데이터센터 통신용 광소자 및 광부품 기술 동향

Technology Trends of Optical Devices and Components for Datacenter Communications

한영탁 (Y.-T. Han, frenclin@etri.re.kr) 광통신부품연구실 책임연구원
이동훈 (D.-H. Lee, dhlee@etri.re.kr) 광통신부품연구실 책임연구원
김덕준 (D.-J. Kim, djkim@etri.re.kr) 광통신부품연구실 책임연구원
신장욱 (J.-U. Shin, shju@etri.re.kr) 광통신부품연구실 책임연구원
이서영 (S.-Y. Lee, sylee84@etri.re.kr) 광통신부품연구실 선임연구원
윤석준 (S.-J. Yun, yunseokjun@etri.re.kr) 광통신부품연구실 연구원
백용순 (Y. Baek, yongb@etri.re.kr) 광무선원천연구본부 책임연구원/본부장

ABSTRACT

Intra- and inter- datacenter data traffic is rapidly increasing due to the spread of smart devices, cloud computing, and non-face-to-face services. Recently, 400-Gbps optical transceivers based on 100-Gbps/channel have been released primarily by major overseas companies. Various solutions for next-generation datacenter interconnect are being proposed by international standardization and multiple source agreement groups. Following this trend, ETRI has developed a 400-Gbps optical transmission/reception engine using 100-Gbps/channel light sources and photodetectors as well as a silica-based AWG. In the future, technologies of optical devices and components for intra-datacenter communication are expected to be developed based on a data rate of 200-Gbps/channel. Thus, 1.6-Tbps class optical transceivers will be released.

KEYWORDS datacenter, light source, optical engine, optical transceiver, PAM4, photodetector

Ⅰ. 서론

최근 인공지능, AR/VR, IoT, 클라우드 등 대용량 데이터 서비스의 보급으로 데이터 트래픽이 급증함에 따라 데이터센터의 통신 수요가 폭발적으로 증가하고 있다. Cisco에서 예측한 자료에 의하면 데이터센터 트래픽은 매년 평균 27%씩 증가하는 추이를 보이고 있으며[1], 전 세계 클라우드 서비스 공급자들의 데이터센터 인프라 구축 규모가 급속히 확대되고 있다.

그 결과 Google, Arista 등 대형 데이터센터 운영 기업을 중심으로 400G 이더넷 기반의 12.8Tbps 스

* DOI: https://doi.org/10.22648/ETRI.2022.J.370205
* 본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행되었으며[2018-0-00220, 데이터센터 통신용량 증대를 위한 저전력 On-Board 집적 400Gbps 광송수신 엔진 기술], 또한 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행 중인 연구임[2021-0-00395, 데이터센터 내부 네트워크용 800Gbps 광트랜시버 기술 개발].

본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.
©2022 한국전자통신연구원

위치가 2020년을 기점으로 활발하게 상용화되는 가운데, 이더넷 스위치의 처리용량이 2년마다 두 배씩 증가하는 무어의 법칙에 따라 2022년부터 1RU당 25.6Tbps 속도를 수용할 수 있는 스위치가 도입될 전망이다. 이러한 추세에 따라 이더넷 기반의 대용량 스위치를 구현하기 위해 고밀도 장착이 가능한 테라비트급 저전력 광모듈의 개발에 대한 요구가 증가하고 있다.

기존 2~10km의 단일모드 광섬유를 이용한 400G 이더넷 규격의 경우, LWDM 또는 CWDM 기반 파장분할 다중화 방식을 통해 전송용량을 증가시키는 방식을 채택하고 있으며[2], 주로 이종 물질 간의 하이브리드 집적 또는 실리콘 포토닉스, InP 기반의 단일 집적 방식을 통해 구현되고 있다. 따라서, 800Gbps 이상의 테라비트급 광모듈을 구현하기 위해서는 기존 400Gbps 광모듈에 적용된 채널당 100Gbps 동작용 광소자 대비 변조속도 향상 및 고차 변조방식 수용이 가능한 초고속 반도체 광원/광검출기와 함께 초소형 WDM Mux/DeMux 소자뿐만 아니라 DSP칩을 활용한 고속 신호처리 기술이 필요하다.

본고에서는 데이터센터 내부 데이터 전송을 위한 채널당 100Gbps 이상급 광소자, 광부품, 광트랜시버 기술 동향을 살펴보고, 이와 관련하여 최근 수년간 ETRI에서 개발한 초고속 광소자 및 광부품 제작 기술을 소개한다.

II. 데이터센터 통신 동향

1. 데이터센터 네트워크 구조

데이터센터는 클라우드 컴퓨팅, 빅데이터 분석, 또한 사물인터넷 구현 시 필요한 대용량 데이터를 저장하고 처리하는 시설로서 Spine, Leaf, ToR, Server와 같은 스위치들로 구성된다.

2019년부터 400Gbps 광트랜시버가 데이터센터 내부망을 중심으로 본격 도입되고 있으며, 800Gbps 광모듈은 2022년경 25.6Tbps 대용량 스위치의 상용화와 함께 100m 이하의 Leaf-ToR 스위치 간 연결을 위해 PSM8의 형태로 도입될 전망이다[3]. 또한 500m~2km 구간의 Spine-Leaf 스위치 간 연결에는 주로 가격, 전력소모 측면에서 유리한 파장당 200Gbps, 4채널 기반 800G-DR4/FR4 광모듈이 활용될 것으로 예상된다[3].

