

# 초고속 광송수신 소자·부품 기술

## Ultrahigh-Speed Photonic Devices and Components Technologies for Optical Transceivers

김종희 (J.H. Kim, jonghoi@etri.re.kr)

광통신부품연구실 책임연구원

한영탁 (Y.T. Han, frenclin@etri.re.kr)

광통신부품연구실 책임연구원

김덕준 (D.J. Kim, djkim@etri.re.kr)

광통신부품연구실 책임연구원

김동철 (D.C. Kim, dchankim@etri.re.kr)

광통신부품연구실 책임연구원

최중선 (J.S. Choe, jschoe@etri.re.kr)

양자광학연구실 책임연구원

이동훈 (D.H. Lee, dhlee@etri.re.kr)

광통신부품연구실 책임연구원

이서영 (S.Y. Lee, sylee84@etri.re.kr)

광통신부품연구실 선임연구원

### ABSTRACT

The data rate for transmission through fiber-optic cables has increased to 400 Gbps in single-wavelength channels. However, speeds up to 1 Tbps are required now to meet the ever-increasing bandwidth demand driven by the diverse requirements of contemporary applications for high-quality on-demand video streaming, cloud services, various social media, and emerging 5G-enabled applications. Because the data rates of the per-channel optical interfaces depend strongly on the operational speed of the optoelectronic devices used in optical transceivers, ultrahigh-speed photonic devices and components, and eventually, chip-level transmitter and receiver technologies, are essentially required to realize futuristic optical transceivers with data rates of 1 Tbps and beyond. In this paper, we review the recent progress achieved in high-speed optoelectronic devices, such as laser diodes, optical modulators, photodiodes, and the transmitter-receiver optical subassembly for optical transceivers in data centers and in metro/long-haul transmission.

**KEYWORDS** 광송수신소자, 광송수신모듈, 광트랜시버, 광통신, 광원, 광변조기, 광검출기

### 1. 서론

디지털화된 정보를 전달하고 활용하는 스마트기

기 확산과 영상, 방송, 가상/증강 현실 등 데이터 콘텐츠의 진화로 인하여 고품질 비디오 전송, 실시간 스트리밍, 클라우드 서비스, 소셜 미디어 등 대

\* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340508>

\* 본 논문은 2019년도 과학기술정보통신부 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 2018-0-01632 파장당 400G 이상의 차세대 광전달망 소자·부품 개발 및 과제번호 2018-0-00220 데이터센터 통신용량 증대를 위한 저전력 On-Board 집적 400Gbps 광송수신 엔진 기술).



본 저작물은 공공누리 제4유형

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2019 한국전자통신연구원

용량 데이터 서비스가 급격히 증가함에 따라 통신 트래픽이 폭증하고 있다. 최근 예측에 따르면, 글로벌 IP 트래픽은 2017년 연간 1.5ZB에서 향후 5년간 연평균 26%의 성장률로 3배 이상 증가하여 2022년 4.8ZB에 도달할 전망이다[1].

데이터 트래픽 폭증에 대응하고 사용자 요구에 맞춘 대용량 통신 서비스를 제공하기 위하여 전송 용량 확보가 필요하다. 특히, 클라우드 서비스의 기반 인프라인 데이터센터와 장거리 통신 네트워크인 매트로드망/전달망은 유무선 데이터가 대규모로 모여 전달되는 통신 인프라로서, 대용량 데이터 전송에 광섬유 케이블을 이용하기 때문에 디지털 신호를 광신호로 변환하여 전달하기 위한 광송수신 기술이 필수적으로 요구된다.

광통신에서 데이터 전송용량을 증대하는 방법은 통신 대역폭 혹은 가용 채널을 확대하거나 고차 변조를 적용할 수 있으나, 근본적으로 광송수신 기능을 담당하는 광트랜시버의 속도, 특히 광소자 및 광부품의 속도를 높이는 기술이 핵심적이다. 본고는 주로 대용량 데이터 전송이 요구되는 데이터센터 및 광전달망에서 요구되는 초고속 광송수신을 위한 광소자 및 광부품에 관하여 기술한다.

## II. 데이터센터용 광소자·부품 기술

### 1. 초고속 광원

인터넷 대역폭에 대한 끊임없는 요구를 충족시키기 위해 인터넷 데이터 전송 속도는 지난 30년 동안 10M 인터넷에서 100G 인터넷으로 급격히 발전하였으며, 현재는 2017년 IEEE 802.3bs에서 400GbE 표준이 승인되어 파장당 50Gbps 이상의 초고속 변조가 가능한 광원 기술이 요구되고 있다.

반도체 광원의 광출력 변조 방법은 반도체 레이저에 변조 전류를 주입하는 직접변조 방식과 CW

레이저에 외부 광변조기를 집적한 외부 변조 방식이 있다. 직접변조 광원(DML: Directly Modulated Laser)은 고속 신호의 변조와 전송을 위하여 일반적으로 분산 피드백(DFB: Distributed Feedback) 구조의 회절격자를 사용한 단일 칩 구조로서, 주입 전류 변조를 통한 고속의 광신호 생성이 가능하므로 EML(Electro-absorption Modulated Laser)과 같은 외부 변조기 집적 광원과 비교하여 고출력/저전력의 장점이 있으며, 칩 크기가 작고 동작 조건 및 임피던스 정합 구조가 단순하여 소자의 가격 경쟁력이 우수한 광원 기술이다.

