

LNOI 포토닉스의 기술 동향

LNOI Photonics Technology Trends

박재규 (J. Park, findsome@etri.re.kr)

한상필 (S.-P. Han, sphan@etri.re.kr)

김성일 (S. Kim, silkim@etri.re.kr)

송민협 (M. Song, sminhyup@etri.re.kr)

김기수 (K.S. Kim, kimks1136@etri.re.kr)

광융합부품연구실 선임연구원

광융합부품연구실 책임연구원

광융합부품연구실 책임연구원

광융합부품연구실 선임연구원

광융합부품연구실 책임연구원/실장

ABSTRACT

Recently, LNOI photonics technology has attracted attention as a photonics platform capable of integrating ultra-high-speed, low power consumption, and high nonlinearity optical devices, as it is possible to manufacture LiNbO_3 optical waveguides with ultra-low optical loss and a radius of curvature of several tens of micrometers. Here, we will briefly compare various photonics platforms, such as Si, InP, SiN, and LNOI, describe the current research trends of LNOI photonics, and discuss the direction of photonics technology at the conclusion.

KEYWORDS LiNbO_3 단결정 박막, LNOI 포토닉스, 초고속 LiNbO_3 광변조기, 고비선형성 LNOI 포토닉스 집적회로

1. 서론

정보(Information)는 광 또는 전기로 처리된 모든 종류의 자료 또는 지식[1]으로, 정보의 선점 및 확보, 원활한 유통은 각종 위험으로부터 인간을 보호하는 동시에 막대한 경제적 이익을 창출한다. 현대 사회는 AR-VR 디바이스, 홀로그램, 자율주행 자동차 등의 네트워크 연결과 상호 데이터 공유 및 산업, 인공지능, 네트워크 서비스 융합의 가속화에 따른 정보통신량의 폭주로, 육·해·공·우주

를 연결하는 초대용량 유무선 정보통신망의 구축이 요구된다. 이에 따라 정보처리 기술은 급속도로 발전 중이며, 이러한 성장을 지속적으로 유지 및 발전시키기 위해 확장성, 고수율, 고성능, 저에너지 및 저비용의 특성을 갖는 다양한 기능을 탑재한 초소형 포토닉스 집적회로(PIC: Photonic Integrated Circuits) 및 전자 집적회로(EIC: Electronic Integrated Circuits) 시스템의 개발이 요구되고 있다[2-5].

EIC는 무어의 법칙에 따라 트랜지스터의 수가 2년마다 두 배씩 증가 중이며, 현재 최소선폭이

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2021.J.360305>

* 이 연구는 MSIT/IITP의 ICT R&D 프로그램[2020-0-01268, 2019-0-00008]의 일환으로 수행되었음.



본 저작물은 공공누리 제4유형

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2021 한국전자통신연구원

7nm인 미세공정 기술을 적용하여 집적도를 높이고 있으나 곧 한계에 이를 것으로 예상되고 있다. 이처럼 집적도가 포화 한계에 이르는 것은 나노미터의 작은 크기에서 누설 전류가 증가하고, 인터커넥트(Interconnects) 수를 확장하는 것에 제한이 따르기 때문이다. 이런 이유로 단일 프로세서의 집적도를 높이는 대신에 멀티코어 프로세서를 개발하여, 클럭 속도를 높이지 않고도 멀티코어에서 병렬 연산을 하는 방식으로 정보처리 속도의 한계를 극복하고 있으며, 현재 코어 수가 급속도로 증가하는 추세에 있다[2]. 이러한 병렬연산처리 방식의 멀티코어 프로세서에서 해결해야 할 문제는 인터커넥트에서 발생하는 병목현상으로, PIC는 거리에 무관하게 초고속, 저에너지 소모의 병렬연결을 제공하기 때문에 현재 EIC가 직면한 인터커넥트에서 발생하는 문제를 해결하기에 적합하다. PIC와 EIC의 하이브리드(Hybrid) 집적화는 광자와 전자가 상호보완하여 이들이 갖는 장점을 극대화하는데, EIC는 멀티코어 프로세서를 기반으로 복잡한 전기신호의 연산 및 정보처리를 가능케 하고, PIC는 넓은 대역폭, 낮은 대기 시간, 낮은 전송 손실, 고속 데이터 송수신 등의 장점을 바탕으로 칩 내부(Inter Chip), 칩 사이(Chip to Chip), 서버 사이(Server to Server) 및 전체 광통신망에서 고효율, 고성능의 광 연결(Optical Interconnects)을 가능케 한다. 현대의 정보화 사회는 데이터 트래픽의 급격한 증가 추세에 유연하게 대응할 수 있는 정보처리 기술의 개발이 절실하며, 이에 따라 에너지 소비와 제작 비용을 줄이면서 데이터 송수신 속도가 수백 Gbps~수 Tbps로 빠른 PIC를 모든 수준의 광연결 장치에 적용할 것을 요구하고 있다.

본 고에서는 고성능 PIC의 구현을 위해 연구 중인 SOI(Silicon-On-Insulator), InP, Si_3N_4 , LNOI(LiNbO_3 -On-Insulator) 등을 기반으로 하는

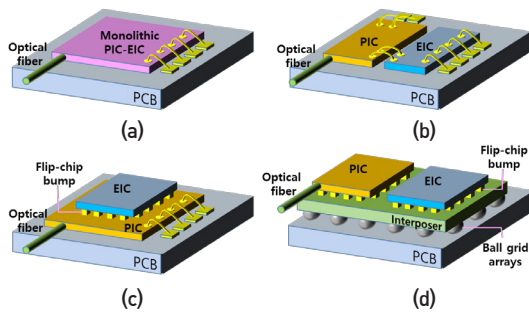
다양한 포토닉스 플랫폼들의 특징과 한계 및 이를 극복하기 위한 연구 동향을 기술한다.

II. 포토닉스 플랫폼의 기술 동향

PIC는 광 통신, 데이터 통신, 무선주파수(RF) 신호처리, 분광기, 위치 지정 및 탐색, 저잡음 마이크로파 합성, 양자통신, 원자시계 등을 포함하는 많은 분야에 응용하는 것이 가능하다. PIC의 구현을 위해 필요한 기본 구성요소는 집적화가 가능한 광원, 광검출기, 광변조기이며, 그 외에도 목적에 따라 파장 다중화/역다중화 장치(WDM), 광섬유와 포토닉스 칩 간 광 결합 장치, 광 세기 분배/결합기 및 편광조절 장치 등의 구성요소들이 필요하다. 현재 InP, SOI, Si_3N_4 , LNOI 등의 다양한 재료를 기반으로 포토닉스 구성요소들을 제작하여 PIC를 구현하려는 연구가 활발히 진행 중이며[6-9], 이들 포토닉스 플랫폼들은 적용되는 재료가 갖는 고유의 특성에 한계가 있어서 단일 플랫폼으로 완벽한 PIC를 구현하는 것은 매우 어려운 일이다.