2. 데이터센터 표준화 및 시장 동향

2017년 IEEE802.3bs를 통해 400G 이더넷의 표준화가 완료되었으며[2], 최근 100G Lambda MSA (Multiple Source Agreement)에서는 100Gbps × 4채널 CWDM 광인터페이스 기반의 400G-FR 및 400G-LR4 광트랜시버 표준을 제정하였다[4].

이더넷 스위치의 처리용량이 2년마다 두 배씩 증가하는 추세에 따라 향후 51.2Tbps/102.4Tbps급 대용량 스위치를 수용하기 위해 2023년경 200Gbps IM/DD 기술을 기반으로 한 800Gbps 및 1.6Tbps 이더넷 표준이 발표될 것으로 예상된다[5].

2019년 하반기 AOI, Fujitsu, Huawei, Marvell(구 Inphi), Lumentum 등의 해외 메이저 업체를 중심으로 800G Pluggable MSA가 결성됨에 따라 채널당 200Gbps 기반 800Gbps급 광트랜시버 개발이 본격화되었으며, 2021년 6월 800G-FR4 광트랜시버의 규격이 발표되었다[6].

2km 전송용 800Gbps 광트랜시버 규격의 경우 데이터센터 내부에서의 대량수요를 고려하여 저전력 소모, 저가화를 위해 열전냉각기를 적용하지 않는 CWDM4 파장규격을 따르도록 규정되어 있다[6].

현재 IEEE Beyond 400G Study group에서 파장당 200Gbps PAM4 기반 10km 전송용 800G-LR4

광트랜시버의 규격을 검토 중에 있다. 200Gbps PAM4 신호를 10km 전송 시에는 분산의 영향으로 인해 DSP칩에 필요한 소모전력이 증가할 것으로 예상되어, 열전냉각기 사용을 전제로 한 4.5nm 간격의 LWDM4 파장 대역이 채택될 것으로 전망된다[7].

전 세계 광트랜시버의 전체 시장규모는 2019년 77억 달러에서 2025년 177억 달러로 확대될 전망이며, 이중 데이터센터 통신의 연평균 20%의 급격한 성장으로 2025년에는 68%, 금액으로는 121억 달러에 이를 것으로 예측된다[8].

2016년 이후 현재까지는 100Gbps 광트랜시버가 주류를 이루고 있으나, 향후 데이터센터에서 25.6Tbps 스위치가 보급됨에 따라 400Gbps 및 800Gbps급 광트랜시버의 수요가 기하급수적으로 증가하여 2026년에는 전체 광트랜시버 매출의 약 61%를 점유할 것으로 전망된다.

Alibaba, Amazon, Meta(구 Facebook), Google 및 Microsoft 등 대형 클라우드 데이터센터 운영기업은 2026년 800Gbps급 이더넷 모듈에 총 18억 달러 이상을 투자할 것으로 예상되며[9], 2026년 이후 Google을 시작으로 1.6Tbps 기반 광모듈이 데이터센터에 도입될 것으로 예상된다.

더욱이 2024~2025년으로 예상되는 200Gbps SerDes 기반 이더넷 스위치가 도입될 경우, 1RU당 51.2Tbps 전송에 필요한 1.6Tbps 광모듈의 수요가 2025년 이후 증가할 것으로 예측된다.

Ⅲ. 데이터센터용 광소자 기술

1. 광원 소자

데이터센터 통신용 초고속 광원으로는 변조 전류를 반도체 레이저에 직접 인가하여 광신호를 출력하는 DML과 DFB 레이저에 전계흡수 변조기를 단일 집적한 EML이 사용되고 있다.

모드 볼륨이 작은 짧은 Cavity 구조와 미분 이득을 높인 InAlGaAs MQW 기술이 적용되어 변조대역폭이 20GHz 이상인 DML이 개발된 후 Lumentum, Finisar, NTT, AOI, Avago 등 메이저 업체들을 중심으로 25Gbps급 NRZ 및 50Gbps급 PAM4 DML 개발 및 상용화하였다. 2024년 이후 초기 시장이 형성될 것으로 예상되는 800G/1.6T급 광트랜시버 적용을 위하여 현재 채널당 100Gbps/200Gbps급 PAM4 DML이 연구되고 있다. 최근, Lumentum은 기존 광도파로보다 광구속 계수를 높여 40GHz의 높은 변조대역폭을 갖는 DML을 개발하였고, 112Gbps PAM4 신호 전송 결과를 발표하였다[10].

현재까지 보고된 일반적인 구조의 DML의 변조대역폭은 상온 기준으로 대략 40GHz 정도에서 한계를 보이고 있다. 반면 200Gbps급 신호 전송을 위하여 광원은 대략 60GHz 이상의 높은 변조대역폭이 요구되고 있다. 기존 DML의 대역폭 한계를 극복하기 위하여 외부 feedback 광을 이용한 Cavity 효과와 멤브레인 레이저 기술 등을 활용함으로써 최근 DML의 변조대역폭이 비약적으로 향상되었다. DFB-LD에 DBR을 집적한 DR(Distributed Reflector) 레이저와 수동 도파로가 집적된 DML에 3% 반사면을 증착한 DBR+R Laser는 각각 55GHz와 67GHz의 높은 변조대역폭을 보이며, 200Gbps급 DML 개발 가능성을 제시하였다[11,12]. 또한 NTT는 방열 특성이 우수한 SiC 기판에 InP 기반 멤브레인 레이저를 집적하여 변조대역폭이 105GHz이며, 256Gbps 신호전송이 가능한 초고속 DML을 구현하였다[13].