400GbE 광트랜시버의 경우 1세대는 채널당 25Gbps NRZ, 2세대는 채널당 50Gbps PAM-4로 구현되는 반면, 2020년에는 채널당 100Gbps로 발전될 전망이다. 채널당 100Gbps PAM-4 변조 속도를 확보하기 위하여 광원에 요구되는 변조 대역폭은 대략 40GHz 정도로 예상된다. 최근 Oclaro Japan은 누설 전류가 낮고 높은 광구속 계수를 가지는 도파로 구조와 높은 미분 이득 특성의 MQW 구조를 적용하여 34GHz 변조 대역폭을 가지는 DML 칩을 개발하였다[2]. 현재까지 보고된 DML은 변조 대역폭이 35GHz 이하로서 60GHz에 근접한 대역폭을 가지는 EML보다 변조 속도가 현저히 낮아 파장당 100Gbps급 신호 변조가 요구되는 차세대 시스템의 광원에 적용하기 위해서는 대역폭 확장기술 확보가 필요한 상황이다.

최근에는 기존 DML의 변조 대역폭 한계를 극복하기 위하여, 외부 피드백 광을 DFB에 주입할 때 발생하는 PPR 효과를 이용하여 변조 대역폭을 확장시키는 연구가 진행되고 있다. 2017년에 Finisar는 DFB-LD에 DBR을 집적하여 55GHz의 대역폭의 직접변조 레이저를 개발하여 112Gbps PAM-4 신호 변조 및 전송에 성공하였다[3].

현재 대부분의 반도체 광원을 사용하는 시스템

에서는 제작이 간단하고 가격이 저렴한 직접 변조 방식의 광원을 사용하고 있다. 그러나 전류 변조 방식은 광원 칩 내부의 굴절률 변화에 의한 색 분산과 이로 인한 전송 거리 제한, 이완 주파수에 의존하는 변조 대역폭 한계, 그리고 주입 전류의 ON-OFF로 인한 낮은 소광비 등의 단점이 있어, 장거리 대용량 광신호 전송시스템에서는 변조 광신호 품질이 우수한 외부 변조 방식의 광원을 사용하는 추세이다.

EML은 양자 우물 구조에 전압을 인가할 때 흡수 스펙트럼이 이동하는 QCSE를 이용하여 고속 신호 변조가 가능한 EAM을 DFB-LD에 단일 집적한 외부 변조 광원 소자이며, 높은 소광비, 낮은 Chirp 특성, DML보다 높은 변조 속도 등의 장점이 있어 40km 전송용 100GbE-ER4의 광원으로 사용되고 있으며, 400Gbps/1Tbps 데이터 속도에 가장 근접한 광원 기술이다.

NTT는 최근 평탄한 주파수 응답 특성과 고주파 특성이 우수한 Flip-Chip Interconnection 기술을 EML 칩에 적용하여 변조 대역폭을 58GHz까지 증가시킨 1.3 $\mu$ m EML 모듈을 개발하였고 56Gbaud PAM-4 신호의 10km 전송에 성공하였다[4]. 또한, 동일 기술을 사용하여 107Gbaud PAM-4 신호의 10km 전송 결과를 보고하여 파장당 200Gbps 이상의 데이터 전송에 대한 적용 가능성을 보였다[5].

한편, EAM의 흡수 특성을 이용하여 신호 변조를 하는 EML은 DML보다 출력광 세기가 낮은 단점이 있어 전송거리를 증가시키고 광손실을 보상하기 위하여 EML 칩에 SOA를 집적하는 연구가 진행됐다. 특히, NTT는 DFB 전류를 SOA에 분배하는 방식을 적용하여 광트랜시버의 Sub-Carrier와 pin 배열의 변경 없이 기존 EML을 대체하고 동일한 소모 전력으로 80km까지 전송이 가능한 1.3 $\mu$ m 대역의 25Gbps SOA 집적 EML 칩 기술을 발표하였다[6].

## 2. 광검출기

초고속 광신호의 수신을 위하여 빠른 동작 속도를 가지는 광검출기가 필요하다. 광검출기를 구성하는 반도체층의 구조에 따라서 PIN-PD, APD, UTC-PD 등이 있다.

APD는 애벌런치 빌드업(Avalanche buildup)에 의해 신호를 증폭할 수 있는 장점이 있지만, 이 증폭 과정이 고속 동작을 방해하는 방향으로 영향을 미치므로 수십 Gbps 이상의 초고속 통신에서는 아직 사용되지 못하고 있다[7].

UTC-PD는 이동속도가 빠른 전자만 공핍층을 이동하도록 설계하여 수백 GHz의 동작 속도가 발표된 바가 있다[8]. 그러나 이런 높은 동작 속도를 위해서는 얇은 흡수층이 필수가 되어 충분한 반응도를 얻기가 어려워 동작 속도와 더불어 수신 감도도 중요한 요소인 광통신에 적용되기에는 개선이 필요한 상황이다.

따라서 현재 초고속 광통신에는 PIN-PD가 주로 사용되고 있다. PIN-PD에는 광신호의 입사 방향을 기준으로 표면입사형(SIPD: Surface-Illuminated Photodiode)과 광도파로형(WGPD: Waveguide Photodiode)이 있다.