1. 실리콘 포토닉스 플랫폼

집적화를 위한 플랫폼으로써 실리콘 기판은 가장 경제적이고, 확장성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. 일상생활에서 흔히 접하는 스마트폰과 같은 전자 제품에서부터 각종 최첨단 전자기기에 이르기까지 그 안에는 실리콘 기판으로 제작된 CPU나 메모리를 구성하는 수십억 개의 트랜지스터가 있으며[10], 이 전자 소자는 수십 년 전 진공관을 대체하기 시작해서 현재 우리가 누리고 있는 전자기술 문명으로 발전하기까지 혁혁한 공을 세우고 있다. 그런데 이 트랜지스터는 실리콘과 SiO_2 절연막을



출처 Reproduced with permission from [11], CC BY 4.0.

그림 1 다양한 EIC와 PIC의 집적화 방법. (a) 모놀리식 (b) 2D (c) 3D (d) 2.5D EIC-PIC 집적화

기본 구성으로 하며, 이 조합은 실리콘을 코어로 하고 SiO_2 를 클래드로 하는 광도파로 구조와 정확히 일치한다. 실리콘과 SiO_2 절연막의 조합은 트랜지스터의 재료이면서 동시에 광소자를 만들기에 매우 적합하여 연구자들은 실리콘 기판 위에 EIC와 PIC를 모놀리식(Monolithic) 집적하려는 연구를 진행 중이며, 2D, 2.5D, 3D 집적화 방식을 구현하려는 연구가 함께 진행 중이다.

그림 1(a)와 같은 모놀리식 집적화는 EIC의 공정조건을 거의 변경하지 않고 PIC를 단일 기판 위에 제작하는 것으로, EIC와 PIC를 연결하기 위한 패드나 솔더 범프(Solder Bump)의 사용이 불필요하여 임피던스가 불일치되는 것을 최소화하고, 패키징을 단순화할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 현재 모놀리식 집적화에 사용되는 가장 좋은 공정장비는 최소선폭이 32nm 또는 45nm로, 최첨단 Fin-FET(Fin Field Effect Transistor)의 제작에 사용되는 최소선폭 10nm 이하의 공정장비와 비교해서 성능이 떨어지며, 이로 인해 트랜지스터의 소비전력이 증가하게 된다. 또한 모놀리식 집적화는 EIC의 공정조건에 변화 없이 PIC를 집적하기 때문에, 기술 개발의 난이도가 높고, 생산비용이 비싸며, 기술의 유연성이 떨어진다. 미국의 Luxtera에서는 이런 이

유로 하이브리드 2.5D 집적화 방식을 이용하여 실리콘 PIC를 이용한 광트랜시버를 생산하고 있다 [11]. 2D 집적화는 그림 1(b)와 같이 독립적인 PIC와 EIC를 나란히 배치하고 와이어본딩으로 두 칩을 연결하는 방식이다. 이 경우 칩의 제작 및 패키징이 용이하지만, 기생 인덕턴스를 발생시키는 문제가 있다. 3D 집적화는 와이어의 사용을 최소화하고 솔더 범프를 사용하기 때문에 EIC와 PIC의 패키징 시 발생하는 기생 성분의 발생을 최소화할 수 있다. 하지만 EIC의 열이 PIC에 전달되어 링 공진기나 위상변화에 의존하는 포토닉스 소자의 성능 저하를 일으키는 문제가 있다. 그림 1(d)는 인터포저(Interposer)를 이용하여 나란히 배치된 PIC와 EIC를 연결하는 구조인 2.5D 집적화 방식을 보여준다. 인터포저는 전기적 또는 광학적인 연결을 모두 포함한다. 2.5D 집적화 방식은 3D 집적화와 비교하여 PIC와 EIC 사이의 간격이 멀어서 기생성분의 크기는 상대적으로 증가하지만 인터포저를 조절하여 기생성분을 작게 만드는 것이 가능하다 [12]. 실리콘 포토닉스는 EIC와 모놀리식 집적화가 가능한 가장 이상적이면서 유일한 포토닉스 플랫폼이라고 하지만, 기술적 난이도 및 생산비용 등의 문제로 당장은 하이브리드 집적화가 적절한 타협점이 될 수 있다.

한편, 실리콘 포토닉스의 가장 큰 장점은 EIC 제작을 위해 개발된 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 표준공정을 활용하여 8인치 이상의 웨이퍼에 PIC 칩을 대량생산할 수 있다는 것이다. 이러한 CMOS 공정기술을 기반으로 실리콘 포토닉스에서는 PIC를 구현하는 데 필요한 구성 요소들인 MZI(Mach-Zehnder Interferometer) 광변조기, Ge 광검출기, WDM 소자, 편광조절 소자, 광섬유와 칩 간 광결합기 등이 연구 개발되었다. 하지만 실리콘은 간접 천이형(Indirect Band Gap) 물

질로 CMOS 공정을 기반으로 한 레이저 광원을 개발하는 데 한계에 직면해 있다. 이는 실리콘 포토닉스의 가장 큰 단점 중의 하나로, 현재 CMOS 공정에서 사용 가능한 GeSn을 이용한 광원[13,14]의 연구가 진행 중이나 III-V 화합물 반도체를 이용한 하이브리드 집적화가 가장 합리적인 해결책으로 대두되고 있다.

2. InP 포토닉스 플랫폼

InP는 직접 천이형(Direct Band Gap) 물질로 In-GaAsP와 InP의 조합을 적용한 성능이 좋은 광원 등의 능동소자의 제작이 가능하고, 또한 InGaAsP를 코어로 하고 InP를 클래드로 하는 광도파로의 구조를 기반으로 WDM, 편광소자, 광세기 분배/결합기, 광검출기 등의 다양한 수동소자들을 구현할 수 있다. 따라서 InP 포토닉스는 능동소자와 수동소자를 모놀리식 집적화할 수 있는 장점이 있다. 하지만 신호의 투과 대역이 좁고 광도파 손실이 크며, 소자의 제작 단가가 높고, EIC를 하이브리드로 집적해야 하는 단점도 공존하고 있다.