ETRI는 Ridge 도파로 구조와 InAlGaAs MQW를 사용하여 1,300nm 대역에서 동작하며 70℃에서 22GHz의 변조대역폭을 갖는 56Gbps PAM4 DML 칩을 개발하였다. 또한, PPR 효과를 이용함으로써

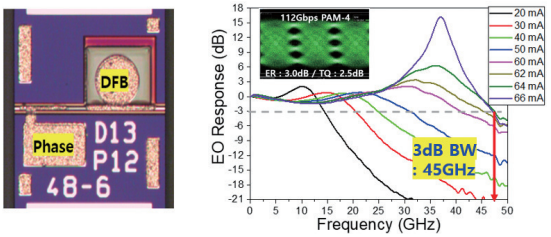


그림 1 PPR-DML 칩 사진 및 112Gbps PAM4 변조특성

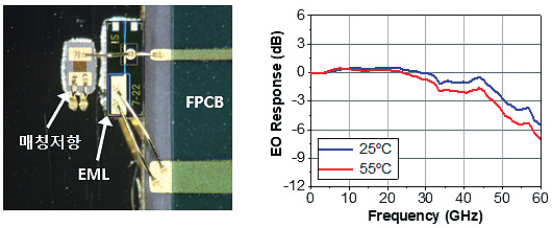


그림 2 100Gbps급 EML 서브모듈 및 변조대역폭 특성

45GHz의 변조대역폭을 갖는 PPR-DML 칩을 제작하여 그림 1과 같이 112Gbps PAM4 신호 변조에 성공하였다.

EML은 DFB-LD에 고속 변조가 가능한 EAM이 집적된 광원 소자이다. DML에 비하여 구조가 복잡하고 동작 파장 및 온도에 민감하여 가격이 높은 단점을 갖는다. 반면, DML에 비하여 높은 변조속도, 작은 색분산, 그리고 높은 소광비의 장점을 가지고 있어 대용량 장거리 전송 시스템의 광원에 적합하며, 현재 파장당 100Gbps 이상의 높은 전송속도가 요구되는 800Gbps/1.6Tbps 광트랜시버에 적용될 가능성이 높다.

EML에서 EAM은 Lumped형 또는 진행파형 전극 구조가 적용되고 있다. 진행파형 전극 구조 적용 시 높은 변조대역폭 확보가 용이한 반면[14], EML 칩의 크기가 크고 전극 구조가 복잡하다. 반면, Lumped형 전극은 전극의 기생 캐패시턴스뿐만 아니라 본딩 와이어의 기생 인덕턴스에 따라 변조대역폭의 제한을 받는 단점이 있으나, 칩 크기가 작고 공정이 단순하여 상용화에 유리하다.

최근 EAM에 반절연층과 유기 절연물질을 적용하여 기생 캐패시턴스를 낮추고, EAM 폭 및 길이를 감소시켜 변조대역폭을 증가시키고 있다. 짧은 길이의 EAM에서 높은 소광비를 확보하기에 용이한 InAlGaAs 양자우물 구조를 적용하였으나, 최근 Lumentum에서는 EML 칩의 신뢰성 특성이 InAlGaAs보다 유리한 InGaAsP 기반 EAM을 사용하여 67GHz의 높은 변조대역폭을 가지고 80℃에서 224Gbps PAM4 동작이 가능한 uncooled EML 칩을 발표하였다[15].

또한, EAM의 흡수 특성을 이용하여 신호를 변조하는 EML은 광출력이 낮은 단점이 있어 전송거리를 늘리기 위하여 SOA 집적 EML에 대한 연구도 진행되고 있다. NTT는 DFB-LD와 SOA 전류를 공유하는 간단한 방식의 SOA 집적 EML을 개발하여 106Gbps PAM4 동작 시 전송거리를 60km까지 늘렸다[16].

ETRI는 그림 2와 같이 InGaAsP MQW와 Lumped 전극 구조를 적용하여 상온에서 변조대역폭이 50GHz 이상인 100Gbps급 EML 칩을 개발하였다.

2. 광검출기 소자

데이터센터용 광검출기는 일반적으로 Si, Ge, SiGe, GaAs, InGaAs와 같은 반도체 물질이 광흡수 층인 여러 종류의 PIN 광다이오드들 중에서 광파장 대역, 광입사 방식, 3dB 대역폭, 광응답도, 소자의 크기 및 제작 비용 등을 고려하여 선정된다[17]. 제작 비용 및 Si 전자소자들과의 단일 집적 측면에서 장점이 있는 Si 광다이오드는 광흡수 차단 파장이 1,100nm 부근에 존재하기 때문에 다중모드 광섬유를 적용하는 850nm 파장 대역에서

는 사용 가능하지만, 단일모드 광섬유를 적용하는 O-band(1,260~1,360nm), C-band (1,530~1,565nm), L-band(1,565~1,625nm) 파장 대역에서는 사용되지 않는다. 그리고 Si 광다이오드와는 달리 소자 제작을 위해 Si 기판 표면에 단결정 에피층을 성장해야 하는 Ge 및 SiGe 광다이오드는 O-band 및 C-band 파장 대역에서 사용 가능하며, SOI 광도파로 기반의 파장다중화/역다중화기 또는 전기광학 변조기와 같은 Si 포토닉스 소자들과의 단일 집적도 가능하다. 그리고, GaAs 광다이오드는 광흡수 차단 파장이 870nm 부근에 존재하기 때문에 850nm 파장 대역에서 사용되며, InGaAs 광다이오드는 광흡수 차단 파장이 1,620nm 부근에 존재하기 때문에 O-band와 C-band는 물론이고 L-band 파장 대역까지 사용된다.

