Regular paper | Journal of the KIECS. pp. 659-664, vol. 15, no. 4, Aug. 31. 2020, t. 102, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2020.15.4.659

광 집적회로용 실리콘 기반 궤도 각운동량 부호 변환기

이인준* · 김상인**

Silicon Electro-optic Orbital Angular Momentum Sign Modulator for Photonic Integrated Circuit

In-Joon Lee* · Sang-In Kim**

요 약

본 논문에서는 실리콘 기반의 광 집적회로에서 외부 전압 조절을 통해 |l|=1 궤도 각운동량 모드의 궤도 각양자수를 변조할 수 있는 전기 광학 변조기를 설계하였다. 설계된 전기 광학 변조기는 위치별로 서로 다른 도핑농도를 가지는 실리콘 코어와 실리콘 산화막으로 구성되어 있으며, 도핑농도의 분포를 통해 궤도 각운동량 모드를 구성하는 두 고유 모드의 전파 손실과 유효굴절률 변화량을 조절할 수 있도록 설계되었다. 변조기는 역전압을 기준으로 -0.33V에서는 궤도 각운동량 모드의 부호가 유지되는 광도파로로, 10V에서는 궤도 각양자수 부호 변환기로서 동작한다. 고유 모드 확장법으로 계산한 신호변조 후의 전기장 분포를 통해 얻은 궤도 각양자수는 두 동작모드에서 모두 |l|>0.92 으로 매우 높은 궤도 각운동량 모드 순도를 보였다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a silicon-based electro-optic (EO) modulator which can modulate a sign of a topological charge number l of |l|=1 orbital angular momentum (OAM) mode. The proposed EO modulator consists of position-dependent doped Si waveguide core and undoped SiO2, cladding, which enables control of the effective index and propagation loss of two OAM constitutive eigenmodes. The modulator functions as OAM mode maintaining waveguide at -0.33V and as topological charge sign inverter at 10V. The output OAM mode purity is calculated through electric field distribution, showing high purity of |l|>0.92 in both cases.

키워드

Orbital angular momentum, Photonic integrated circuit, Waveguides, Electro-optic modulator, Quantum information
궤도 각운동량, 광 집적회로, 광 도파로, 전기 광학 변조기, 양자 정보

* 아주대학교 전자공학과 (heero516@ajou.ac.kr)
** 교신저자 : 아주대학교 전자공학과
· 접 수 일 : 2020. 06. 25
· 수정완료일 : 2020. 07. 20
· 게재확정일 : 2020. 08. 15
· Received : Jun. 25, 2020, Revised : Jul. 20, 2020, Accepted : Aug. 15, 2020
· Corresponding Author : Sang-In Kim
Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University,
Email : sangin@ajou.ac.kr

Ⅰ. 서 론

최근 점점 늘어나는 통신 대역폭 요구량을 충족시키기 위하여 많은 새로운 정보 전달 방법들이 연구되고 있다. 그 중에서도 광 신호의 궤도 각운동량(Oribital angular momentum: OAM)은 무수히 많은 직교하는 상태를 가질 수 있는 궤도 각양자수(l)의 특성 때문에 여러 독립된 고유모드가 필요한 양자 통신을 포함한 많은 분야에서 주목을 받고 있다[1-3].

OAM을 가지는 빛의 전파 모드는, 신호의 진행방향의 횡단면의 위상이 $e^{-il\phi}$꼴로 나타나는 것이 특징으로서, 궤도 각양자수 l 로 각각의 모드를 구분할 수 있다. 이는 주로 원통형 좌표계 기반의 광 진폭 프로파일의 해인 Laguerre_Gaussian(: LG) 모드에서 볼 수 있어, 여태까지 OAM을 이용한 광통신 연구는 광섬유 및 무선통신 분야에서만 활발히 이루어져 왔었다. 하지만 최근에는 카르테시안 좌표계 기반의 광 진폭 프로파일인 Hermite-Gaussian(: HG) 모드를 특성 위상차로 합성하여 OAM모드를 만들어줄 수 있다는 연구결과를 토대로[4-5] Si 기반의 OAM generator[6-7], detector[8], waveguide[9], multiplexer & demultiplexer[10] 등의 집적회로기반 OAM 광소자들의 연구가 많이 이루어지고 있다. 하지만 OAM을 활용한 통신의 실용화까지는 아직 많은 과제들이 남아있으며 한번 생성된 OAM 신호의 부호를 변환할 수 있는 장치의 연구 또한 그 중 하나이다.