InP 포토닉스의 가장 큰 단점은 실리콘 포토닉스와 비교해서 웨이퍼 크기가 작기 때문에 대량생산이 어려워 칩의 제작 비용이 증가하는 점이다. 현재 InP 포토닉스에 관한 연구는 대부분 2~3인치 웨이퍼에서 이루어지고 있으나 더 큰 웨이퍼 제작을 제한하는 근본적인 문제는 없으므로 미래에 대면적 InP 포토닉스 기술의 개발이 이루어질 것으로 예상된다[6].

InP 포토닉스는 수동소자들의 성능에서 실리콘 포토닉스와 큰 차이가 없지만 InP 기반 광변조기는 실리콘 MZI 광변조기보다 더 좋은 성능을 보여주며, 수백 GHz로 빠르게 동작하는 InP 기반 UTC(Uni-Traveling Carrier) PD도 가능하다[15]. 또

한 광원과 수동포토닉스 소자들을 모놀리식 집적화할 수 있다. InP 포토닉스에 이러한 장점이 있음에도, 대부분의 광학 장비와 부품 생산 업체들은 실리콘 포토닉스 기반의 제품 개발에 투자하고 있다. 그 주된 이유 중 하나는 실리콘 포토닉스는 잘 확립된 CMOS 파운드리를 이용한 기술 개발이 가능하지만, InP 포토닉스는 고성능의 InP 기반 PIC를 대량생산하기 위해서 시설 및 인력을 확보해야 하고, 제품을 개발하는 데 대규모 선행 투자 및 공정의 안정화가 필요하기 때문이다[16].

3. LNOI 포토닉스 플랫폼

전 세계 데이터 트래픽의 지속적인 증가 및 급속한 확장으로 모든 수준의 광 네트워크에 적용되는 트랜시버 기술은 에너지 소비와 비용을 줄이면서 데이터 속도를 테라비트급으로 높이는 난제에 직면하였으며, 광 변조기는 전기신호로 구성된 정보를 광신호에 인코딩하는 엔진 역할을 하는 광네트워크의 핵심 구성요소로, 광트랜시버에서 켜고 있는 난제의 주요 원인이 된다. 실리콘, InP 또는 폴리머와 같은 소재를 기반으로 하는 광변조기는 사용되는 재료의 본질적인 한계로 인해 CMOS 기술과 호환되는 동작전압, 100GHz 이상의 초고속 데이터 변조, 낮은 광학손실 및 집적화가 가능한 칩 크기 등의 요구사항을 동시에 충족시키기가 쉽지 않다. 하지만, 수십 년 전부터 현재까지 광전자 산업의 주요 소재로 사용 중인 LiNbO₃를 이용한 포토닉스 기술은 미세 구조 제작을 위한 식각 난제로 인해 온칩 집적화가 불가능하였으나, 최근 LNOI 기판의 상용화와 LiNbO₃ 식각 기술의 발전으로 초고속, 저전력의 집적화가 가능한 광변조기를 포함하는 고성능 PIC의 제작이 가능하게 되어 매우 유망한 플랫폼으로 급부상하고 있다.

가. LNOI(LiNbO₃-On-Insulator) 웨이퍼

일반적으로 LiNbO₃는 초크랄스키(Czochralski) 방법으로 성장하며, 조밀육방격자(Hexagonal Close Packed Lattice) 구조의 단결정으로 벌크(Bulk) 상태로 되어 있다. PIC 제작을 위해서는 단결정 박막이 필요하며, 다양한 증착 방법으로 LiNbO₃ 단결정 박막을 성장하였고, 이를 이용하여 LiNbO₃ 채널형 광도파로를 제작하려는 시도가 있었다. 하지만 기판과 LiNbO₃ 단결정 박막의 격자상수 차이로 인한 결정의 품질 저하로 저손실 광도파로의 제작은 한계에 직면해 있었다[17-22]. 이러한 문제를 해결하기 위해 스마트 컷 방법을 적용하여 균일한 LiNbO₃ 단결정 박막을 포함하는 LNOI 웨이퍼를 제작할 수 있게 되었다. 현재 상용으로 판매되고 있는 LNOI 웨이퍼는 그림 2에서 보는 바와 같이 벌크 LiNbO₃ 웨이퍼와 SiO₂가 증착된 웨이퍼 준비, LiNbO₃ 내에 수소 이온 주입(H⁺ 임플란트) 및 웨이퍼 본딩, 열처리에 따른 수소의 팽창을 이용한 벌크 LiNbO₃ 웨이퍼의 분리, 제작된 LiNbO₃/SiO₂/Si 구조를 갖는 웨이퍼의 LiNbO₃ 표

면 연마 등의 과정을 통해 제작된다. 이때 LNOI 웨이퍼에서 LiNbO₃의 박막의 두께는 수백 나노미터로 얇다.

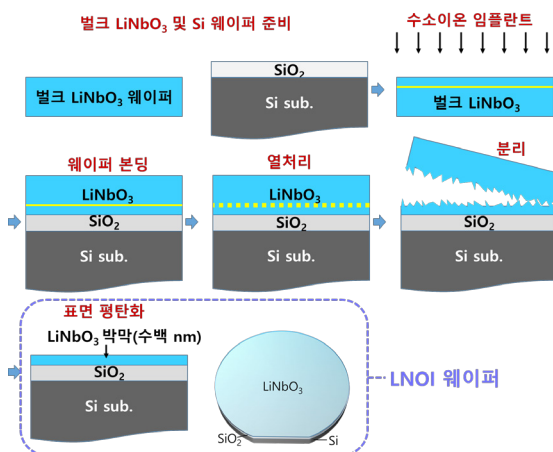
나. 포토닉스 플랫폼의 광학적 특성 비교

SOI 기판에 제작된 단일모드 실리콘 도파로의 단면적은 $\sim 0.5 \times 0.22 \mu\text{m}^2$ 이며, 실리콘 코어와 실리콘 클래드의 굴절률 차이는 $1.55 \mu\text{m}$ 파장에서 ~ 2 로 크기 때문에 광도파로의 곡률 반경은 수 μm 로 작다. 따라서 포토닉스 소자의 크기를 매우 작게 만들 수 있으며, 이때 광도파 손실은 $\sim 0.1 \text{ dB/cm}$ 이고, 광의 투과 파장 대역은 $1.1 \sim 4 \mu\text{m}$ 로 넓다.

