

3층 구조를 가지는 광 집적회로용 2차 궤도 각운동량 광 도파로

이인준* · 김상인**

A Three-layered Optical Waveguide of Second-order Orbital Angular Momentum Mode Guiding for Photonic Integrated Circuit

In-Joon Lee* · Sang-In Kim**

요 약

본 논문에서는 기존의 $l=1$ 궤도 각운동량 모드에 대해서만 연구가 이루어지던 광 도파로 구조를 개선하여 반도체 박막 공정으로 제작이 가능하고, $l=1$ 및 $l=2$ 궤도 각운동량 모드를 전송할 수 있는 광 집적회로용 실리콘 광 도파로를 유한차분법을 통하여 설계하였다. 설계된 광 도파로는 여러 층의 실리콘과 실리콘 산화막으로 이루어져 있으며, 두 고유 모드의 합성을 통하여 궤도 각운동량을 가지는 모드를 구현한다. 제안된 광 도파로의 2차 궤도 각운동량 모드의 전기장 분포를 통한 궤도 각운동량 계산 결과, 궤도 각운동량 양자수가 1차 및 2차 각각 $l=0.9642, 1.8766$ 으로 이론치에 매우 근접한 값을 보였다.

ABSTRACT

In this paper, a specifically designed waveguide structure that can carry first- and second-order orbital angular momentum (OAM) mode is proposed. The proposed optical waveguide consists of three Si stripes embedded in SiO₂, which is suitable for implementing on-chip integration and fabrication by standard thin film deposition and etching processes. The second-order OAM mode was generated by combining two eigenmodes, which are calculated by finite difference method (FDM). The topological charge number of the first- and second-order OAM mode was calculated as $l=0.9642$ and 1.8766 respectively, which is close to the theoretical value.

키워드

Optical Vortices, Optical Waveguide, Orbital Angular Momentum, Photonic Integrated Circuit, Quantum Information
소용돌이 빛, 광 도파로, 궤도 각운동량, 광 집적 회로, 양자 정보

1. 서 론

빛이 궤도 각운동량(Orbital Angular Momentum: OAM)을 가질 수 있다는 연구결과가 알려진 뒤로, 빛

의 OAM을 기존의 광통신에 접목시키려는 연구들이 많이 진행되어 왔다[1-3]. 이러한 빛의 OAM 특성이 주목받는 큰 이유 중의 하나는, 광자 하나당 $\pm\hbar$ 의 두 가지 상태밖에 없는 스핀 각운동량(편광)과 달리

* 아주대학교 전자공학과 (heero516@ajou.ac.kr)

** 교신저자 : 아주대학교 전자공학과

• 접수일 : 2019. 06. 19

• 수정완료일 : 2019. 07. 17

• 게재확정일 : 2019. 08. 15

• Received : Jun. 19, 2019, Revised : Jul. 17, 2019, Accepted : Aug. 15, 2019

• Corresponding Author : Sang-In Kim

Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University,

Email : sangin@ajou.ac.kr

케도 각양자수(l)가 다른 무수히 많은 직교하는 상태를 가질 수 있는 특성 때문이다. 즉 OAM을 이용한 광 신호를 사용하면 제한된 밴드폭에서 데이터 전송 용량을 비약적으로 높일 수 있게 되는 것이다.

현재까지 OAM을 이용한 광통신에 관한 연구는 주로 광섬유, 또는 무선통신 분야에서 활발히 이루어졌는데, 그 이유는 OAM을 가지는 빛의 전파 모드인 Laguerre-Gaussian(: LG) 모드가 원통형 좌표계 기반의 광 진폭 프로파일과 관련된 해이기 때문이다. 반면, 광 집적회로 분야와 같이 카르테시안 좌표계 기반의 광 진폭 프로파일인 Hermite-Gaussian(: HG) 모드와 유사한 해를 가지는 사각형 모양의 광 도파로에서는 OAM을 가지는 모드를 다루기가 매우 어려워진다. 즉, 물질의 적층과 식각에 기반한 반도체 공정을 이용하여 제작 가능하고, 광 집적회로에 활용 가능한 광 도파로에서 OAM을 활용하는 연구에는 많은 기술적인 어려움이 있을 수밖에 없다.