반도체 식각공정을 통해 형성된 원형 메사(Mesa) 구조에 존재하는 일반적으로 1μm 전후 두께의 광흡수 층을 신호 광이 관통하면서 광흡수가 발생할 경우 표면 입사형 광검출기라고 부르며 대부분의 상용 제품들은 표면입사형 광검출기이다. 이러한 표면입사형 광검출기에서는 광흡수 층이 두꺼울수록 신호 광의 흡수가 충분히 발생하여 광응답도가 증가하지만 반대로 전자/정공 캐리어들이 전극을 통해 빠져나가는 시간, 즉 캐리어 이동 시간도 함께 증가하여 3dB 대역폭 측면에서는 역효과가 발생할 수 있다. PIN 광다이오드의 경우 캐리어 이동 시간 이외에도 PIN 접합 정전용량이 3dB 대역폭을 결정하는 인자이므로 3dB 대역폭 향상을 위해서는 상기 메사의 직경을 작게 하는 것이 유리하다. 그러나, 메사 직경이 작아질수록 광섬유와 같은 광도파로의 종단에서 나오는 신호 광을 메사 내부로 입사시키기가 어렵게 된다. 따라서, 그림 3과 같이 광검출기 소자의 후면에 InP 재질의 볼록 렌즈를 형성하는 연구가 수행되었다[18,19].

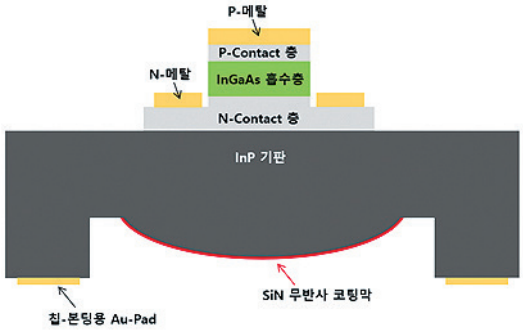


그림 3 후면 렌즈 집적형 InGaAs 광검출기 소자 칩의 단면 모식도

현재 미국 Macom, 스위스 Albis, 한국 Wooriro와 같은 일부 업체들은 InP 렌즈가 집적된 광검출기 제품들을 판매하고 있다. Albis사는 최근에 3dB 대역폭이 57GHz인 InP 렌즈 집적 초고속 광검출기 소자 신제품을 출시하였으며, 이 제품의 광응답도는 3dB 대역폭이 38GHz인 기존 제품의 0.8A/W보다는 작은 0.65A/W이다. 한편, ETRI에서도 그림 4와 같은 InP 렌즈가 집적된 InGaAs 기반의 초고속 광검출기 소자를 개발하고 있으며, 2019년에 메사 직경이 13μm인 경우에 40GHz의 3dB 대역폭이 얻어지며 렌즈의 직경 및 곡률반경의 최적화를 통해 0.65A/W의 광응답도가 가능하다는 실험 결과를 보고하였다[20].

InGaAs 광흡수층에 의도적으로 불순물을 첨가하지 않는 PIN 구조와 달리 광흡수층에 Zn와 같은 p-

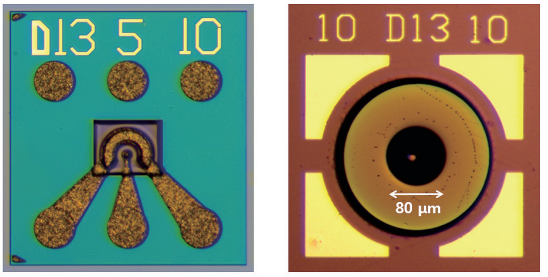


그림 4 후면 렌즈 집적형 InGaAs 광검출기 소자 칩의 전면부 및 후면부 사진

형 불순물을 첨가하는 UTC 구조는 3dB 대역폭 향상 측면에서 장점이 있다[21]. 그리고, Butt-Joint 또는 Evanescent 광결합 방식으로 광도파로의 신호 광이 광흡수층에 전달되는 도파로형 광검출기 소자는 광섬유와 광도파로 간 높은 광결합 효율이 보장된다면 기본적으로 광응답도 향상 측면에서 장점이 있다. 이러한 이유로, UTC 구조의 설계 개념이 도입된 도파로형 광검출기를 제작하여 71GHz의 3dB 대역폭과 0.90A/W의 광응답도 특성을 보고한 일본 Sumitomo Electric 사의 최근 연구 결과는 주목할 만하다[22].

3. WDM 파장다중화/역다중화 소자

최근 데이터센터 내·외부 네트워크에서 폭증하는 데이터를 수용하기 위하여 400Gbps급 광트랜시버가 도입되었으며, 향후 800Gbps 이상급 광트랜시버로 발전될 것으로 예측된다[23]. 이러한 광트랜시버의 경우 4채널 CWDM 소자가 광트랜시버 내 TOSA나 ROSA 모듈 크기의 절반 이상을 점유하고 있어 광트랜시버의 소형화의 관점에서 매우 중요한 소자이다.