광원이나 광검출기의 이득 및 흡수 물질로 이용되는 InGaAsP/InP 광도파로는 곡률반경이 실리콘 도파로에 비해 크며, 광도파 손실도 $0.4 \sim 2 \text{ dB/cm}$ 로 상대적으로 크고, 광의 투과 파장 대역은 $1.1 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 로 좁다.

표준 CMOS 공정에서 절연체로 사용되는 Si_xN_y는 SiO₂를 클래드로 하는 광도파로의 코어로 활용 가능하며, 이를 이용한 포토닉스 소자에 대한 연구가 이루어지고 있다. Si_xN_y 도파로는 코어와 클래드의 굴절률 차이가 ~ 0.556 로 커서 곡률반경이 $\sim$ 수십 μm 로 작기 때문에, 이를 기반으로 하는 포토닉스 소자들을 집적화하는 것이 가능하다. 광도파 손실은 최소 0.03 dB/cm 로 매우 작고, 광의 투과 파장대역은 $0.4 \sim 4 \mu\text{m}$ 로 넓다.

LNOI 웨이퍼에 제작된 광도파로는 LiNbO₃를



출처 Reproduced with permission from https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_cut, CC BY-SA 3.0.

그림 2 LNOI 웨이퍼 제작을 위한 스마트 컷 프로세스의 개요도

표 1 광도파 손실 및 투과 대역[7,23-30]

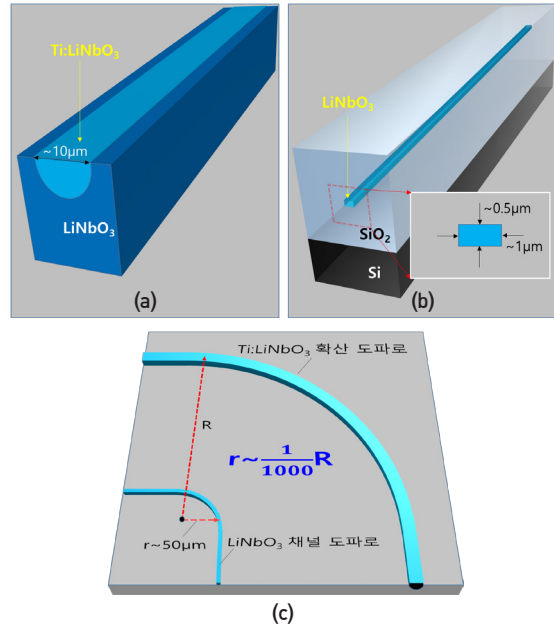
포토닉스 플랫폼	도파손실 (dB/cm)	투과대역 (μm)
SOI	0.1	1.1~4
InGaAsP/InP	0.4~2	1.1~1.6
Si _x N _y	0.03~1	0.4~4
LNOI	0.03~4	0.4~4

코어로 SiO_2 를 클래드로 사용하며, 코어와 클래드의 굴절률 차이가 ~ 0.766 으로 크기 때문에 곡률반경이 $\sim$ 수십 μm 로 작고, 포토닉스 소자들의 집적화가 가능하다. 또한, LiNbO_3 광도파로의 도파손실은 Si_3N_4 도파로와 비슷한 수준으로 매우 작다.

SOI, InGaAsP/InP , Si_3N_4 및 LNOI 광도파로의 특성은 표 1에 간략히 요약되어 있으며, 특히 Si_3N_4 와 LiNbO_3 도파로의 광도파손실과 투과대역 특성이 매우 우수함을 알 수 있다. Si_3N_4 는 일반적인 유전체로 전기적으로 전류가 흐르지 않는 절연성을 띠고 있으며, LiNbO_3 는 강유전체(Ferroelectrics) 물질로 절연성뿐만 아니라 외부 전기장이 없는 상태에서 자발분극(Spontaneous Polarization)되어 있다. 자발분극 상태는 외부 전기장의 변화에 매우 빠르게 반응하며, 따라서 이를 이용하여 LiNbO_3 광도파로의 굴절률을 매우 빠르게 변화시킬 수 있는 특성이 있다.

다. Ti:LiNbO_3 와 LNOI 기반 채널 도파로

일반적으로 상용화되어 있는 광 강도변조기 및 광 위상변조기의 광도파로 구조는 그림 3(a)와 같이 Ti:LiNbO_3 를 코어로 LiNbO_3 를 클래드로 사용하고 있다. 이때 Ti:LiNbO_3 는 Ti를 LiNbO_3 에 확산시켜 만든다. Ti:LiNbO_3 확산 도파로는 코어와 클래드의 굴절률 차이가 ~ 0.01 로 작아서 단일모드 조건에서 도파로의 코어 직경이 $\sim 10\mu\text{m}$ 로 커지게 된다. 그림 3(b)는 LNOI 기반 LiNbO_3 채널 도파로 구조인데, LiNbO_3 가 화학적으로 불활성 특성을 갖는 물질이기 때문에 LiNbO_3 를 코어로 사용하기 위해 필요한 식각공정이 쉽지 않다. 그러나 최근에 Ar^+ 을 이용한 물리적 식각 기술의 발전으로 제작이 가능해졌다. 코어(LiNbO_3)와 클래드(SiO_2)의 굴절률 차이(Δn)가 크기 때문에 단일모드 조건에서 LiNbO_3 채널 도파로의 단면적은 $\sim 1 \times 0.5\mu\text{m}^2$ 로



출처 Reproduced with permission from [26] © The Optical Society of America

그림 3 (a) Ti:LiNbO_3 확산형 도파로와 (b) LNOI 기반 LiNbO_3 채널 도파로의 구조 및 (c) 도파로의 곡률 반경

작다. Δn 은 곡선 도파로의 곡률반경에 영향을 주며, 굴절률 차이가 클수록 곡률반경은 작아지게 된다. LNOI 기반 LiNbO_3 채널 도파로의 곡률반경은 $\sim 50\mu\text{m}$ 로 이는 Ti:LiNbO_3 는 확산 도파로와 비교하여 $\sim 1/1000$ 만큼 작은 값이다[29–31].