진행방향의 횡단면의 위상이라는 기존의 신호들과 달리 외부에서 접근하기 힘든 정보저장 방식을 가지고 있다 보니, OAM 신호의 부호 변환기에 관한 연구는 다른 OAM 광소자들에 비하여 그 성과가 더딘 편이다. 현재까지 유일하게 보고된 연구 사례는 Si을 대신하여 큰 전기 광학 상수를 가지는 니오브산리튬(Lithium Niobate: LN)을 사용한 소자밖에 없으며[11], 변조에 필요한 소자의 길이가 39㎜로 매우 길고 파장 또한 850㎚에서 동작하는 등 Si 기반의 집적회로에는 적합하지 않은 부분들이 있다.

본 논문에서는 이러한 기존의 소자의 단점을 보완하고, 집적형 광소자에 널리 쓰이는 도핑된 Si 광도파로를 기반으로, 집적화에 더욱 적합한 OAM 모드 부호 변환기를 설계하고자 한다.

Ⅱ. 설계 및 분석

2.1 OAM 모드 변조를 위한 도핑 설계

광 도파로에서 OAM을 가지는 모드를 만드는 방법에는 주로 위상차를 가지는 두 모드의 합성이 사용되며, 그 중 궤도 각양자수 $|l|$=1을 가지는 1차 OAM 모드는 HG_{01}, HG_{10} 과 유사한 전기장 분포를 가지는 두 모드의 합성으로 LG_{10}모드를 만드는 식으로 이루어진다[5-6]. 기존의 일반적인 전기 광학 변조기처럼 광도파로 코어 전체에 도핑을 하고 외부 전압으로 결핍층의 크기를 조절하는 방식으로는 OAM 모드를 변조하기 어려운 이유가 이것인데, OAM 모드를 구성하는 두 모드의 유효 굴절률이 비슷하게 변하기 때문에 결과적으로 두 모드간의 위상차는 변하지 않기 때문이다.

이러한 기존 방식의 문제점을 개선하기 위해 그림 1과 같이 변환기의 광도파로 코어층의 도핑농도를 p와 p^+, n과 n^+ 로 각각 두 구간으로 나누어서 설계하였다. 설계된 광도파로는 LN을 사용한 소자보다 집적

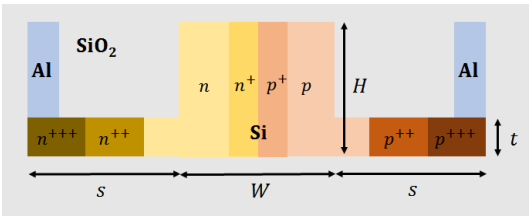

그림 1. OAM 모드 변환기의 구조
Fig. 1 Designed structure of OAM mode modulator

도와 공정측면에서 용이한 Si 코어와 SiO_2 클래드로 구성되어 있으며, 코어층의 높이 H=1.123㎛, 너비 W=1.25㎛를 가진다. 코어의 양 옆에는 전압을 인가시켜주기 위해 고농도로 도핑된 Si층 및 Al전극이 존재하며, 코어의 도파 모드에 주는 영향을 최소화하기 위해 코어로부터의 거리는 2.375㎛, 두께는 90㎚로 설계하였다. 도핑농도의 경우, 중앙의 p^+와 n^+구간은 각각 100㎚씩이며 $5\times10^{17}(cm^{-3})$의 도핑농도를 가지며 n 타입과 p타입 Si의 유효굴절율 및 전파 손실 차이를 최소화하기 위해 n, p 구간은 너비는 900㎚로 같으나, 도핑 농도는 각각 $3\times10^{17}(cm^{-3})$, $1\times10^{17}(cm^{-3})$로 서로 다르게 설계하였다. 고농도로 도핑된 Si층들인 p^{++}, n^{++}, p^{+++}, n^{+++}층은 각각 1㎛너비를 가지며 p^{++}, n^{++}층

은 $1\times10^{19}(cm^{-3})$, p^{+++}, n^{+++}층은 $1\times10^{20}(cm^{-3})$의 도핑농도를 가진다.