현재까지 OAM을 이용한 광 도파로 형식의 연구들을 보면, HG와 유사한 도파로의 고차모드들을 서로 다른 위상차로 합쳐서 LG 모드를 만드는 LG 분해방식을 사용해왔다[4-5]. 다만 지금까지 이 방식을 사용한 연구들은 LG 모드를 만드는데 필요한 HG 모드들의 대칭성이 사라지는 2차 이상의 고차 OAM 모드들을 만들 수 없어, 오로지 1차 OAM 모드에만 집중해왔다.

본 논문에서는 이러한 기존의 1차 OAM에만 한정되어왔던 광 도파로 연구의 한계를 극복하고 OAM 모드가 가지는 장점을 광 집적회로에서 활용하는 방안으로서 1차 및 2차 OAM 모드를 전송할 수 있는 도파로 구조를 제안하고자 한다. 다음 장인 설계 및 분석에서 이전까지의 OAM 광 도파로 분석 및 2차 OAM 광 도파로 설계, 그리고 유한차분법 시뮬레이션 및 각운동량 플럭스(Angular Momentum Flux)를 통한 모드 순도 계산을 소개하였다. 본 논문에서 언급할 고차 OAM 모드 생성방법과 분석방법은 향후 관련 연구에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

II. 설계 및 분석

2.1 광 도파로에서의 OAM 모드 분석

가. 광 도파로에서의 1차 OAM 모드

지금까지 여러 그룹에서 연구되어온 광 도파로에서 OAM을 가지는 모드를 만드는 방법은 주로 위상차를 가지는 두 모드의 합성으로 이루어져 있었다. [6], [7]에서 수식적으로 증명한 바와 같이, $l + 1$ 개의 HG 모드들을 적절한 위상차와 세기로 합쳐주면, 케도 각 양자수 l 을 가지는 LG 모드를 만들어 낼 수 있다. 사각형 모양의 광 도파로에서는 원통형 모양의 광 진폭을 가지는 LG 모드를 여기 시키기가 매우 어려우나, HG모드의 전기장 분포가 기존 사각형 모양의 광 도파로에서의 TE, 혹은 TM 고차 모드와 유사하

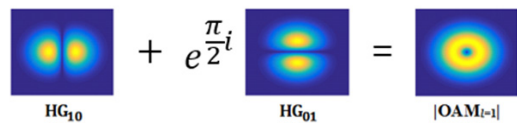


그림 1. HG₁₀, HG₀₁ 모드의 합성을 통한 1차 OAM 모드 생성

Fig. 1 Generation of OAM₌₁ by combining HG₁₀, and HG₀₁ mode

다는 점에 착안하여 그림 1과 같이 HG₁₀, HG₀₁과 유사한 전기장 분포를 가지는 두 모드의 합성으로 1차 OAM 모드를 만들어 낸 것이다.

이러한 방식의 OAM 모드 생성의 문제는, 1차 이상의 OAM 모드를 만들기 위해서는 3가지 이상의 고차 모드들을 적절한 위상차와 세기를 가지고 합쳐주어야 한다는 것이다. 또한, 이 각각의 모드들의 유효 굴절률이 서로 다를 경우, 생성된 OAM 모드는 도파로 내에서 OAM을 유지하지 못하고 진행과 함께 다시 원래의 모드들로 분리되게 된다. 이러한 어려움으로 인하여 아직까지 2차 이상의 고차 OAM 모드를 가지는 광 집적회로용 광 도파로는 연구가 제대로 이루어지지 못하고 있다.

나. 광 도파로에서의 2차 OAM 모드

본 연구에서는 광 도파로에서 2차 OAM 모드를 만드는 다른 방법으로서, 기존의 원통형 구조를 가지는 광섬유에서의 전기장 모드 분포를 참고하였다. [8]에 소개된 방법과 같이, 2π 의 주기를 가지는 코사인과 사인 형태의 모드를 $\pi/2$ 위상차로 합쳐 주는 방식으로 케도각 양자수 l 을 가지는 LP 모드를 가지는 모

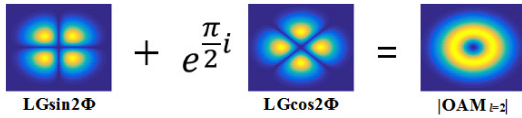


그림 2. 2차 OAM 모드 생성 개념도

Fig. 2 Conceptual diagram of $OAM_{l=2}$ mode generation

드를 만들어 줄 수 있는데, 이를 광 도파로에 응용하고자 하였다. 즉, 2차 OAM 모드를 만드는데 필요한 코사인 및 사인 형태의 광 진폭 프로파일을 만드는 모드를 가질 수 있는 광 도파로를 설계하여 3가지 HG 모드의 합성을 대신하여, 광섬유와 마찬가지로 2 가지 모드들의 합성으로 2차 OAM 모드를 만들고자 하였다. 그림 2는 이와 관련된 개념도이다.