라. LNOI 기반 초고속 MZI 광변조기

LiNbO_3 는 결정 방향에 따라 물성이 다르기에 소자의 설계, 제작 시 주의해야 한다. LiNbO_3 단결정 광도파로를 이용한 광 강도변조기는 MZI 방식으

표 2 RF와 광 신호의 유전상수[27]

주파수	유전상수		
	LiNbO_3	SiO_2	Si
RF(3kHz~300GHz)	28	3.9	11.8
광(193THz, 1.55 μm)	5	2.07	12.0

로 제작하며, 자발분극이 z 축 방향이므로 광변조기 전극에 의한 전기장의 방향이 z 축과 평행하도록 설계한다.

일반적으로 초고속 광변조기는 CPW(Coplanar Waveguide) 진행파 전극 구조를 사용하는데, 이때 변조 대역폭을 결정하는 가장 중요한 설계 요소는 RF와 광 신호의 군속도를 일치시키는 것이다. 표 2는 LiNbO₃, SiO₂, Si에서 RF와 광의 유전상수를 나타내며, 이 중 LiNbO₃에서 RF와 광의 유전상수 값이 크게 다른 것을 알 수 있다. CPW 진행파 전극을 전파하는 RF 신호와 LiNbO₃ 광도파로를 진행하는 광신호의 군속도를 일치시키는 것은 매우 어려운 일이다.

Ti:LiNbO₃ 확산형 도파로 구조에서 RF 신호는 전극 주변에 집중되어 있으나 상당 부분이 LiNbO₃ 내에 분포하고 광모드 또한 대부분 Ti:LiNbO₃ 도파로에 속박되어 있기 때문에, 이들 두 신호의 군굴절률은 LiNbO₃ 유전상수의 영향으로 크게 차이가 난다. 따라서 Ti:LiNbO₃ 확산형 도파로를 기반으로 하는 광변조기는 RF와 광신호 사이의 군속도 부정합 문제로 50GHz 이상의 빠른 광변조가 어렵다. LNOI 기반 LiNbO₃의 채널도파로 구조의 경우 코어와 클래드의 굴절률 차이가 크기 때문에 광모드는 대부분 도파로 코어에 분포하지만, RF 신호는 LiNbO₃ 코어의 면적이 0.5 μm^2 로 작아서 광도파로의 주변에 대부분 분포하게 된다. 따라서 RF와 광의 군굴절률은 적절한 LiNbO₃ 도파로와 전극의 구조 설계를 통하여 일치시킬 수 있고, 100GHz 이상에서 동작하는 LNOI 기반 광변조기의 개발이 가능하다.

표 3은 Si, InP, 그리고 LNOI를 기반으로 하는 광변조기의 특성을 비교한 것이다. 광변조 시 발생하는 광손실은 LNOI 기반 광변조기의 경우 0.5dB/cm로 InP나 Si 광변조기와 비교해서 매우 작음을 알

표 3 Si, InP, LNOI 광변조기 특성[27,32-36]

변조기 특성	Si	InP	LNOI
변조 방법	pn 접합 (전자 밀도)	pn 접합 (포켈스 효과)	강유전체 (포켈스 효과)
손실	5dB/cm	2dB/cm	0.5dB/cm
S21 _{3dB}	50GHz	67GHz	≥100GHz
속도	100Gbps	140Gbps	≥200Gbps
에너지	50fJ/bit	570fJ/bit	0.37fJ/bit
웨이퍼	8"이상	2~3"	4~6"

수 있다. 또한 Si와 InP 광변조기의 최대 광전변환 속도는 각각 50GHz와 67GHz였으나, LNOI 기반 광변조기의 경우 100GHz 이상의 광변조 특성을 보였다. 1bit당 에너지 소모는 LNOI 기반 광변조기가 0.37fJ로 Si 광변조기에 비해서 1/135로 작았다. 이러한 비교 결과는 LNOI 기반 광변조기가 성능 면에서 Si이나 InP 광변조기에 비해 큰 장점이 있음을 보여준다. ETRI에서는 (주)파이버프로와 공동으로 2020년부터 100GHz 이상의 동작 속도를 갖는 LNOI 기반 초고속 광변조기를 개발하기 위해 LiNbO₃ 식각 공정을 개발 중이며, 소자 설계 및 제작 공정을 진행하고 있다.

마. LNOI 비선형 포토닉 소자

LiNbO₃는 강한 2차 비선형성($\chi^{(2)}$)과 3차 비선형성($\chi^{(3)}$)을 동시에 갖는 물질이다. 외부전기장에 반응하여 굴절률이 선형으로 변화하는 포켈스 효과(Pockels Effect)는 2차 비선형성에서 기인하며, 앞에서 언급한 100GHz 이상의 초고속 광변조기 제작이 가능한 것도 이러한 LiNbO₃의 물성 때문이다. 또한 LiNbO₃의 강한 3차 비선형성은 FWM(Four-Wave Mixing)을 잘 발생시키며, 이를 이용하여 링공진기 구조를 이용한 마이크로 콤(Micro Comb) 광원을 제작할 수 있다.

현재 고성능의 마이크로 콤 광원에 관한 연구 결

과는 SiO_2 나 Si_xN_y 를 기반으로 한 것이 주를 이룬다. 이는 이들 물질을 이용한 광도파로의 도파 손실이 매우 작아서 Q 인자(Quality Factor)가 높은 고성능 마이크로 콤 제작에 유리하기 때문이다. 하지만 SiO_2 나 Si_xN_y 마이크로 콤은 고속 스위칭, 광변조 및 파장 변환 등을 위해 별도의 소자나 장치가 필요하다. LNOI 기반 LiNbO_3 는 광도파 손실이 Si_xN_y 와 비슷한 수준으로 3차 비선형성을 이용한 Q 인자가 높은 고성능 마이크로 콤의 구현과 동시에 2차 비선형성을 이용한 고속 스위칭, 광변조 및 파장 변환 소자들을 단일 칩에 제작하는 것이 가능하다. 따라서 LNOI 포토닉스는 LiNbO_3 의 비선형성을 기반으로 다양한 기능을 단일칩에 집적할 수 있기에, 단순한 구조에서부터 복잡한 PIC 구조를 필요로 하는 다양한 응용분야의 요구에 대응하여 저가이면서 고성능의 광부품을 개발하는 것이 가능하다[23,37-40].