설계된 구조가 OAM모드를 변조하는 원리는 다음과 같다. 코어 중심부의 비교적 높은 도핑농도인 p^{+}와 n^{+}영역은, 역전압으로 인하여 생기는 결핍층을 중심부에 한정시키는 역할을 해준다. 1차 OAM 모드를 구성하는 HG_{01}, HG_{10}모드는 각각 코어의 중앙과 양 옆에 몰린 전기장 분포를 가지므로, 중앙부분에만 생기는 결핍층은 HG_{01}모드의 유효굴절은 크게 변화시키고 HG_{10}모드의 유효굴절률에는 큰 영향을 주지 않는다. 이를 이용하여 OAM을 구성하는 두 모드가 변환기를 통과하게 될 시 추가적인 위상차를 가지게 함으로서 궤도 각양자수 l 의 부호를 바꾸어줄 수 있다.

2.2 전하 분포 시뮬레이션 및 OAM 모드의 확인

OAM 변환기가 가져야 할 특성은 다음과 같다. 먼저 특정 전압에서는 원래 들어오는 신호를 그대로 내보내기위해 HG_{01}, HG_{10}모드의 유효굴절률이 같아야 한다. 다음으로는 마찬가지로 특정 전압에서 HG_{01}, HG_{10}모드의 유효굴절률 차이가 크게 벌어지게 되어, 일정 길이를 통과하였을 때 두 모드에 π만큼의 위상차를 추가할 수 있어야 한다. 마지막으로 두 모드의 전파손실차로 인하여 출력되는 신호가 영향을 받지 않도록 해야 한다. 2.1에서 설명한 코어의 n, p 구간 도핑농도의 분포가 서로 다른 이유가 이것 때문인데, 잘 알려진 모델링인 [12]에 따르면 같은 도핑농도를 기준으로 Si에서 p 도핑에 의한 굴절률 변화와 손실 변화가 n 도핑에 의한 변화량보다 작기 때문이다. 가운데를 기준으로 코어 양측의 굴절률변화와 전파손실 변화를 비슷하게 유지 시켜주기 위하여 이러한 도핑농도의 조절이 필요하다.

설계된 구조의 전압에 따른 유효굴절률 변화를 확인하기 위해 유한요소법(Finite element method: FEM) 기반의 전하 분포 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 그림 2의 (a)에 인가된 전압에 따른 전하 분포변화로 생기는 1550㎚ 파장에서 HG_{01}, HG_{10}모드간의 유효굴절률 차이를 나타내었다. 역전압을 기준으로 0V에서 1.4×10^{-5}의 유효굴절률 차이를 보였으며 각각 -0.33V에서 1×10^{-6}, 10V에서 1.5×10^{-4}로 유효굴절률 차이가 변화함을 볼 수 있다.

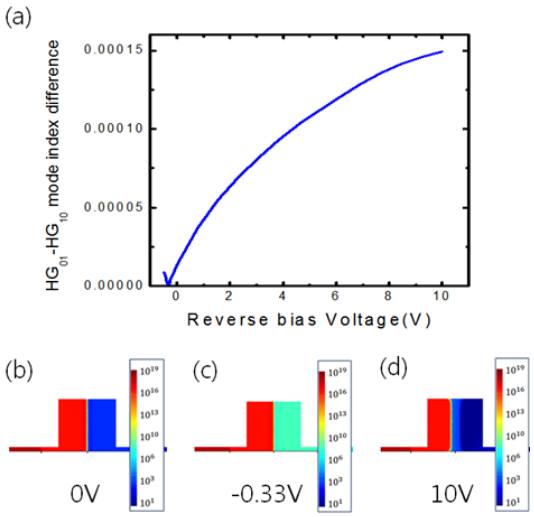

그림 2. 유한요소법 기반 전하 분포 시뮬레이션 (a) 인가전압에 따른 HG01 모드와 HG10 모드 간 유효굴절률 차이. 각 인가 전압에서의 전자 밀도 (b) 0V (c) -0.33V (d) 10V

Fig. 2 FEM charge distribution simulation (a) mode index difference between HG01 mode and HG10 mode with the applied voltage. charge density profiles at different voltage (b) 0V (c) -0.33V (d) 10V

각각의 전압에서의 전하 분포는 전자 밀도를 기준으로 그림 2의 (b), (c), (d)에 나타내었다.