2.2 1차 및 2차 OAM 모드를 가지는 광 도파로 설계

1차 및 2차 OAM 모드를 가지는 광 도파로 설계의 요구사항은 다음과 같이 정의할 수 있다. 우선 앞서 기술한 1차 OAM모드에서의 HG_{01} 및 HG_{10} 모드와 비슷한 광 진폭프로파일의 모드를 가지고 있어야 하며, 2차 OAM모드를 만들기 위한 코사인 및 사인 형태의 광 진폭 프로파일과 유사한 도파 모드도 있어야 한다. 또한, 각각의 OAM을 구성하는 두 도파 모드가 축퇴 모드, 즉 모드들의 유효굴절률이 거의 동일하여 도파로 진행 중에 다시 분리되지 않아야 한다.

기존의 사각형 모양의 광 도파로에서는 2차 이상의 고차 모드들을 구성하는 모드들에 대한 대칭성이 없기 때문에 1차 OAM모드를 구성하는 HG_{01} 및 HG_{10} 의 두 모드에 한해서만 유효굴절률을 같게 만들 수 있었다. 이러한 문제를 해결하고자 그림 3과 같이 Si와 SiO_2 를 번갈아가며 적층한 광 도파로 구조를 설계하였다.

설계한 광 도파로는 위, 아래의 작은 Si 층과 중앙의 긴 Si 층의 3부분으로 나뉜 코어를 가지고 있으며 코어 사이의 간격 G 와 각 코어층의 길이 L_1, L_2 , 각 코어층의 두께 D_1, D_2 를 조절함으로써 각 모드의 유효굴절률을 정밀하게 조절할 수 있도록 설계하였다. 본 연구에서는 일반적인 광통신 파장인 1550nm 파장의 TE로 편광된 신호로 OAM모드를 만들 수 있도록

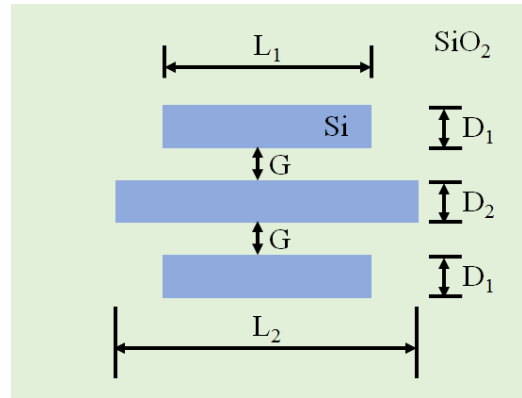


그림 3. 1, 2차 OAM 모드 전송을 위한 광 도파로 구조

Fig. 3 Waveguide structure for guiding $OAM_{l=1,2}$ mode

설계하였으며, HG_{01} 과 HG_{10} 모드, $LG_{sin2\Phi}$ 와 $LG_{cos2\Phi}$ 모양의 고유 모드들 각각 유효굴절률이 서로 거의 같은 값을 가지도록 각 수치를 설계하였다. 또한, 같은 기관에 1차 및 2차 OAM모드 광 도파로를 만들어 주기 위하여 G, D_1 , 및 D_2 는 각각 $G=35nm, D_1=0.27\mu m, D_2=0.28\mu m$ 으로 공통된 값을 가지며, L_1 과 L_2 는 1차 OAM 모드 광 도파로에서 $L_1=1.1096\mu m, L_2=1.1096\mu m$, 2차 OAM 모드 광 도파로에서 $L_1=1\mu m, L_2=1.28\mu m$ 으로 설계하였다.

2.3 유한차분법 시뮬레이션 및 모드 순도 계산

앞서 설계한 광 도파로에서 1, 2차 OAM 모드가 잘 생성됨을 확인하기 위하여 Lumerical 사의 mode solution 소프트웨어를 사용하여 유한차분법을 사용한 시뮬레이션을 수행하였다. Si의 굴절률은 3.4, SiO_2 의 굴절률은 1.45로 설정하였다. 그림 4와 그림 5에 각각 1차, 2차 OAM 모드를 만들기 위한 각각의 고유 모드들의 전기장 x성분의 절대값인 $|E_x|$ 분포와 각 모드의 x성분의 위상분포를 나타내었다.