SIPD는 원기둥 형태로 식각된 광다이오드 영역에 빛을 수직으로 입사시켜서 발생하는 광전류를

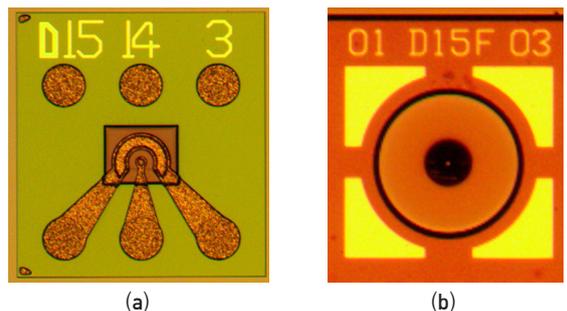


그림 1 표면입사형 광검출기

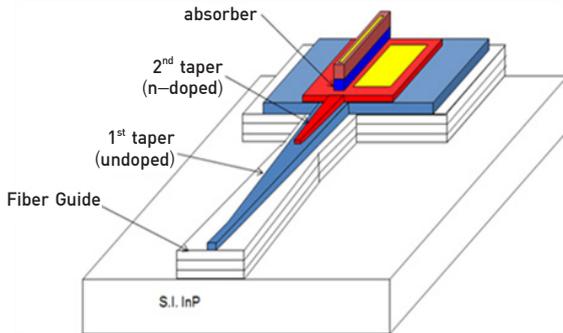


그림 2 광도파로형 광검출기

출력하는 방식으로(그림 1(a)), 제작 공정이 단순하고 편광에 따른 특성 차이가 거의 없다는 장점이 있다. 초고속 광통신용 SIPD는 다이오드 영역을 작게 만들어야 하므로 광결합 효율이 떨어질 수밖에 없다. 이를 극복하기 위해 식각 공정을 통해 기판의 뒷면에 렌즈를 집적하여 후면 입사 방식을 채택하기도 한다(그림 1(b)). 렌즈를 통한 광신호의 후면 입사는 렌즈의 집광 효과뿐만 아니라 광검출기 전면부의 금속 전극에 의한 빛 차단도 제거하므로 반응도가 개선되어, 동작대역폭 35GHz, 1,310nm 파장대역에서 0.7A/W 이상의 반응도를 갖는다.

WGPD는 신호광이 입사하여 좁고 긴 광도파로 형태의 흡수영역을 진행하며 흡수되기 때문에 SIPD보다 좋은 동작 속도와 반응도 특성을 동시에 확보할 수 있는 구조이다. 따라서 광통신에서 40GHz 이상의 동작 대역폭이 요구된다면 WGPD가 가장 유리한 상황이다. 상용 제품으로 1,550nm에서 100GHz의 대역폭과 0.5A/W 반응도의 제품도 출시되어 있다.

WGPD의 광도파로가 광섬유보다 단면적이 작아서 발생하는 모드 간의 불일치와 광도파로의 얇은 형태가 유발하는 편광의존성을 억제해야 하므로 광모드 변환기가 필수적이며, 이 부분의 설계 및 공정에 높은 기술이 요구된다(그림 2).

광통신 전송용량의 증가를 위해서 기존의 세기

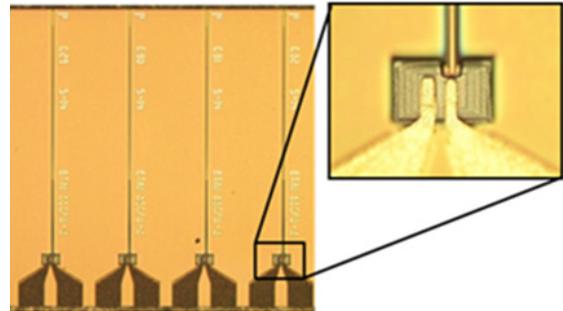


그림 3 광검출기 어레이

변조/직접 검출에서 위상 변조 또는 QAM/코히어런트 검출 혹은 PAM/직접 검출로 송수신 방식이 진화하고 있고, 따라서 광검출기도 단일 소자에서 어레이 소자가 사용되는 추세로 변화하고 있다.

위상 변조는 레이저 출력광의 위상에 신호를 실는 방식으로, 수신기에서는 기준광과 신호광을 간섭시켜서 위상 정보를 추출하기 위한 광하이브리드 부품과 광하이브리드에서 출력된 두 간섭광으로부터 위상신호를 추출하는 밸런스 광수신기가 필요하다. 밸런스 광수신기는 두 개의 광검출기에서 나온 전기신호의 차이를 출력해 주는 것으로, 두 전기신호를 입력받은 증폭기가 차이 신호를 생성하여 증폭하는 구도가 주로 사용되고 있다(그림 3).

데이터센터는 파장 다중화와 동시에 PAM4와 같은 멀티레벨 세기변조를 통해 전송용량 증대를 이루는 것이 주류로, 파장 역다중화 소자의 출력부에 광검출기 어레이를 결합하여 수신기를 구성한다. 현재 총 400Gbps를 위해 파장당 56Gbaud PAM4 신호를 4개의 파장에 각각 실는 방식이 채택되고 있고, 여기에 대응하기 위하여 35GHz의 대역폭을 가지는 광검출기가 요구되며, 이는 앞서 언급한 SIPD로 달성 가능한 속도이다.