전하 분포 시뮬레이션을 통하여 얻은 HG_{01}, HG_{10} 모드간의 유효굴절률 차이로 보아, -0.33V에서는 변환기 길이에 상관없이 들어온 신호를 그대로 내보내고, 다른 인가전압에서는 변환기 길이와 유효굴절률 차이에 따른 위상차를 HG_{01}, HG_{10}모드에 추가할 것이므로 이를 통하여 변환기의 동작 전압과 길이를 조절할 수 있다.

또한 전하 분포 시뮬레이션과 더불어, 각 전압에서 OAM모드가 잘 생성됨을 확인하기 위하여 유한차분법 (Finite difference eigenmode: FDE)을 사용한 시뮬레이션을 수행하고, [13]의 계산방법을 참고하여 광 궤도각 양자수를 추출하였다. 각각 그림 3에 -0.33V, 그림 4에 10V에서 각 모드의 |Ex| 분포를 (a), (b)에 나타내었고, π/2 위상차로 합성하여 만들어준 OAM 모드의 전기장 세기 (c) 및 x 성분 위상분포(d)를 나타내었다. 두 인가전압 모두에서 HG_{01} 모드 및 HG_{10}

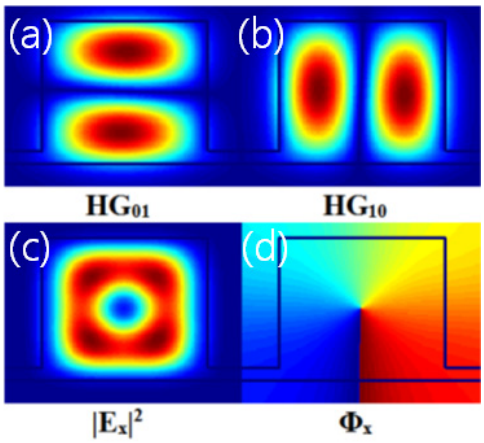

그림 3. -0.33V전압에서의 유한차분법 시뮬레이션 (a) HG01 모드의 |Ex| 분포 (b) HG10 모드의 |Ex| 분포 (c) 합성된 OAM 모드의 $|Ex|^2$ 분포 (d) OAM 모드의 x성분 위상분포

Fig. 3 FDM simulation results at -0.33V applied voltage. |Ex| distribution of (a) HG01 mode (b) HG10 mode. Generated OAM mode (a) $|Ex|^2$ distribution (b) x-component phase distribution

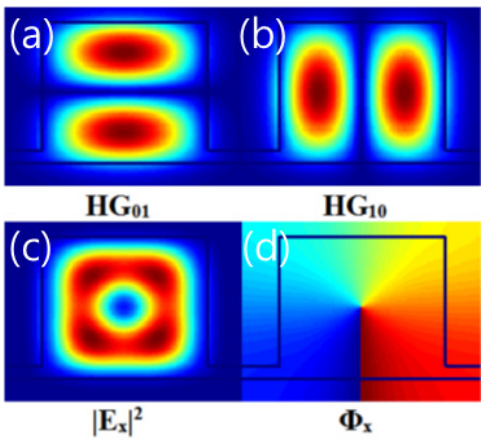

그림 4. 10V전압에서의 유한차분법 시뮬레이션 (a) HG01 모드의 |Ex| 분포 (b) HG10 모드의 |Ex| 분포 (c) 합성된 OAM 모드의 $|Ex|^2$ 분포 (d) OAM 모드의 x성분 위상분포

Fig. 4 FDM simulation results at 10V applied voltage. |Ex| distribution of (a) HG01 mode (b) HG10 mode. Generated OAM mode (a) $|Ex|^2$ distribution (b) x-component phase distribution

모드가 잘 생성되고, 광 궤도 각양자수의 계산결과 -0.33V에서 l=-0.9327, 10V에서 l=-0.9323으로 0.9 이상의 매우 높은 모드 순도를 보임을 확인하였다.