바. LNOI 기반 광원 및 광검출기

LiNbO_3 는 강유전체 물질로 빛을 발생시키기 어려운 물질이다. 따라서 벌크 LiNbO_3 결정에 Er과 같은 희토류 물질을 주입한 후 $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ 확산 도파로를 제작하여 이를 이득 물질(Gain Medium)로 하는 광원이나 광증폭기를 제작하려는 연구가 시도되었다[41-46]. 희토류의 주입은 $1,000^\circ\text{C}$ 이상의 온도에서 진행되어야 하나 웨이퍼 본딩은 고온에서 파괴되므로, LNOI 웨이퍼의 경우 웨이퍼 본딩 전에 희토류 주입 공정을 진행해야 한다. LNOI 기반의 또 다른 광원 제작 방법은 III-V 화합물 반도체와 LNOI를 하이브리드 집적하는 방법이다. LNOI와 유사한 구조를 가지고 있는 SOI에서 III-V/Si 하이브리드 광원이 성공적으로 제작된 연구결과가 있으며, 이 방법을 적용한 LNOI 기반의 광원 제작 연구가 필요하다[47].

광원과 마찬가지로, LiNbO_3 광도파로 기반 광검출기에 관한 연구는 초기 단계에 있다. 약 30년 전에 LiNbO_3 광도파로 위에 GaAs 광검출기를 제작한 결과들[48-50]이 있으며, $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ 광도파로와 초전도체를 이용한 단광자 검출기[51-52] 및 LNOI 도파로 위에 집적한 Si 광검출기[53]에 관한 연구가 최근에 보고되었다.

III. LNOI 포토닉스의 응용

LNOI 포토닉스는 집적화가 가능한 초고속 광변조기, 비선형 소자들을 기반으로 차세대 광통신, 양자광학, 마이크로파 포토닉스(Microwave Photonics), 정밀 계측 분야 등에 응용이 가능하다.

광변조기는 광통신에서 데이터 송신용 핵심 소자로서, CMOS 드라이버와 호환되는 동작전압을 특징으로 하고, 초당 최대 210Gbit의 데이터 변조 속도를 지원하며, 0.5dB 미만의 광손실을 갖는 모놀리식 집적이 가능한 LiNbO_3 MZI 광변조기에 대한 연구결과가 보고되었다[27]. 또한 2.5dB의 삽입 손실, 단일 드라이브 푸시-풀(Push-Pull) 동작에서 2.2Vcm의 광변조 특성을 보이며, 높은 선형성, 최소 70GHz의 광변조 대역폭 및 최소 112Gbps의 데이터 변조 속도를 지원하는 Si/ LiNbO_3 하이브리드 MZI 광변조기에 대한 연구결과가 보고되었다[54]. LNOI 기반 광변조기는 CMOS 기술과 호환되는 동작전압, 100GHz 이상의 광대역 폭 데이터 변조, 낮은 광학 손실을 특징으로 하는 칩 크기의 광변조기로 차세대 광통신망 및 데이터센터에서 요구하는 1Tbps 이상의 데이터 송수신용 트랜시버 제작에 적합하다.

LiNbO_3 에서는 강한 2차 비선형성에 기인하여 SHG(Second Harmonic Generation), SFG(Sum Frequency Generation), DFG(Difference Frequency Gener-

ation)과 3차 비선형성에 의해 FWM과 같은 비선형 광학 현상들이 잘 발생한다. 또한 위상변조 시 광손실이 매우 작아 단광자의 신호처리에 적합하며, 편광소자 및 WDM 소자의 집적화가 가능하다. 따라서 얽힘광자쌍(Entangled Photon Pair)의 생성[55–57], 단광자 검출기[58]와 양자 회로[59] 또는 양자 기억장치[60] 등을 포함하는 양자 광학과 관련된 다양한 분야에 응용하는 것이 가능하다.

마이크로파 포토닉스는 광소자를 집적하여 마이크로파 신호를 생성, 전송, 변조 및 검출하는 분야이다. RF 집적회로와 비교해서 마이크로파 포토닉스는 넓은 대역폭, 저에너지 소모, 소형화 및 전자파와의 간섭에 민감하지 않은 장점이 있다. LNOI 포토닉스는 광에 RF 신호를 인코딩하는 핵심 구성요소인 광변조기의 성능(넓은 대역폭, CMOS 호환 드라이브 전압, 낮은 광도와 손실)이 뛰어나기 때문에 마이크로파 포토닉스에 매우 적합하다[27,39,54,61]. 또한 LNOI 기반 마이크로 콤팩트 마이크로파 포토닉스의 신호원 또는 필터로 활용하는 연구가 이루어지고 있다[62–63].

LNOI는 소형 계측기 분야를 개척하고 선도할 수 있는 마이크로 콤팩트의 구현이 가능한 이상적인 재료의 포토닉스 플랫폼으로 현재 관련 연구가 이루어지고 있다[64].

IV. 결론

LiNbO₃를 기반으로 하는 포토닉스 기술은 식각 기술의 발전과 수백 nm 두께의 LiNbO₃ 단결정 박막이 유전체(SiO₂ 등) 박막 위에 본딩되는 LNOI 웨이퍼의 보급이 맞물리면서 최근에 급격하게 발전하고 있다. 수십 μm 의 곡률 반경과 0.03dB/cm의 광도와손실을 갖는 LiNbO₃ 채널도파로, 적어도 100GHz 이상의 광전변환 속도를 갖는 광변조기,

강한 2차 및 3차 비선형성을 기반으로 하는 비선형성 소자들의 개발로, LNOI 포토닉스 기술은 차세대 통신(5G/6G), 양자광학, 마이크로파 포토닉스, 정밀 측정 분야 등에 응용 가능성이 매우 크다. 특히 LNOI 기반 광변조기는 Si와 InP 광변조기보다 동작 속도, 소비전력, 광손실 측면에서 월등히 우수하다. 또한 극저손실 광도파로를 기반으로 하는 마이크로 콤팩트 링공진기 기반 EO(Electro-Optic) 콤팩트, LiNbO₃ 채널 도파로에 제작된 PPLN(Periodically Poled LiNbO₃)을 이용한 얽힘 광자 광원의 개발 및 고속 스위칭 소자의 단일칩 집적화 등에 대해서 보고된 일부 연구결과는 LNOI 포토닉스 기술의 상용화에 대한 기대치를 높이고 있다.