장거리 광통신망에서는 현재 100Gbps 코히어런트 방식이 사용되고 있으며, 데이터 전송량의 증가

에 따라 향후 파장당 1Tbps까지도 요구할 것으로 예상된다. 이 경우 80GHz의 광검출기 대역폭이 필요하여 SIPD로는 대응하기 어렵고 대부분의 수신기에 WSPD 또는 반응도가 개선된 UTC-PD가 적용되어야 할 것으로 보인다.

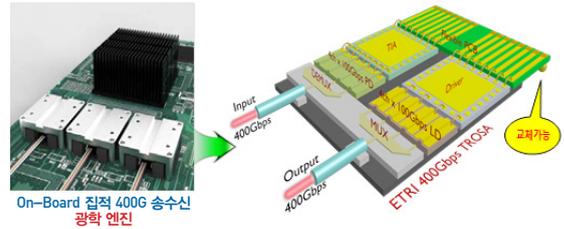


그림 4 400G 광학엔진 개념도

### 3. 광서브모듈

데이터센터 네트워크는 0.5~2km의 데이터센터 내부망이 주를 이루고 있으며, 10~40km의 데이터센터 간 연결망뿐만 아니라 최근 40~80km의 전송거리를 포함하는 데이터센터 인터커넥트(DCI: Data Center Interconnect)에 대한 통신수요가 증가하는 추세이다. 특히 5G, 에지 컴퓨팅, 자율주행차 등 저지연 서비스 수용을 위한 분산형 데이터센터의 도입이 진행되어 데이터센터 간 통신에 대한 수요는 급격히 증가할 것으로 예측된다.

400G 이더넷 통신에 대한 표준화가 IEEE 802.3bs에서 2017년 12월에 완료된 상태이고, 400G 이더넷에 대한 거리별 표준화 현황을 살펴보면 표 1과 같다[9]. 최근 100G Lambda MSA에서는 채널당 100Gbps 기반의 400G-DR4(0.5km) 및 400G-FR4(2km)에 대한 규격을 제정하였으며, 10km 전송을 위한 400G-LR4에 대한 규격화 작업을 진행 중이다[10]. 400G 표준에서 2km 및 10km

전송을 위하여 50Gbps PAM4 신호를 8채널로 전송하는 광트랜시버의 경우 라인카드의 faceplate에 장착하는 형태로 구현된다. 반면, 100G Lambda MSA의 규격인 400G-DR4 및 400G-FR4를 만족시키는 광모듈의 경우 채널당 100Gbps PAM4 신호를 4채널로 전송 시 발생하는 고주파 손실을 최소화하고, 포트 밀도를 극대화시킴과 동시에 전력소모 절감 및 저지연 동작이 가능하도록 그림 4와 같이 라인카드의 ASIC 스위치 칩 주변에 On-Board로 실장할 수 있는 400G 광학엔진 형태로 구현된다.

세계최대 광통신 학회인 OFC2019의 전시회에서 채널당 100Gbps 기반 4채널로 구성된 상용 400G 광트랜시버 및 광학엔진이 다수 출시되었으며, 향후 데이터센터 내의 폭발적인 통신수요를 해결하기 위한 수단으로 800G뿐만 아니라 1T급 이더넷 광모듈 개발의 필요성이 제기되었다. 주로 100Gbps PAM4 기반의 8채널로 구성된 모듈이 주를 이룰 것으로 예상되지만, 일부 메이저 연구소

표 1 400G 표준화 동향(IEEE 802.3bs)

Objectives	Baseline	Optical interface	Optical modulation	Fiber (Connector)
100m MMF	400GBASE-SR16	16fiber×25G	NRZ-00K	OM4 MMF Ribbon (MPO-16)
500m SMF	400GBASE-DR4	4fiber×100G	PAM-4	SMF Ribbon (MPO-12)
2km SMF	400GBASE-FR8	8λ×50G	PAM-4 (LWDM)	SMF (LC)
10km SMF	400GBASE-LR8	8λ×50G	PAM-4 (LWDM)	SMF (LC)

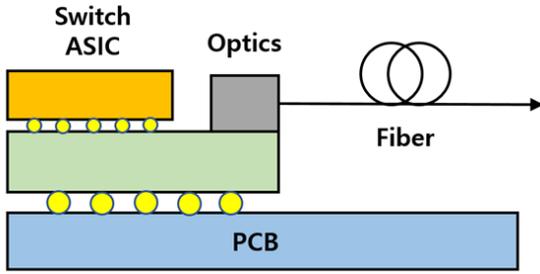


그림 5 Co-Packaged Optics 개념도

와 업체에서는 채널당 200Gbps PAM4 기반의 4채널로 구성된 광모듈 개발을 계획하고 있는 것으로 파악된다. 특히, 채널당 200Gbps PAM4 기반의 800G/1T급 이더넷 광모듈의 경우 초고속 신호 전송 시 발생하는 고주파 손실을 최소화하기 위하여 그림 5와 같이 ASIC 스위치 칩과 Optics를 함께 패키징하는 Co-Packaged Optics 형태로 구현될 것으로 전망된다.