각 모드의 필드 분포와 위상분포로 보아, 2차 OAM 모드를 만들기 위한 두 모드가 잘 생성되었다 판단할 수 있다. 또한 각 모드의 유효 굴절률은 1차 OAM 모드에서 2.883218, 2.883167, 2차 OAM 모드에서 2.564499과 2.564433으로 두 OAM을 구성하는 각각의 모드들에서 모드간의 유효굴절률 차가 1×10^{-4} 보다 낮아, 충분히 축퇴 상태에 있다고 할 수 있다. 그림 6에 두 모드를 위상차 $\pi/2$ 를 가지고 합친 최종 1

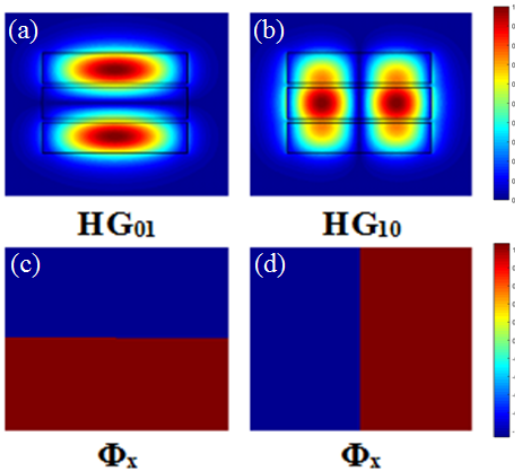


그림 4. 유한차분법으로 계산한 시뮬레이션 결과 (a) HG₀₁모드의 $|E_x|$ 분포 (b) HG₁₀ 모드의 $|E_x|$ 분포 (c) HG₀₁ 모드의 x성분 위상분포 (d) HG₁₀ 모드의 x성분 위상분포
 Fig. 4 FDM simulation results of $|E_x|$ distribution of (a) HG₀₁ mode (b) HG₁₀ mode; x-component phase distribution of (c) HG₀₁ mode (d) HG₁₀ mode

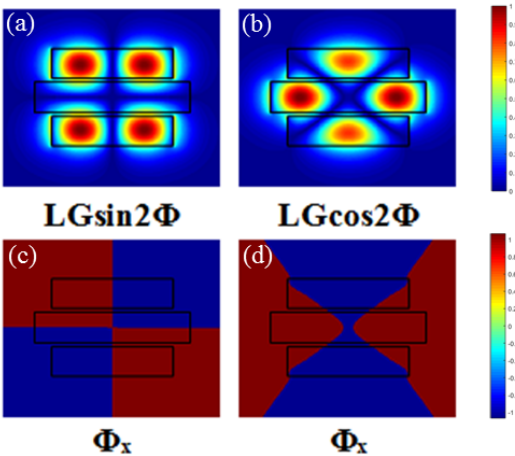


그림 5. 유한차분법으로 계산한 시뮬레이션 결과 (a) LGsin2 Φ 모드의 $|E_x|$ 분포 (b) LGcos2 Φ 모드의 $|E_x|$ 분포 (c) LGsin2 Φ 모드의 x성분 위상분포 (d) LGcos2 Φ 모드의 x성분 위상분포
 Fig. 5 FDM simulation results of $|E_x|$ distribution of (a) LGsin2 Φ mode (b) LGcos2 Φ mode; x-component phase distribution of (c) LGsin2 Φ mode (d) LGcos2 Φ mode

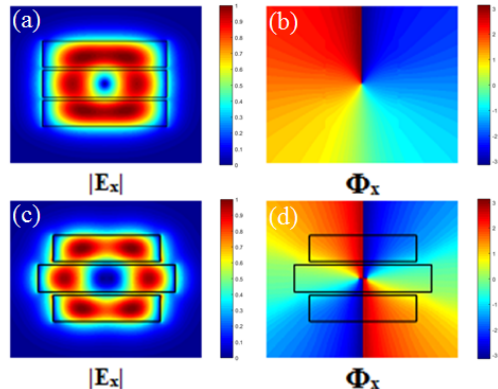


그림 6. 최종적으로 생성된 OAM 모드. 1차 OAM의 모드의 (a) $|E_x|$ 분포 (b) x성분 위상분포. 2차 OAM 모드의 (c) $|E_x|$ 분포 (d) x성분 위상분포
 Fig. 6 Generated OAM mode (a) $|E_x|$ distribution (b) x-component phase distribution of $l=1$ OAM mode; (c) $|E_x|$ distribution (d) x-component phase distribution of $l=2$ OAM mode

차 및 2차 OAM 모드의 필드 분포와 위상분포를 나타내었다.

