)보다 큰 부분 (R_2 근처)에서 입사된 신호가 더욱 좋은 간섭 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

다음으로, 곡면형 소자의 물리적 특성을 자세하게 알아보기 위하여 내부 반경 R_1 이 변함에 따라 PC-MMIC에서 발생하는 PSR의 변화를 분석하였다. 그림 5에서 보듯이, 전송폭 $W_g = 0.55\ \mu\text{m}$ 인 경우 내부 반경 R_1 이 $0.55\ \mu\text{m}$ 로부터 $0.2\ \mu\text{m}$ 로 변함에 따라 (즉, 곡률 반경이 작아짐에 따라) PSR 효율이 84.5%에서 64.9%로 현저하게 떨어졌다. 이는 휘어지는 구조적 특성이 증가함으로 인하여 PC-MMIC 내에서 전파하는 모드들의 상호 간섭특성이 악화되고, 결국 전송되는 전력이 외부로 누설(leaky)되는 현상이 발생하기 때문이다.

마지막으로, PC-MMIC의 전송폭 W_g 가 증가함에 따라 PSR이 어떤 영향을 받는지 분석하였다. 그림 2(a)에서 보듯이, 전송폭 W_g 가 증가함에 따라 PC-MMIC 내에서 전파하는 모드의 수 N 이 증가하며 상호 간섭특성도 복잡하게 나타난다. 내부 반경 $R_1 = 0.55\ \mu\text{m}$ 인 경우 $W_g = 0.55\ \mu\text{m}, 0.7\ \mu\text{m}, 0.9\ \mu\text{m}$ 에서 각각 $N=3, 5, 7$ 개의 간섭 모드들이 발생함을 알 수 있다. 그림 6에서 보듯이, $N=3$ 인 경우 ($W_g = 0.55\ \mu\text{m}$ 인 경우)와 비교하였을 때 발생한 모드의 수가 $N=5$ 인 경우 PSR 효율의 변화는 약 0.3%의 약간 감소하였다. 그러나 $N=7$ 인 경우 PSR 효율은 84.5%에서 39.1%로 현저하게 감소하였

다. 또한, 발생하는 모드의 수가 증가함에 따라 결합길이도 $L_{\text{mmi}} = 4.85\ \mu\text{m}$ 에서 각각 $8.33\ \mu\text{m}, 10.1\ \mu\text{m}$ 로 증가하였다. 결국, 2장에서 언급하였듯이 본 논문에서 제안한 PC-MMIC도 평면형 MMIC와 같이 상호 간섭을 일으키는 모드의 수가 $N=3$ 인 경우에 가장 좋은 설계 특성을 나타내는 것으로 분석되었다.

IV. 결론

본 논문에서는 플라즈마 도파로에 기초한 곡면형 MMI 결합 구조를 사용하여 전력분배기를 설계하고 그 전송특성에 대하여 자세하게 수치해석 하였다. 설계된 PC-MMIC는 평면형 MMIC와 같이 높은 전송율(transmission)과 전력분배율(PSR)을 나타냈으며, 결합 길이도 수 μm 로 곡률 반경에 의존하여 휘어진 초소형 소자 제작이 가능함을 보였다.

제안한 PC-MMIC의 수치해석 결과, 휘어진 특성에 기인하여 입력 채널이 상/하향인 경우에 따라 출력에서 발생하는 PSR의 효율이 다르게 나타났으면, 내부 반경 R_1 이 작아짐에 따라 PSR의 효율이 현저하게 떨어지는 현상이 나타났다. 더욱이, PC-MMIC 내에서 전파하는 모드의 수가 $N=3$ 이상으로 증가함에 따라 PSR의 효율과 결합길이 모두 심하게 악화되는 특성을 보였다.

References

- [1] L.B. Soldano, E.C.M. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," J. of Lightwave Technology Vol. 13, pp. 615-627, 1995.
- [2] S. Suzuki, O. Kazuhiro, H. Yoshinori, "Integrated-optic doubling resonators with a wide free spectral range of 100 GHz," J. of Lightwave Technology, Vol. 13, pp. 1766-1771, 1995.
- [3] S. Jeong, S. Matsuo, Y. Yoshikuni, et al., "Flat-topped spectral response in a ladder-type interferometric filter," IEICE Transactions on Electronics, E88-C, pp. 1747-1754, 2005.

- [4] T. T. Le, L. W. Cahill, D. Elton, "The Design of 2×2 SOI MMI couplers with arbitrary power coupling ratios," *Electronics Letters*, Vol. 45, pp. 1118-1119, 2009.
- [5] R. Zia, J. A. Schuller, A. Chandran, M. L. Brongersma, "Plasmonics: the next chip-scale technology," *Mater. Today*, Vol. 9, pp. 20-27, 2006.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] M. Heiblum and J. H. Harris, "Analysis of curved waveguides by conformal transformation", *IEEE J. Quantum Electron.* Vol. QE-11, pp. 75 - 83, 1975.
- [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>

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.