800G/1T급[11] 이더넷 광모듈의 경우 초고속 및 다중변조 시 장거리 전송에 한계를 갖기 때문에 주로 2km 이내의 데이터센터 내부에 적용될 것으로 예상되며, 2km 이상의 데이터센터 간이나 DCI 전송 시에는 코히어런트 기반의 800G/1T 광모듈이 유리할 것으로 보이나 가격 이슈가 있는 상황이다.

### III. 광전달망용 광소자·부품 기술

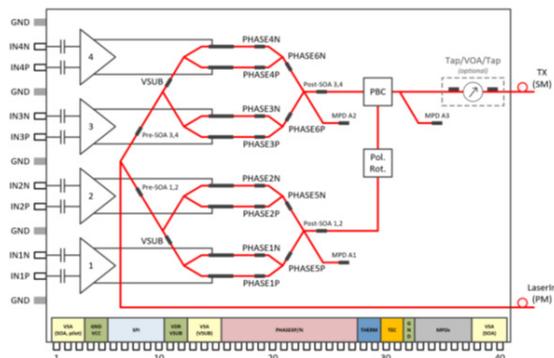
#### 1. 멀티레벨 광변조기

IQ 광변조기는 좁은 선폭을 갖는 파장 가변 레이저 광원과 더불어 코히어런트 광송신기 구성을 위한 핵심 광부품으로서, 외부에서 인가되는 전기 신호를 광신호로 변환하여 다시 외부로 내보내 주는 기능을 하는 광소자 칩이 필요하다. 코히어런트 광통신망에서는 일반적으로 편광다중화 방식이 적용되기 때문에, 각각 X-편광과 Y-편광에 대응하는 2개의 IQ 광변조기 소자가 같은 칩 상에 단일집

적되거나 개별 칩의 형태로 함께 패키징되는 이중 편광(DP: Dual Polarization) IQ 광변조기 부품이 필요하다[12].

상용 제품의 경우, 마흐젠더 광변조기 소자 칩 제작을 위한 광도파로는 전통적으로 LiNbO<sub>3</sub> 물질을 기반으로 제작되었으며, 지속적인 연구 개발을 통해 OIF에서 2017년 1월에 제정된 HBP-MQ-TX-01.0 규약을 만족하는 200G DP-QPSK와 400G DP-xQAM 전송 방식을 위한 DP-IQ 광변조기 제품이 출시되어 있다[13,14]. 심볼 전송 속도가 64Gbaud이고 3dB 주파수 대역폭은 35GHz 이상이며 마흐젠더 전극에 인가되는 구동전압은 4.2V 이하이다. 제품의 크기는 2개의 LiNbO<sub>3</sub> 기반 IQ 광변조기 칩과 편광 다중화를 위한 별도의 광부품들이 포함하면서도 81.7×12.5×6.5mm<sup>3</sup>로 소형화되어 있다.

OIF는 새로운 규약 HB-CDM-01.0을 2018년 11월에 제정하여, 그림 6과 같이 기능상 1개의 DP-IQ 광변조기와 4개의 광변조용 드라이버 칩을 광모듈 내에 포함하였다[15]. 한편, 심볼 전송 속도가 64Gbaud이므로 3dB 주파수 대역폭은 35GHz 이상으로 설정되어 있다. 드라이버 칩



출처 OIF, "Implementation Agreement for High Bandwidth Coherent Driver Modulator (HB-CDM)," OIF-HB-CDM-01.0, Nov. 2018. © 2018 Optical Internetworking Forum

그림 6 OIF-HB-CDM-01.0 규약의 광모듈 기능 개념도

이 내장되어 있어 마흐젠더 전극에 인가되는 구동 전압 규격은 없으나, 드라이버 칩의 차동 입력전압 범위와 광모듈의 최대 소비전력이 각각 300~600mVPP와 4.5W로 제한되어 있다. 그리고 HB-CDM 규약의 표준 광모듈의 최대 허용 크기는 55×13×5.5mm<sup>3</sup>로 앞에서 언급한 LiNbO<sub>3</sub> 기반 DP-IQ 광변조기보다 길이가 30% 이상 작다.

현재까지 OIF의 HB-CDM-01.0 규약을 준수한 광모듈 상용 제품은 출시되지 않은 것으로 파악된다. 일본 Fujikura사와 싱가포르의 Institute of Microelectronics는 2015년에 외형 및 기능 측면에서 이 HB-CDM 광모듈과 유사한 실리콘-포토닉스 기반의 드라이버 칩이 내장된 광변조기 모듈에 대한 제작 및 특성 평가 결과를 발표하였으며[16,17], 2017년에는 수직 PN 다이오드의 새로운 실리콘 포토닉스 광도파로 구조를 적용하여 마흐젠더 간섭계의 반파장 전압을 2.5V로 줄인 32Gbaud로 동작하는 단일집적 DP-IQ 광변조기 모듈 개발 결과를 발표하였다. 2018년에 일본 NTT사는 67GHz 이상의 매우 큰 3dB 주파수 대역폭 특성과 1.5V 이하의 반파장 전압 특성을 보이는 InP 기반 DP-IQ 광변조기 칩과 65nm CMOS 공정으로 제작된 드라이버 칩을 패키징하여 64Gbaud/16QAM 전송 결과를 발표하였다[18].