2.3. OAM 변환기 설계 및 검증

앞서 설계한 도핑 분포 및 모드 계산을 바탕으로 하여 OAM 모드 변환기를 설계하였다. HG_{01}, HG_{10}모드간의 유효굴절률 차이가 클수록 회로에서 변환기가 차지하는 길이가 줄어들게 되므로 변환기는 -0.33V와 10V에서 동작하게 설계하였다. 10V에서 동작 시 궤도 각양자수 l의 부호를 뒤바꾸는 역할을 수행하도록 설계해야하므로, 수식 (1)을 통하여 π만큼의 위상차가 생기는 변환기의 길이 L을 계산하였다.

$$L = \frac{\pi\lambda}{2\pi(n_{HG_{01}} - n_{HG_{10}})} = \frac{\lambda}{2(n_{HG_{01}} - n_{HG_{10}})} \quad (1)$$

계산결과 1550㎚파장에서 대략 5.2㎜정도의 변조구간이 필요함을 알 수 있다. 이는 이전 보고된 사례인 LN을 사용한 850㎚파장 변환기보다 7배 이상 짧은 길이로서, 회로의 집적화와 광통신 파장을 사용한 소자 개발에 많은 도움이 될 것이라 생각된다.

그림 5의 (a)에 설계된 OAM 변환기의 검증을 위한 시뮬레이션 개략도를 나타내었다. 변환기의 길이가 파장과 비교하여 매우 길기 때문에 고유모드 확장(Eigenmode expansion: EME)기법을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 변환기의 입력으로 궤도 각양자수 l=-0.9327을 가지는 OAM 신호를 넣어주고 변환기 길이 L=5.2㎜에서 -0.33V와 10V 전압을 인가하였을 때 나오는 변환기 출력 신호와 위상을 각각 확인하고

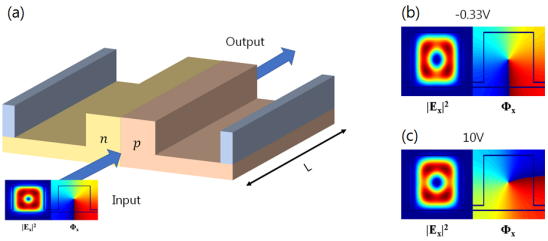

그림 5. (a) OAM 변환기의 시뮬레이션 개략도 (b) -0.33V에서의 출력 신호와 위상분포 (c) 10V에서의 출력 신호와 위상분포

Fig. 5 (a) Schematic diagram of OAM modulator simulation (b) output signal and x-component phase distribution at -0.33V voltage (c) output signal and x-component phase distribution at 10V voltage

결과를 그림 5의 (b), (c)에 각각 나타내었다. 설계한 바와 같이, -0.33V에서는 입력신호의 위상이 그대로 유지되고 10V에서는 방위각에 따른 위상의 증감

이 뒤바뀐 것을 확인할 수 있다.

각각의 신호는 변환기를 통과하면서 모드 유효굴절률 변조를 위하여 가해준 도핑에 의해 전파손실을 겪게 된다. 입력 신호세기 대비 출력 신호세기를 계산한 결과, -0.33V와 10V의 두 동작모드에서 각각 -3.59dB와 -2.35dB만큼의 손실을 겪는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 Si기반 전기 광학 변환기들과 비슷한 값으로[14-15], 변환기 동작에는 큰 무리가 없을 것으로 보인다.

앞서 계산과 마찬가지로 각 동작모드의 출력 신호 전기장 분포로부터 궤도 각양자수 l을 추출하였다. 계산결과 -0.33V에서는 l=-0.9289, 10V에서는 l=0.9315로, 10V에서 궤도 각양자수 l의 부호가 뒤바뀌는 것을 계산상으로도 확인할 수 있었다. 또한 입력신호의 궤도 각양자수 l=-0.9327와 절대값 차이가 거의 없는 것으로 보아 OAM신호의 정보가 왜곡 없이 잘 유지되고 있다고 판단할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 궤도 각양자수 $|l|$=1을 가지는 1차 OAM 모드의 궤도 각양자수를 변조할 수 있는 OAM 모드 변환기를 설계하였고 이를 검증하였다. 도파로 코어의 도핑농도 조절을 통하여 전압에 따른 모드간 유효굴절률 변화를 서로 다르게 해줌으로서 기존에는 실현이 어려웠던 모드간의 위상차를 줄 수 있었고, 기존의 보고된 변환기와 비교하여 7배 이상 짧은 길이로 궤도 각양자수를 바꾸어 줄 수 있었다. 변조된 신호의 모드 순도 또한 신호 변조시와 미변조시 둘 다 $|l|$>0.92 으로 기존 신호를 거의 훼손하지 않음을 볼 수 있었다.