기존 박막필터 방식의 CWDM 소자의 경우, 우수한 파장 아이솔레이션 특성에도 불구하고 데이터센터의 대량수요를 만족하기에는 채널 확장성이나 양산의 측면에서 어려움이 있다. 반면 PLC 기반 WDM 소자의 경우 반도체 생산 기술을 사용하고 광정렬이 비교적 용이하여 대량생산이 유리하고 가격 경쟁력을 갖추고 있어 최근에는 PLC형 CWDM 소자가 주로 사용되고 있다. 특히 데이터량의 증가 요구에 따른 8채널 이상 채널 확장성 및 소형화 측면에서 향후에는 대부분의 대용량 광트랜시버에 PLC형 CWDM 소자 또는 8채널 이상의 다채널 LWDM 소자가 적용될 전망이다.

PLC형 CWDM 및 LWDM 소자는 ㈜피피아이, ㈜네온포토닉스, ㈜우리로 등 국내 실리카 PLC 업체들이 다년간의 축적된 세계 최고 수준의 기술력으로 2019년 이후 Intel, Finisar 등 메이저 트랜시버 업체에 납품해 온 바 있다. 대용량 광트랜시버에서 데이터 전송용량 증가에 따른 WDM 소자 자체의 특성 변화 요구는 거의 없으나 수광 면적이 매우 좁아지는 고속 PIN-PD와의 정밀 광결합 요구가 발생한다. 따라서 400Gbps 이하 급의 광트랜시버에는 InP 렌즈가 집적된 고속 PIN-PD가 상용화되어 사용되고 있다.

그러나, 향후 800Gbps 및 1.6Tbps급 광트랜시버의 경우 소형이면서도 8채널 이상의 다채널 LWDM 소자가 요구될 것으로 전망되며, 특히 광수신부용 파장역다중화 소자의 경우 기존의 다중모드 출력 도파로 대신 도파로형 고속 PD와의 광결합이 가능한 단일모드 출력 도파로가 적용될 것으로 전망된다.

또한, 대용량 광트랜시버용 초소형 WDM에 대한 기술적 요구를 수용하기 위하여 최근 고농도 Ge, ZrO_2 도핑 실리카 코어 또는 SiN 도파로 기반 3~5%의 고굴절률차를 갖는 도파로를 이용한 고집적, 초소형 다채널 LWDM 개발이 진행되고 있다[24]. 특히 단일모드 출력 도파로가 요구되는 파장역다중화 소자 개발에는 저손실로 파장 평탄 특성이 가능한 다단 MZI 연결구조의 WDM 소자가 개발되고 있다[25].

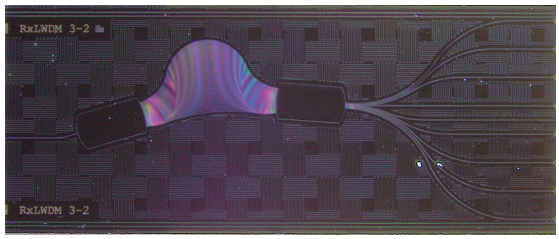


그림 5 2%-Δ 실리카 도파로 기반 LWDM8 AWG 파장다중화/역다중화 소자

그러나, MZI WDM 소자의 특성상 생산 과정에서 매우 정밀한 공정 제어가 필요하며, 아직까지는 제품의 특성이 불균일하여 생산수율 측면에서 어려움이 있는 것으로 알려져 있다. 최근 ETRI에서는 국내 실리카 PLC 업체와 협력하여 2%-Δ 기반 8채널 LWDM 소자를 개발한 바 있으며(그림 5), 향후 3%-Δ 실리카 도파로 및 SiN 도파로 등 고굴절률차 도파로를 이용한 초고집적 AWG 및 MZI WDM 소자 개발을 진행할 예정이다.

Ⅳ. 데이터센터용 광부품 기술

1. 광송수신 모듈(광학엔진)

데이터센터용 광트랜시버의 전송용량을 증가시키기 위해 높은 대역폭, 낮은 소모전력, 작은 크기를 동시에 만족시켜야 하며, 이를 달성하기 위하여 CPO 기술이 대두되고 있다[26].

CPO는 광소자(광원, 광검출기, 광회로 칩)와 전자소자(DSP 및 ASIC칩)를 단일 기판에 이종 집적하는 기술로, 초소형 패키지를 통해 RF 배선의 길이를 짧게 유지하여 불필요한 전자소자의 사용을 줄임으로써 열효율과 소모전력을 감소시킬 수 있다. CPO 기술을 사용하여 광소자가 ASIC의 바로 옆에 배치되면 DSP 칩을 사용할 필요가 없고 대역폭도 증가되어 고속으로 신호를 전송할 수 있다. CPO 기반 광모듈 적용 시 통신 지연은 50%, 소모전력은 66% 이상 감소하고, 단위 bit당 가격이 40% 낮아지며, 통신용 랙의 집적도 또한 50% 이상 증가될 수 있다[27].