## 2. 파장 가변 광원

코히어런트 광통신에서 신호원으로 사용되는 파장 가변 레이저(Tunable laser)는 저잡음 및 고출력 특성을 가져야 한다. 빛의 위상을 조절하는 코히어런트 광통신 방식 특성상 레이저 발진 파장의 선폭이 좁아야 하고 또한 광출력은 전송단 및 수신단 양쪽으로 나뉘어 사용되기 때문에 매우 큰 출력이 필요하다.

통상적으로 요구되고 있는 파장 가변 레이저의 선폭은 수백 kHz 이하이고, 광출력은 16dBm 이상이며, 이러한 성능을 가지는 제품들이 출시되고 있다. 이와 더불어 파장 가변 레이저는 OIF에서 규정된 규약에 따라  $\mu$ -ITLA 형태로 소형화되어야 한다.

다양한 파장 가변 레이저로서, SG-DBR 레이저 기반 혹은 외부공진기형 파장 가변 레이저(T-ECL: Tunable-External Cavity Laser)가 대표적인 예이다. SG-DBR 레이저 구조는 파장 가변 레이저에서 많이 이용되고 있는 InP 기반의 SG-DBR 및 레이저 다이오드 등이 단일직접 되어 있는 형태로서, SG-DBR의 브라그 파장을 조절하면 광대역 파장 가변이 가능하며, 출력부의 SOA를 통하여 고출력이 가능하다[19]. 이러한 방식은 소형화에 장점이 있다. 반면 T-ECL의 경우는 외부에 파장 가변이 가능한 수동소자(링공진기 혹은 회절격자)를 광증폭이 가능한 이득칩(Gain chip)과 결합하여 레이저를 형성한 후, 외부 파장 가변 수동소자의 브라그 파장을 가변시키는 형태이다.

T-ECL의 경우는 최근 중요한 기술로 대두된 실리콘 포토닉스(Si-Ph) 칩을 이용한 연구결과들이 보고되고 있고, 그 성능 또한 점차로 향상되고 있다. 이 경우에서도 레이저의 출력부에 증폭용 SOA를 사용하여 출력을 100mW까지 증가시킨 예가 보고되었다[20]. 또한, Si-Ph 기반 링공진기 및 도파로 회절격자를 동시에 사용하여 출력 레이저 선폭을 500Hz까지 줄인 경우가 보고되었다[21]. 한편 gain chip의 경우, GaAs 기판상에 성장된 양자점 gain chip을 Si-Ph 링공진기와 결합한 연구결과도 보고되었다[22]. 전자통신연구원에서는 높은 이득이 가능한 InP-기반 gain chip과 폴리머 기반 도파로형 회절격자를 사용한 T-ECL에 관한 연구를 진행하여 C-band에서 출력세기를 60mW까지 향상시키고, 레이저 선폭을 210kHz 정도로 줄인

$\mu$ -ITLA를 제작하여 OFC 2019에서 발표한 바 있다[23].

상술한 바처럼 코히어런트 광통신에서 신호원으로 사용되는 파장 가변 레이저의 경우, 출력 100mW급 출력 및 수십 kHz 선폭을 가지는 연구들이 보고되고 있다. 최근에는 Si-Ph 기반 외부 파장 선택 소자를 이용한 선도적인 연구보고가 증가하고 있고, 향후 100mW 이상의 출력이 가능하며 동시에 선폭이 수 kHz 내지는 수백 Hz의 성능을 가진 파장 가변 광원 연구가 집중적으로 이루어져 상용화될 것으로 예상된다.

### 3. 코히어런트 광수신기

코히어런트 통신은 높은 수신감도와 대용량 통신 효율로 인해 기존에는 주로 장거리 통신에서 사용되었으나, 대도시를 중심으로 급격하게 증가하는 데이터 트래픽을 해소하기 위하여 매트로그램에 적용하고자 하는 요구가 증가하고 있다[24].

광네트워크 국제 표준 기구인 OIF에서는 이러한 요구에 부응하기 위하여 기능이 추가되고, 크기가 더 작고, 사양 분류가 다양해진 코히어런트 광수신기의 표준 문서를 추가로 발표하였다[25]. 코히어런트 통신은 이중편광 직교 위상 천이(DP-QPSK) 변조를 표준으로 하며, 하드웨어의 변경 없이 이중 편광 직교 진폭변조(DP-QAM)도 적용한다.

DP-QPSK 코히어런트 수신기 모듈은 수신된 광 신호에서 편광, 위상신호를 복조하고 광신호를 전기신호로 변환하여 출력하는 기능을 한다. 광신호에서 위상을 복조하기 위해서는 국부발진기(LO: Local Oscillator)가 필요한데, 이러한 코히어런트 수신기 모듈은 Intradyne 코히어런트 수신기(ICR: Intradyne Coherent Receiver)라고도 불린다. 수신기에 있는 LO는 송신단에서 보낸 Signal 신호와 서로

다른 광원을 사용하지만, 송신단의 광원과 수신단 LO 광원의 주파수를 동일하게 조절하면 두 신호의 주파수가 정합되어 위상이 복조될 수 있다.