다른 OAM 관련 광소자들의 연구가 많이 진행되었던 것에 비하여 변환기의 경우 그 사례가 많이 없으며 특히 Si 기반의 1550nm 파장에서 동작하는 변환기라는 점에서 본 연구는 광 집적회로 분야에서 특히 많은 응용이 가능할 것이라 생각된다.

감사의 글

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

References

[1] M. Mirhosseini, O. S. Magana-Loaiza, M. N. O'Sullivan, B. Rodenburg, M. Malik, M. P. Lavery, M. J. Padgett, D. J. Gauthier, and R. W. Boyd, "High-dimensional quantum cryptography with twisted light," *New J. of Physics*, vol. 17, no. 3, 2015, p. 033033.

[2] A. E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, and Z. Zhao, "Optical communications using orbital angular momentum beams," Advances in *Optics and Photonics*, vol. 7, no. 1, 2015, pp. 66-106.

[3] 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.

[4] M. W. Beijersbergen, L. Allen, H. Van der Veen, and J. Woerdman, "Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum," *Opt. Commun.,* vol. 96, no. 1-3, 1993, pp. 123-132.

[5] I. Kimel and L. R. Elias, "Relations between hermite and laguerre gaussian modes," IEEE *J. Quant. Electron.,* vol. 29, no. 9, 1993, pp. 2562-2567.

[6] 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, no. 2, 2013, pp. 2201206-2201206.

[7] W. Liu, X. Hu, L. Jin, X. Fu, and Q. Chen, "Generation of in-plane light beam with orbital angular momentum with an

asymmetrical plasmonic waveguide," *Plasmonics,* vol. 11, no. 5, 2016, pp. 1323-1329.

[8] G. Rui, B. Gu, Y. Cui, and Q. Zhan, "Detection of orbital angular momentum using a photonic integrated circuit," *Scientific reports,* vol. 6, no. 1, 2016, p. 28262.

[9] I. J. Lee and S. Kim, "On-Chip Guiding of Higher-Order Orbital Angular Momentum Modes," *Photonics*, vol. 6, no. 2 Multidisciplinary Digital Publishing Institute 2019, p. 72.

[10] S. Zheng and J. Wang, "On-chip orbital angular momentum modes generator and (de) multiplexer based on trench silicon waveguides," *Optics express,* vol. 25, no. 15, 2017, pp. 18492-18501.

[11] S. F. Mousavi, R. Nouroozi, G. Vallone, and P. Villoresi, "Integrated optical modulator manipulating the polarization and rotation handedness of Orbital Angular Momentum states," *Scientific reports,* vol. 7, no. 1, 2017, p. 3835.

[12] M. Nedeljkovic, R. Soref, and G. Z. Mashanovich, "Free-Carrier Electrorefraction and Electroabsorption Modulation Predictions for Silicon Over the 1-14-㎛ Infrared Wavelength Range," *IEEE Photonics J.,* vol. 3, no. 6, 2011, pp. 1171-1180.

[13] I. Lee and S. Kim, "A Three-layered Optical Waveguide of Second-order Orbital Angular Momentum Mode Guiding for Photonic Integrated Circuit," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 4, 2019, pp. 645-650.

[14] K. Ogawa, K. Goi, A. Oka, Y. Mashiko, T. Liow, X. Tu, G. Lo, D. Kwong, S. T. Lim, and M. J. Sun, "Design and characterisation of high-speed monolithic silicon modulators for digital coherent communication," in *Silicon Photonics X*, vol. 9367, 2015, p. 93670C.

[15] A. Abraham, T. Anfray, O. Dubray, D. Fowler, S. Olivier, D. Marris-Morini, and B. Charbonnier, "Optimization of Silicon MZM Fabrication Parameters for High Speed Short Reach Interconnects at 1310 nm," *Applied Sciences,* vol. 6, no. 12, 2016, p. 395.

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(In-Sang 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