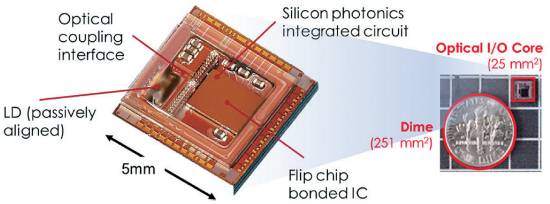
Meta(구 Facebook)와 Microsoft는 2019년에 모듈 생산하는 제조업체에 MSA를 제공해 주기 위한 CPO Collabration을 시작하였으며, Intel과 Cisco를 포함한 선도적인 통신장비 공급업체도 적극적으로 연구하고 있다[28]. 기술적으로 아직 극복할 사항이 있지만, 전문가들은 대략 2027년부터 CPO 모듈이 Pluggable 모듈을 대체할 수 있을 것으로 예측하고 있다[29].

이러한 CPO 기술은 실리콘 포토닉스 기술이 발전함에 따라 전자회로와 광회로를 이종집적하는 것으로부터 발전하기 시작하였다. 최근에는 실리콘 포토닉스에 국한되지 않고 각 업체마다 각자의 장점을 살려 실리콘, InP, GaAs, 실리카 재질의 광소자를 활용하여 다양한 CPO 모듈이 구현되고 있다.

인텔은 실리콘 포토닉스 칩, Driver/TIA 칩, SerDes 칩을 동일 기판에 집적하고, RF 배선과 PMIC 칩은 기판의 뒷면에 집적하는 실리콘 포토닉스 기반 광학엔진을 개발하였다[30]. 현재는 상용 driver 칩을 사용하여 채널당 53.125Gbps로 전송속도가 제한되었는데, 이 부분만 개선된다면 106.25Gbps PAM4 16채널(1.6Tbps)까지 동작할 것으로 기대된다[30].

일본 AIO Core 광학엔진의 경우 실리콘 포토닉스 기반 집적광회로 칩 자체를 기판으로 사용하였으며, 이종의 레이저는 실리콘 포토닉스 칩에 형성된 트렌치를 통해 광결합되었고 전기소자(Driver/TIA)는 그 윗면에 플립칩본딩으로 집적하였다. 이 광학엔진은 32Gbps NRZ 4채널로 구성되어 있으며, 2022년에는 50Gbps NRZ 4채널 모듈이 개발될 예정이다(그림 6)[31].

ETRI에서는 EML 광원, 광검출기, 2%-Δ 실리카 AWG, TIA IC를 집적하여 그림 7과 같은 400Gbps



출처 Reproduced with permission from [31], CC-BY 4.0.

그림 6 실리콘 포토닉스 기반 광학엔진(AIO Core)

그림 7 400Gbps 광송수신 엔진

광송수신 엔진(TROSA)을 개발하였다. 45GHz의 넓은 변조대역폭을 갖는 EML과 마이크로 렌즈가 집적된 40GHz급 광검출기를 2%-Δ 실리카 AWG 칩에 집적하였다. 또한, 광모듈 가격을 낮추기 위하여 일체형 flexible PCB를 적용하였고 송수신부가 단일 패키지에 집적된 TROSA 형태로 구현하였다.

2. 구동보드 및 광트랜시버

400Gbps 광트랜시버의 경우 Intel, II-VI, Cisco, Innolight 등 해외 업체를 통해 상용 시제품이 출시되어[32,33], 현재 Amazon과 Google, Microsoft를 중심으로 데이터센터에 활발히 도입되고 있다.

2021년 채널당 100Gbps SerDes가 개발됨에 따라 기존 8:4 DSP 기반의 400Gbps 광트랜시버를 대체하여 25.6Tbps 스위치를 수용할 수 있는 800Gbps 광트랜시버의 수요가 증가하고 있다.

2km 및 10km 전송용 800Gbps 광트랜시버의 경우 채널당 100Gbps PAM4 기반 8채널 CWDM 및 LWDM 광인터페이스를 기반으로 Innolight, Eoptolink, Source Photonics를 통해 개발되고 있으며 2022년부터 상용 시제품이 출시될 것으로 예상된다.

최근 800G Pluggable MSA를 통해 4 × 200Gbps 광인터페이스를 적용한 2km 전송용 800G-FR4 광트랜시버의 규격이 발표되었으며, QSFP-DD800 또는 OSFP 폼팩터를 통해 2023년경 시장에 출시

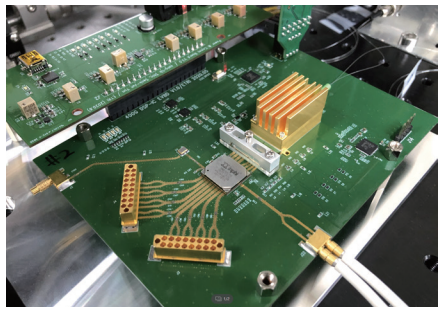


그림 8 DSP-IC 구동보드에 장착된 400Gbps 광송수신 엔진

될 것으로 예상된다[34]. 현재 OSFP MSA에서는 1.6Tbps 광트랜시버를 구현하기 위해 OSFP MSA 200G Working Group을 결성하여 채널당 200Gbps 전기 인터페이스를 수용할 수 있는 규격을 검토 중이며, 200Gbps급 SerDes가 도입되는 2024~2025년경 'OSFP 5.0'을 통해 1.6Tbps OSFP 폼팩터의 규격이 발표될 것으로 전망된다.