ICR에 광신호가 입력되면 먼저 모니터용 광검출기(MPD: Monitor Photo Detector)와 가변광감쇄기(VOA: Variable Optical Attenuator)에서 광량이 일정하게 조절된다. MPD와 VOA는 필수 기능은 아닌데, 다양한 전송거리를 수용하는 매트로그램에 적용하기 위하여 2017년 OIF 표준[2]에서 추가되었다. 이후 편광분배기(PBS: Polarization Beam Splitter)에서 광신호를 서로 다른 2개의 편광 신호로 분리한다. 분리된 편광 신호는 2개의 90° 하이브리드 믹서(Hybrid Mixer)에서 각각 위상이 복조되고 차등신호로 출력된다.

복조가 완료된 차등 광신호는 광검출기를 통해 전기신호로 변환되고, 증폭기를 통해 모듈 외부로 전달된다. 이때 광검출기 소자, 증폭기, 전송선을 포함하는 모듈의 광전 삽입손실은 요구되는 전송속도에 따라 수십 GHz의 3dB 대역폭을 만족하도록 구성되어야 한다. 예를 들면 32Gbaud의 신호 전송을 위해서는 최소 18GHz의 광전 대역폭이 필요하며, 64Gbaud의 신호 전송을 위해서는 최소 36GHz의 광전 대역폭이 필요하다.

OIF 표준에 따르면 위 기능은 최대  $12 \times 25 \times 6 \text{mm}^3$ 의 작은 패키지 속에 구현되어야 하는데, 이를 만족하기 위해서는 광복조기와 광검출기가 효과적으로 집적되어야 한다. 광복조기는 자유공간 광학계(FSO: Free Space Optics) 또는 광집적회로로 구현할 수 있는데, 광집적회로는 광검출기와 함께 집적될 수 있어 더 유리하다. 광집적회로는 Si, InP, SiO<sub>2</sub> 기반의 광도파로로 형성될 수 있고, 광검출기는 Si와 InP 기반 기술로 형성될 수 있다[26-29]. 최근 상용화를 위한 저가격의 400Gbps급 코히어런트 광수신기가 개발되었다[30].

#### IV. 결론

광통신 네트워크의 핵심적인 분야인 데이터센터와 광전달망에서 요구되고 있는 차세대 초고속 광송수신 소자·부품 기술에 관하여 살펴보았다. 데이터센터는 수십 테라의 신호처리가 가능한 채널당 100Gbps 속도의 스위치 라인카드가 2020년 이후 데이터센터에 도입될 것으로 예측되어 이를 대비한 기술이 필요하다. 따라서 채널당 112Gbps의 데이터 전송을 위해 기존 25Gbps 동작 소자 대비 변조 속도 향상 및 고차 변조방식 수용이 가능한 초고속 반도체 광원 및 광검출기 등 광소자가 필요하다. 광전달망은 코히어런트 광신호 생성 및 검출을 위하여 편광 분리 및 결합, 위상 변조 및 복조의 광신호처리용 광소자·부품이 요구된다. 따라서 대용량의 광전달망 데이터 속도를 확보하기 위하여 위상 변조를 위한 초고속 I/Q 광변조기 및 위상 검출을 위한 광하이브리드 및 초고속 광검출기 기술이 요구된다. 해당 분야의 기술은 매우 빠른 속도로 진화를 거듭하고 있어, 핵심 요소인 초고속 광소자·부품에 대한 핵심원천 기술을 확보하여 상용화하는 노력이 필요할 시점이다.

#### 약어 정리

APD	Avalanche Photodiode
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
BER	Bit Error Rate
CDM	Coherent Drive Modulator
CDR	Clock and Data Recovery
CW	Continuous Wave
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DBR	Distributed Bragg Reflector
DCI	Data Center Interconnect

DFB	Distributed Feedback
DML	Directly Modulated Laser
DP	Dual Polarization
DSP	Digital Signal Processor
EAM	Electroabsorption Modulator
EML	Electroabsorption Modulated Laser
FSO	Free Space Optics
HB	High Bandwidth
ICR	Intradynne Coherent Receiver
IPTV	Internet Protocol TV
IQ	In- & Quadrature-Phase
ITLA	Integrable Tunable Laser Assembly
LD	Laser Diode
LO	Local Oscillator
MPD	Monitor Photo Detector
MQW	Multiple Quantum Well
MSA	Multiple Source Agreement
O/E	Optical to Electrical
OH	Optical Hybrid
OIF	Optical Internetworking Forum
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PBS	Polarization Beam Splitter
PCB	Printed Circuit Board
PPR	Photon-Photon Resonance
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QCSE	Quantum Confined Stark Effect
QPSK	Quadrature Phase Shift Key
SG	Sampled Grating
SIPD	Surface-Illuminated Photodiode
Si-Ph	Silicon-Photonics
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
T-ECL	Tunable-External Cavity Laser
UTC-PD	Uni-Traveling Carrier Photodiode
VOA	Variable Optical Attenuator