하지만 지금까지 LNOI 포토닉스의 가능성에 대하여 많은 내용을 기술하였음에도, LNOI가 이상적인 포토닉스 플랫폼이라고 묻는다면 아니라고 대답할 수 있다. LNOI는 많은 장점을 가지고 있지만 다른 포토닉스 플랫폼과 유사하게 단점 또한 공존한다. Si, InP, Si₃N₄, LNOI 중 어떤 포토닉스 플랫폼이 승자가 될 것인지는 알 수 없다. 시장의 형성 및 특성, 생산비용, 성능 등 다양한 요인에 의해서 희비가 엇갈릴 것으로 보인다. 그렇다면 이들 포토닉스 플랫폼들은 서로가 경쟁자인가? 아마도 아닐 것이다. 완벽한 포토닉스 플랫폼이 없기에 서로 상호보완하며 공생할 필요가 있다. 그렇기에 모든 포토닉스 기술을 잘 알아야 하고, 관련 기술들을 언제든지 서로 접목할 수 있는 시스템을 갖추어야 하며, 사회의 기술적 요구에 빠르게 대응할 수 있게 준비해야 한다.

용어해설

포켈스 효과(Pockels effect) 전기장에 의해 물질의 굴절률이 변화하거나 생성되는 현상으로, 굴절률이 전기장의 세기에 선형으로 변화하기 때문에 선형 전기 광학 효과라고도 알려짐

약어 정리

CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CPW	Coplanar Waveguide
DFG	Difference Frequency Generation
EIC	Electronic Integrated Circuits
FWM	Four–wave Mixing
LNOI	LiNbO ₃ –On–Insulator
MZI	Mach–Zehnder Interferometer
PIC	Photonic Integrated Circuits
Q factor	Quality Factor
SFG	Sum Frequency Generation
SHG	Second Harmonic Generation
SOI	Silicon–On–Insulator
UTC–PD	Unitraveling Carrier Photodiode
WDM	Wavelength Division Multiplexing

참고문헌

- [1] Wikipedia, <https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%A0%95%EB%B3%B4>
- [2] S.J.B. Yoo et al., "Heterogeneous 2D/3D photonic integrated microsystems," *Microsyst. Nanoeng.*, vol. 2, 2016, Article no. 16030.
- [3] G. Gui et al., "6G: Opening new horizons for integration of comfort, security, and intelligence," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 27, no. 5, 2020, pp. 126–132.
- [4] X. Ren et al., "6G: Network visions and requirements for next generation optical networks," in *Proc. Int. Conf. Opt. Instrum. Technol.*, vol. 11435, Beijing, China, Mar. 2020, p. 2114350H.
- [5] M.W. Akhtar et al., "The shift to 6G communications: Vision and requirements," *Hum. Cent. Comput. Inf. Sci.*, vol. 10, 2020, Article no. 53.
- [6] M. Smit et al., "Past, present, and future of InP-based photonic integration," *APL Photonics*, vol. 4, 2019, Article no. 050901.
- [7] D.J. Blumenthal et al., "Silicon nitride in silicon photonics," *Proc. IEEE*, vol. 106, no. 12, 2018, pp. 2209–2231.
- [8] R. Soref, "The past, present, and future of silicon photonics," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 12, no. 6, 2006, pp. 1678–1687.
- [9] J. Lin et al., "Advances in on-chip photonic devices based on lithium niobate on insulator," *Photon. Res.* vol. 8, 2020, pp. 1910–1936.
- [10] <http://www.earlyadopter.co.kr/12496>
- [11] N.C. Abrams et al., "Silicon photonic 2.5D multi-chip module transceiver for high-performance data centers," *J. Light. Technol.*, vol. 38, no. 13, 2020, pp. 33467–3357.
- [12] N.C. Abrams, "Development of silicon photonic multi chip module transceivers," Ph. D. thesis, Columbia university, NY, USA, 2020.
- [13] D. Buca et al., "GeSn lasers for CMOS integration," in *Proc. IEEE Int. Electron Devices Meeting (IEDM)*, San Francisco, CA, USA, Dec. 2016, pp. 22.3.1–22.3.4.
- [14] J. Margetis et al., "GeSn-based light sources and photoconductors towards integrated photonics for the mid-infrared," in *Proc. IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM)*, San Juan, PR, USA, July 2017, pp. 13–14.
- [15] H. Ito et al., "High-speed and high-output InP–InGaAs unitraveling-carrier photodiodes," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 10, no. 4, 2004, pp. 709–727.
- [16] <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/The-Advantages-of-InP-Photonic-Integration-in-High-Performance-Coherent-Optics-0223-WP-RevB-0121.pdf>
- [17] G. Poberaj et al., "Lithium niobate on insulator (LNOI) for micro-photonic devices," *Laser Photonics Rev.*, vol. 6, no. 4, 2012, pp. 488–503.
- [18] Y. Sakashita et al., "Preparation and characterization of LiNbO₃ thin films produced by chemical-vapor deposition," *J. Appl. Phys.*, vol. 77, no. 11, 1995, pp. 5995–5999.
- [19] X. Lansiaux et al., "LiNbO₃ thick films grown on sapphire by using a multistep sputtering process," *J. Appl. Phys.*, vol. 90, no. 10, 2001, pp. 5274–5277.
- [20] Y. Nakata et al., "Fabrication of LiNbO₃ thin films by pulsed laser deposition and investigation of nonlinear properties," *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.*, vol. 79, no. 4–6, 2004, pp. 1279–1282.
- [21] J. Yoon et al., "Growth of highly textured LiNbO₃ thin film on Si with MgO buffer layer through the sol-gel process," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 18, 1996, pp. 2523–2525.
- [22] F. Gitmans et al., "Growth of tantalum oxide and lithium tantalate thin films by molecular beam epitaxy," *Vacuum*, vol. 46, no. 8, 1995, pp. 939–942.
- [23] D. Zhu et al., "Integrated photonics on thin-film lithium niobate," 2021, arXiv: 2102.11956, 2021.
- [24] K. Wörhoff et al., "TriPleX: A versatile dielectric photonic platform," *Adv. Opt. Technol.*, vol. 4, no. 2, 2015, pp. 189–207.
- [25] M. Prost et al., "A compact thin-film lithium niobate platform with arrayed waveguide gratings and MMIs," in *Proc. OFC*, San Diego, CA, USA, Mar. 2018, pp. 1–3.
- [26] C. Wang et al., "Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators," *Opt. Express*, vol. 26, no. 2, 2018, pp. 1547–1555.