400Gbps 및 800Gbps급 광트랜시버의 개발 단계에서 채널당 100Gbps PAM4 기반 TOSA, ROSA, 및 TROSA 모듈의 고주파 특성을 제대로 평가하기 위해서는 구동보드에 모듈을 장착하여 DSP칩과 가깝게 배치한 상태로 특성을 평가할 필요가 있다. ETRI는 채널당 100Gbps PAM4 기반 광송수신 엔진의 고주파 특성을 측정할 수 있는 400G DSP-IC 실장형 구동보드를 제작하였으며, 그림 8

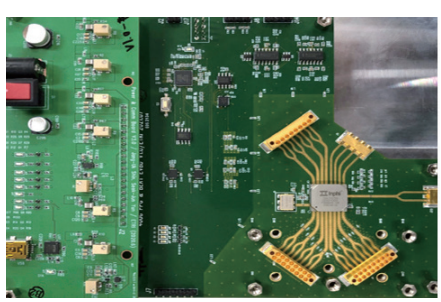


그림 9 400Gbps PPG & BERT 구동보드

과 같이 상기 구동보드에 400Gbps 광송수신 엔진(TROSA)을 장착한 상태에서 고주파 측성을 평가하여 400G-LR4(10km) MSA 규격을 만족하는 결과를 확보하였다[35].

또한, 2021년에는 상기 구동보드의 구조를 변경하여 44~58Gbaud 범위에서 PAM4 신호를 생성 가능하며, 송신부 및 수신부 DSP 기능을 통해 100Gbps급 PAM4 신호의 고주파 손실과 비선형성을 보상할 수 있는 400Gbps PPG & BERT 구동보드를 개발하였다(그림 9).

Ⅷ. 결론 및 데이터센터 전망

본고에서는 데이터센터 통신용 광소자 및 광부품에 대한 기술 동향에 대하여 살펴보았으며 최근 ETRI의 연구결과에 대하여 소개하였다.

데이터센터 연결 구간에서 코히어런트 광통신 기술을 이용한 테라비트급 신호전송이 가능하지만, 고가의 부품 및 복잡한 DSP 신호처리 문제로 데이터센터 내부 10km 이하 구간에서는 저전력 소모 및 저가화에 유리한 IM/DD 방식으로 테라비트급 광트랜시버가 구현될 것으로 전망된다.

Google과 Arista에서는 2024년경 1.6Tbps OSFP 광트랜시버의 도입을 데이터센터 로드맵에 제시하였으며, 200Gbps SerDes 기반 스위치가 상용화되는 2024~2025년 이후 3.2Tbps급 광트랜시버가 데이터센터에 도입될 것으로 예상된다.

최근 3.2Tbps급 광모듈의 유력한 후보로 CPO 기반 광모듈이 거론되고 있으나, CPO의 최대 이점으로 꼽히는 소모전력 측면에서 우위를 점하지 못할 경우 102.4Tbps 스위치 도입 시점에 교체성, 유연성, 유지보수 등의 측면에서 유리한 Pluggable 광트랜시버가 향후 테라비트급 광모듈 시장에서 우위를 점할 것으로 보인다.

용어해설

PAM4 기존 2-level 대비 4-level 광세기 변조 방식으로 심볼당 2-bit를 전송하는 방법

IM/DD 광신호의 세기 변조 및 직접 검출 방식

WDM 다수의 파장을 다중화하거나 다중화된 파장을 역다중화하여 광신호를 전송하는 기술

PLC 실리카, InP, 폴리머, 실리콘 기판 등에 광도파로가 형성된 평면광회로

LWDM 채널당 파장 간격이 4.5nm인 파장다중화 방식

CWDM 채널당 파장 간격이 20nm인 파장다중화 방식

약어 정리

AR	Augmented Reality
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
AWG	Arrayed Waveguide Grating
BERT	Bit Error Rate Tester
CPO	Co-Packaged Optics
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DeMux	DeMultiplexer
DFB	Distributed FeedBack
DML	Directly Modulated Laser
DR	Distributed Refelctor
DR	Datacenter Reach
DSP	Digital Signal Processing
EAM	Electro-Absorption Modulator
EML	Electro-absorption Modulated Laser
FR	Fiber Reach
IM/DD	Intensity Modulation/Direct Detection
InP	Indium Phosphide
IoT	Internet of Things
LR	Long Reach
LWDM	Local Area Network Wavelength Division Multiplexing
MQW	Multiple Quantum Well
MSA	Multiple Source Agreement
Mux	Multiplexer
MZI	Mach-Zehnder Interferometer
NRZ	Non Return to Zero

OSFP	Octal Small Form-factor Pluggable
PAM4	4-level Pulse Amplitude Modulation
PCB	Printed Circuit Board
PIN	Positive-Intrinsic-Negative
PLC	Planar Lightwave Circuit
PMIC	Power Management IC
PPG	Pulse Pattern Generator
PPR	Photon-Photon Resonance
PSM	Parallel Single Mode
ROSA	Receiver Optical Sub-Assembly
RU	Rack-Unit
SEM	Scanning Electron Microscope
SerDes	Serializer/Deserializer
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SOI	Silicon On Insulator
TIA	Transimpedance Amplifier
ToR	Top of Rack
TOSA	Transmitter Optical Sub-Assembly
TROSA	Transmitter Receiver Optical Sub-Assembly
UTC	Uni-Travelling-Carrier
VR	Virtual Reality
WDM	Wavelength Division Multiplexing

참고문헌

[1] Cisco, "Cisco global cloud index: Forecast and methodology, 2016-2021," White Paper, 2017.