그림 6의 (a) 및 (c)에서 볼 수 있는것과 같이, 최종적으로 합쳐진 OAM 모드들의 $|E_x|$ 필드 분포는, 광섬유에서의 모드와 매우 흡사한 원형 모양의 분포를 가지며, 광 도파로의 횡단면에서 본 x성분의 위상 분포인 그림 6의 (b)와 (d)를 통하여 1차 및 2차 OAM을 가지고 있다는 증거인 $e^{(i\phi)}$ 와 $e^{(i2\phi)}$ 형태의 방위각 위상분포를 각각 확인할 수 있다.

마지막으로, 설계한 광 도파로의 OAM 모드의 순도를 정량적으로 평가하기 위하여 LP 모드와의 중첩적분(Overlap Integral)을 수행함과 함께 광 웨도각 양자수 l 을 모드의 필드 분포를 통하여 직접 계산하였다. 계산은 일반적으로 주로 사용되는 중첩적분식 [9-10]인

$$OI = \frac{\left| \iint E_1^*(x,y) \cdot E_2(x,y) dx dy \right|^2}{\iint |E_1(x,y)|^2 dx dy \iint |E_2(x,y)|^2 dx dy} \quad (1)$$

과 함께 [11]에 소개되어 있는 방식인 직접 필드를 외적하여 전체 각운동량 플럭스,

$$M_{zz} = \iint \frac{1}{2} Re [y(\epsilon_0 E_x E_z^* + \mu_0^{-1} B_x^* B_z) - x(\epsilon_0 E_y E_z^* + \mu_0^{-1} B_y^* B_z)] dx dy \quad (2)$$

와 스핀 각운동량 플럭스(Spin Angular Momentum Flux),

$$M_{zz}^{spin} = \frac{\epsilon_0 c^2}{2\omega} \text{Re} \left[-i \iint (E_x B_x^* + E_y B_y^*) dx dy \right] \quad (3)$$

에너지 플럭스(Energy Flux)

$$F = \frac{1}{2\mu_0} \text{Re} \left[\iint (E_x B_y^* - E_y B_x^*) dx dy \right] \quad (4)$$

를 구한 뒤 최종적으로 수식(5)를 통하여 각 양자수를 추출하였다.

$$l = \omega \times OAM = \omega \frac{M_{zz} - M_{zz}^{spin}}{F} \quad (5)$$

그림 7에 LP 모드의 빔 웨이스트에 따른 1차 및 2차 OAM 모드의 중첩적분 값을 나타내었다. 1차 OAM 모드의 경우, 빔 웨이스트 0.38 μm 인 LP모드와의 중첩적분 값이 96.52%, 2차 OAM 모드의 경우에는 0.34 μm 의 빔 웨이스트를 가지는 LP모드와 94.05%의 중첩적분 값을 보였다. 광 케도각 양자수 l 또한 1차 OAM 모드는 0.9642, 2차 OAM 모드는 1.8766로 목표

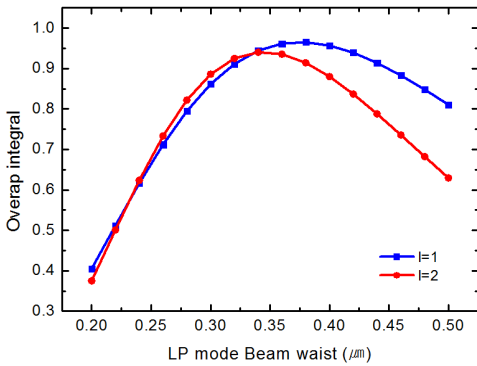


그림 7. LP 모드의 빔 웨이스트에 따른 OAM 모드와의 중첩적분

Fig. 7 Overlap integrals between LP mode and OAM mode at different beam waists

하였던 정수값인 1과 2에 매우 근접한 결과를 얻을 수 있었다.

III. 결론

본 논문에서는 1차 및 2차 OAM 모드를 전송할 수

있는 광 집적회로용 광 도파로를 설계하고 그 성능을 평가하였다.