WGPD Waveguide Photodiode

ZB Zettabyte

## 참고문헌

- [1] Cisco, "Cisco Visual Networking Index, 2017-2022," 2018, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>
- [2] N. Sasada et al., "Wide-temperature-range (25 °C to 80 °C) 53-Gbaud PAM4 (106-Gb/s) operation of 1.3-mm directly modulated DFB lasers for 10-km transmission," ECOC'18 Proc., 2018, Th3F.3.
- [3] Y. Matsui et al., "55-GHz Bandwidth short-cavity distributed reflector laser and its application to 112-Gb/s PAM-4," OFC, 2016, Paper Th5B.4.
- [4] S. Kanazawa, T. et al., "Flip-Chip interconnection lumped-electrode EADFB laser for 100-Gb/s/l transmitter," Photon. Technol. Lett., vol. 27, no. 16, Aug. 2015, pp. 1699-1701.
- [5] S. Kanazawa et al., "214-Gb/s 4-PAM operation of flip-chip interconnection EADFB laser module," J. Lightw. Technol., vol. 35, no. 3, Feb. 2017, pp. 418-422.
- [6] W. Kobayashi, "Low-Power Consumption 28-Gb/s 80-km Transmission With 1.3- $\mu$ m SOA-Assisted Extended-Reach EADFB Laser," in JLT, vol. 35, no. 19, 2017, pp. 4297-4303.
- [7] M. Nada, Y. Yamada, and H. Matsuzaki, "Responsivity-Bandwidth Limit of Avalanche Photodiodes: Toward Future Ethernet Systems," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 24, no. 2, 2018, 3800811
- [8] H. Ito, T. Furuta, S. Kodama, and T. Ishibashi, "InP/InGaAs uni-travelling-carrier photodiode with 310 GHz bandwidth," Electron. Lett., vol. 36, no. 21, 2000, p. 1809.
- [9] <http://www.ieee802.org/3/bs/>.
- [10] <https://blogs.cisco.com/sp/100g-lambda-msa-group-adds-new-members-specifications>.
- [11] COBO-Lane & 16-Lane On-Board Optics Specification-Release 1.0, Feb. 26, 2018, pp. 1-82.
- [12] Matthias Seimetz, "High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission," Springer, 2009, p. 21.
- [13] OIF-HBPMQ-TX-01.0, "Implementation Agreement for High Bandwidth Integrated Polarization Multiplexed Quadrature Modulators," Jan. 19th, 2017. <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-HBPMQ-TX-01.0.pdf>
- [14] <https://www.fujitsu.com/jp/group/foc/en/products/optical-devices/index.html>
- [15] OIF-HB-CDM-01.0, "Implementation Agreement for High Bandwidth Coherent Driver Modulator (HB-CDM)," Nov. 30th, 2018. <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/2019/01/OIF-HB-CDM-01.0.pdf>
- [16] T.-Y. Liow et al., "128-Gb/s DP-QPSK Silicon Optical Modulator Module," Fujikura Technical Review, no. 44, 2015, pp. 30-34.
- [17] K. Goi et al., "Low-Driving-Voltage Silicon DP-IQ Modulator for 100G and Beyond," Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), Singapore, July, 2017.
- [18] J. Ozaki et al., "High-speed Modulator for Next-Generation Large-capacity Coherent Optical Networks," NTT Technical Review, vol. 16, no. 4, pp. 1-8.
- [19] M. C. Larson et al., "Narrow linewidth sampled-grating distributed Bragg reflector laser with enhanced side-mode suppression," The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition, 2015, paper M2D1.
- [20] N. Kobayash et al., "Silicon Photonic Hybrid Ring-Filter External Cavity Wavelength Tunable Lasers," Journal of Lightwave Technology Vol. 33, Issue 6, pp. 2015, pp. 1241-1246.
- [21] J. E. Bower et al., "Realities and challenges of III-V/Si integration technologies," The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition, 2015, paper M2D1.
- [22] K. Tomohiro et al., "Ultra-compact wavelength-tunable quantum-dot laser with silicon-photonics double ring filter," Applied Physics Express, Vol 8, 2015, 062701.
- [23] Dong Churl Kim, "Carrier Diffusion Effect in Gain Chip and 60 mW Tunable External Cavity Laser with Diffusion-Limited Gain Chip and Polymer-Based Waveguide Grating," The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition, 2019, paper W3A.7.
- [24] Lightwave, "Challenges and key technologies for coherent metro 100G transceivers," 2012.11.01
- [25] OIF, "Implementation Agreement for Micro Intradayne Coherent Receivers," 2017. 05. 21, <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/2019/01/OIF-DPC-MRX-02.0.pdf>
- [26] S. Farwell et al., "InP Coherent Receiver Chip with High Performance and Manufacturability for CFP2 Modules," OFC 2014, paper W11.6.
- [27] Y. Kurata et al., "Fabrication of InP-PDs on Silica-Based PLC Using Heterogeneous Integration Technique," J. Lightwave Tech., vol 32, no 16, 2014, pp. 2841-2848.
- [28] Y. Painchaud et al., "Ultra-compact Si-photonics DQPSK demodulator," OFC 2012, paper OM3J.3.
- [29] Z. Zhang et al., "Colorless, Dual-Polarization 90° Hybrid with Integrated VOAs and Local Oscillator on Polymer Platform," in OFC 2015, paper Th1F.3.
- [30] S. Y. Lee et al., "Cost-effective 400-Gbps micro-intradayne coherent receiver using optical butt-coupling and FPCB wirings," Opt. Express, vol. 26, no. 22, 2018, pp. 28453-28460.