[2] IEEE-SA Standards Board, "IEEE 802.3bs," 2017, http://www.ieee802.org/3/bs/

[3] 800G Pluggable MSA White Paper, "Enabling the next generation of cloud & AI using 800 Gb/s optical module," Mar. 2020.

[4] 100G Lambda MSA, http://100glambda.com/

[5] Ethernet Alliance, "2020 ethernet roadmap," https://ethernetalliance.org/technology/2020-roadmap/

[6] 800G Pluggable MSA, https://www.800gmsa.com/

[7] IEEE-SA Standards Board, "IEEE 802.3 beyond 400 Gb/s ethernet study," 2021, https://www.ieee802.org/3/B400G/public/21_08/

[8] Yole, "Optical transceivers for datacom & telecom," 2020.

[9] LightCounting, "Mega data center optics report," 2021.

[10] T. Nakajima et al., "106-Gb/s PAM4 operation of directly modulated DFB lasers from 25 to 70℃ for transmission over 2-km SMF in the CWDM range," in Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. Exhibition (OFC), (San Francisco, CA, USA), June 2021.

[11] D. Che et al., "Direct modulation of a 54-GHz distributed bragg reflector laser with 100-GBaud PAM-4 and 80-GBaud PAM-8," in Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), (San Diego, CA, USA), Mar. 2020, pp. 1-3.

[12] Y. Matsui et al., "Low-chirp isolator-free 65-GHz-bandwidth directly modulated lasers," Nat. Photonics, vol. 15, 2021, pp. 59-63.

[13] S. Yamaoka et al., "Directly modulated membrane lasers with 108 GHz bandwidth on a high-thermal-conductivity silicon carbide substrate," Nat. Photonics, vol. 15, no. 1, 2021, pp. 28-35.

[14] M. Chacinski et al., "Monolithically integrated 100 GHz DFB-TWEAM," J. Light. Technol., vol. 27, no. 16, 2009, pp. 3410-3415.

[15] S. Yamauchi et al., "224-Gb/s PAM4 uncooled operation of lumped-electrode EA-DFB lasers with 2-km transmission for 800GbE application," in Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), (San Diego, CA, USA), June 2021.

[16] T. Shindo et al., "High power and high speed SOA assisted extended reach EADFB laser (AXEL) for 53-Gbaud PAM4 fiber-amplifier-less 60-km optical link," J. Light. Technol., vol. 38, no. 11, 2020, pp. 2984-2991.

[17] Q. Cheng et al., "Recent advances in optical technologies for data centers: A review," Optica, vol. 5, no. 11, 2018.

[18] M. Makiuchi et al., "Easly manufactured high-speed back-illuminated GaInAs/InP p-i-n photodiode," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 6, 1991.

[19] Y. Lee et al., "High-performance PIN photodiodes with an integrated aspheric microlens," in Proc. OptoElectron. Commun. Conf., (Hong Kong, China), July 2009.

[20] 김덕준 외, "InP 렌즈가 후면에 집적된 표면입사 InGaAs 광다이오드 칩의 제작 및 특성평가," 제28회 광자기술학회 2019, (평창, 대한민국), 2019. 12, p. ThC4.

[21] N. Shimizu et al., "InP-InGaAs uni-traveling-carrier photodiode with improved 3-dB bandwidth of over 150 GHz," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 10, no. 3, 1998.

[22] T. Okimoto et al., "Photodiodes integrated with various functions for 100 GBaud coherent detection," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 28, no. 2, 2022.

[23] S. Routray et al., "The new frontiers of 800G high speed optical communications," in Proc. Int. Conf. Electron.,

Commun. Aerosp. Technol. (ICECA), (Coimbatore, India), Nov. 2020.

[24] F. Horst et al., "Cascaded mach-zehnder wave-length filters in silicon photonics for low loss and flat pass-band WDM multiplexing," Opt. Express, vol. 21, no. 10, 2013, pp. 11652-11658.

[25] M. Takahashi et al., "ZrO_2-SiO_2 based low loss ultra-high Δ PLC," in Proc. OECC/PS, (Kyoto, Japan), June 2013.

[26] C. Minkenberg et al., "Co-packaged datacenter optics: Opportunities and challenges," IET Optoelectron., vol. 15, no. 2, 2021.

[27] https://www.broadcom.com/info/optics/cpo

[28] http://www.copackagedoptics.com/

[29] https://www.vuassistance.com/will-co-packaged-optics-cpo-replace-pluggable-optical-module/

[30] S. Fathololoumi et al., "1.6 Tbps silicon photonics integrated circuit and 800 Gbps photonic engine for switch co-packaging demonstration," J. Lightw. Technol., vol. 39, no. 4, 2021.

[31] K. Kurata et al., "Silicon photonic micro-transceivers for beyond 5G environments," Appl. Sci., vol. 11, no. 22, 2021.

[32] Intel, "Intel 400G DR4 QSFP-DD optical transceiver," https://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/silicon-photonics/400g-dr4-qsfp-dd-optical-transceiver.html

[33] II-VI, "400G-LR8 QSFP-DD optical transceiver," https://ii-vi.com/product/400gbase-lr8-qsfp-dd-optical-transceiver/

[34] QSFP-DD800 MSA, http://www.qsfp-dd800.com/

[35] S.-J. Yun et al., "Hybrid-integrated 400G TROSA module and its performance evaluation using PAM4 DSP chip," in Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), (Washington, DC, USA), June 2021.