- [27] C. Wang et al., "Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages," *Nature*, vol. 562, 2018, pp. 101-104.
- [28] K. Luke et al., "Wafer-scale low-loss lithium niobate photonic integrated circuits," *Opt. Express*, vol. 28, no. 17, 2020, pp. 24452-24458.
- [29] M. Zhang et al., "Monolithic ultra-high-Q lithium niobate microring resonator," *Optica*, vol. 4, no. 12, 2017, pp. 1536-1537.
- [30] B. Desiatov et al., "Ultra-low-loss integrated visible photonics using thin-film lithium niobate," *Optica*, vol. 6, no. 3, 2019, pp. 380-384.
- [31] V. Dobrusin et al., "Fabrication method of low-loss large single mode ridge Ti:LiNbO₃ waveguides," *Opt. Mater.*, vol. 29, no. 12, 2007, pp. 1630-1634.
- [32] M. Li et al., "Silicon intensity Mach-Zehnder modulator for single lane 100Gb/s applications," *Photonics Res.*, vol. 6, no. 2, 2018, pp. 109-116.
- [33] G.T. Reed et al., "Silicon optical modulators," *Nature Photonics*, vol. 4, no. 8, 2010 pp. 518-526.
- [34] J. Ozaki et al., "High-speed modulator for next-generation large-capacity coherent optical networks," *NTT Tech. Rev.*, vol. 16, no. 4, 2018, pp. 1-8.
- [35] S. Lange et al., "100 GBd intensity modulation and direct detection with an InP-based monolithic DFB laser Mach-Zehnder modulator," *J. Light. Technol.*, vol. 36, no. 1, 2018, pp. 97-102.
- [36] Y. Ogiso et al., "[011] waveguide stripe direction n-i-p-n heterostructure InP optical modulator," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 9, 2014, pp. 688-690.
- [37] D. Sun et al., "Microstructure and domain engineering of lithium niobate crystal films for integrated photonic applications," *Light: Sci. Appl.*, vol. 9, 2020, Article no. 197.
- [38] J. Lin et al., "Advances in on-chip photonic devices based on lithium niobate on insulator," *Photon. Res.*, vol. 8, no. 12, 2020, pp. 1910-1936.
- [39] Y. Qi et al., "Integrated lithium niobate photonics," *Nano photonics*, vol. 9, no. 6, 2020, pp. 1287-1320.
- [40] C. Wang et al., "Monolithic lithium niobate photonic circuits for Kerr frequency comb generation and modulation," *Nat. Commun.*, vol. 10, 2019, Article no. 978.
- [41] G. Schreiber et al., "Nonlinear integrated optical frequency converters with periodically poled Ti:LiNbO₃ waveguides," in *Proc. Symp. Integr. Opt.*, vol. 4277, San Jose, CA, USA, May 2001.
- [42] R. Brinkmann et al., "Erbium-doped single- and double-pass Ti:LiNbO₃ waveguide amplifiers," *IEEE J Quantum Electron.*, vol. 30, no. 10, 1994, pp. 2356-2360.
- [43] C. Huang et al., "980-nm-pumped Er-doped LiNbO₃ waveguide amplifiers: A comparison with 1484-nm pumping," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 2, no. 2, 1996, pp. 367-372.
- [44] D.L. Veasey et al., "Time-dependent modeling of erbium-doped waveguide lasers in lithium niobate pumped at 980 and 1480 nm," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, no. 10, 1997, pp. 1647-1662.
- [45] W. Sohler et al., "Erbium-doped lithium niobate waveguide lasers," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E88-C, 2005, pp. 990-997.
- [46] M. Fleuster et al., "Optical and structural properties of MeV erbium-implanted LiNbO₃," *J. Appl. Phys.*, vol. 75, 1994, Article no. 173.
- [47] A. Boes et al., "Status and potential of lithium niobate on insulator (LNOI) for photonic integrated circuits," *Laser Photonics Rev.*, vol. 12, no. 4, 2018, Article no. 1700256.
- [48] W.K. Chan et al., "Optical coupling of GaAs photodetectors integrated with lithium niobate waveguides," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 3, 1990, pp. 194-196.
- [49] A. Yi-Yan et al., "Grafted GaAs detectors on lithium niobate and glass optical waveguides," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 1, no. 11, 1989, pp. 379-380.
- [50] W.K. Chan et al., "GaAs photodetectors integrated with lithium niobate waveguides," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 36, no. 11, 1989, pp. 2627-2628.
- [51] M.G. Tanner et al., "A superconducting nanowire single photon detector on lithium niobate," *Nanotechnol.*, vol. 23, 2012, Article no. 505201.
- [52] J.P. Höpker et al., "Towards integrated superconducting detectors on lithium niobate waveguides," in *Proc. SPIE Nanosci. Eng.*, vol. 10358, San Diego, CA, USA, Aug. 2017, Article no. 1035809.
- [53] B. Desiatov et al., "Silicon photodetector for integrated lithium niobate photonics," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 115, 2019, Article no. 121108.
- [54] M. He et al., "High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit s⁻¹ and beyond," *Nat. Photon.*, vol. 13, 2019, pp. 359-364.
- [55] S. Tanzilli et al., "PPLN waveguide for quantum communication," *Eur. Phys. J. D.*, vol. 18, 2002, pp. 155-160.
- [56] G. Fujii et al., "Bright narrowband source of photon pairs at optical telecommunication wavelengths using a type-II periodically poled lithium niobate waveguide," *Opt. Express*, vol. 15, 2007, pp. 12769-12776.
- [57] H. Jin et al., "On-chip generation and manipulation of entangled photons based on reconfigurable lithium-niobate waveguide circuits," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 113, 2014, Article no. 103601.
- [58] J.P. Hopker et al., "Integrated transition edge sensors on titanium in-diffused lithium niobate waveguides," *APL*

- Photon., vol. 4, 2019, Article no. 056103.
- [59] K.-H. Luo et al., "Nonlinear integrated quantum electro-optic circuits," *Sci. Adv.*, vol. 5, no. 1, 2019, Article no. eaat1451.
- [60] M. Zhang et al., "Electronically programmable photonic molecule," *Nat. Photon.*, vol. 13, 2019, pp. 36-40.
- [61] A. Rao et al., "Compact lithium niobate electrooptic modulators," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 4, 2018, pp. 1-14.
- [62] T. J. Kippenberg¹ et al., "Dissipative Kerr solitons in optical microresonators," *Sci.*, vol. 361, no. 6402, 2018, Article no. eaan8083.
- [63] X. Xue et al., "Programmable single-bandpass photonic RF filter based on Kerr comb from a microring," *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 20, 2014, pp. 3557-3565.
- [64] N. Kuse et al., "Frequency-modulated comb LIDAR," *APL Photon.*, vol. 4, 2019, Article no. 106105.