그동안 원통형 구조를 제외하고는 없었던 1차 이외의 고차 모드를 전송할 수 있는 광 도파로를 제안함으로써 기존의 반도체 공정을 통한 OAM 모드 광 도파로의 제작을 용이하게 하였고, 1차 및 2차 OAM 모드의 광 집적회로 적용가능성을 제시하였다. 본 논문에서는 1, 2차 OAM 모드에 대해서만 다루었으나 3차 이상의 고차 OAM 모드도 설계 여하에 따라 집적회로용 광 도파로에서 충분히 가능할 것으로 보인다.

또한 기존에 많이 사용되던 중첩적분 이외에도 광 케도각 양자수 l 을 직접 계산하는 방식을 도입함으로써 OAM 모드의 순도를 더 정밀하게 평가할 수 있었다. 이러한 양자수의 직접적인 계산은, 여러 양자수를 중첩하여 사용하는 양자통신 및 양자집적회로[12-13] 등과 관련된 분야에서 유용하게 쓰일 것으로 기대된다.

감사의 글

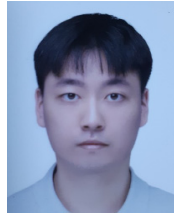
이 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음.

References

- [1] Z. Zhang, J. Gan, X. Heng, M. Li, J. Li, S. Xu, and Z. Yang, "Low-crosstalk orbital angular momentum fiber coupler design," *Optics express*, vol. 25, 2017, pp. 11200-11209.
- [2] N. Bozinovic, "Orbital angular momentum in optical fibers," Doctoral dissertation, *Boston University*, 2013.
- [3] X. Cai, J. Wang, M. J. Strain, B. Johnson-Morris, J. Zhu, M. Sorel, J. L. O'Brien, M. G. Thompson, and S. Yu, "Integrated compact optical vortex beam emitters," *Science*, vol. 338, 2012, pp. 363-366.
- [4] S. Zheng and J. Wang, "On-chip orbital angular momentum modes generator and (de) multiplexer based on trench silicon waveguides," *Optics express*, vol. 25, 2017, pp. 18492-18501.

- [5] D. Zhang, X. Feng, K. Cui, F. Liu, and Y. Huang, "Generating in-plane optical orbital angular momentum beams with silicon waveguides," *IEEE Photonics J*, vol. 5, 2013, pp. 2201206-2201206.
- [6] E. Abramochkin and V. Volostnikov, "Beam transformations and nontransformed beams," *Opt. Communications*, vol. 83, 1991, pp. 123-135.
- [7] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. Spreeuw, and J. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes," *Physical Review A*, vol. 45, 1992, pp. 8185-8190.
- [8] X. Zeng, Y. Li, L. Feng, S. Wu, C. Yang, W. Li, W. Tong, and J. Wu, "All-fiber orbital angular momentum mode multiplexer based on a mode-selective photonic lantern and a mode polarization controller," *Opt. Letter*, vol. 43, 2018, pp. 4779-4782.
- [9] A. Liu, C. Zou, X. Ren, Q. Wang, and G. Guo, "On-chip generation and control of the vortex beam," *Appl. Phys. Letter*, vol. 108, 2016, pp. 181103.
- [10] Y. Jiang, G. Ren, H. Li, M. Tang, Y. Liu, Y. Wu, W. Jian, and S. Jian, "Linearly polarized orbital angular momentum mode purity measurement in optical fibers," *Appl. Opt*, vol. 56, 2017, pp. 1990-1995.
- [11] S. M. Barnett, "Optical angular-momentum flux," *J. of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, vol. 4, 2001, pp. S7-S16.
- [12] D. Y. Park, "A Study on the Information Reversibility of Quantum Logic Circuits," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 1, 2017, pp. 189-194.
- [13] D. Y. Park, "Function Embedding and Projective Measurement of Quantum Gate by Probability Amplitude Switch," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 6, 2017, pp. 1027-1034.

저자 소개



이인준(In-Joon Lee)

2013년 아주대학교 전자공학과 졸업(공학사)

2015년 아주대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2015년 ~ 현재 아주대학교 대학원 전자공학과 박사과정

※ 관심분야 : 광통신시스템, 양자통신



김상인(Sang-In Kim)

1992년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(공학사)

1997년 Minnesota 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1997년 ~ 2003년 KT연구개발본부 선임연구원

2003년 ~ 현재 아주대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 광통신/광소자, 나노포토닉스, 양자정보