

파장가변 광원 개발 동향 및 응용

Trends in Wavelength-Tunable Laser Development and Applications

권오기 (O.K. Kwon, okkwon@etri.re.kr) 광융합부품연구실 책임연구원
김기수 (K.S. Kim, kimks1136@etri.re.kr) 광융합부품연구실 책임연구원/실장
권용환 (Y.-H. Kwon, yhkwon@etri.re.kr) 광무선연구본부 책임연구원/본부장

ABSTRACT

The integration of high-capacity terrestrial networks with non-terrestrial communication using satellites has become essential to support seamless low-latency services based on artificial intelligence and big data. Tunable light sources have been instrumental in resolving the complexity of channel management in wavelength division multiplexing (WDM) systems, contributing to increased network flexibility and serving as optical sources for long-distance coherent systems. Recently, these light sources have been applied to beam-steering devices in laser communication and sensing applications across ground, aerial, and satellite transport. We examine the utilization and requirements of tunable lasers in WDM networks and describe the relevant development status. In addition, performance requirements and development directions for tunable lasers used in optical interference systems and beam-steering devices are reviewed.

KEYWORDS beam-steering, ITLA, open ZR+, swept source, tunable laser, WDM, 빔 조향, 코히어런트 통신, 파장가변 광원, 홀음 광원

1. 서론

최근 인공지능, 빅데이터, 클라우드, AR/VR 등을 활용한 대용량 데이터 기반의 실시간 서비스 기술이 중요해짐에 따라 이를 지원하기 위한 초대용량, 초고속 지상 네트워크와 함께 통신위성을 활용한 초공간 통신이 결합되어 사실상 지상과 하늘을 연결하는 입체통신 기술이 필요해졌다[1].

이에 따라 네트워크 사업자들은 급증하는 통신 트래픽 수요를 충족시키기 위해 막대한 비용과 시간이 소요되는 광섬유 포설 대신 파장분할 다중방식(WDM: Wavelength Division Multiplexing) 및 코히어런트 전송(Coherent Transmission)과 같은 광 인터페이스를 채택하고, 이를 통해 다수의 채널과 높은 주파수 효율을 활용하여 지상 네트워크를 구축하고 있다. 동시에, 저궤도 위성 및 고고도 이동체를 기반

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2024.J.390105>

* 본 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신평가원의 지원을 받아 수행된 연구임[No. 2020-0-00847 (5G+기지국 프론트홀 기술 개발), No. 2022-0-00584 (400Gbps 코히어런트 광트랜시버 개발)].

* 표 5 분해능 10m => 10 μ m, 이미지 속도 [full 3D 5003 pixel] => [full 3D 500³ pixel] (2024. 2. 28. 수정)



으로 한 초공간 네트워크를 계획하여 통신 가능한 영역을 확대하고, 특히 재난 상황에서도 고품질, 저지연, 끊김 없는 대용량 서비스를 제공할 수 있도록 하고 있다.

광섬유 하나에 여러 파장을 동시에 전송하여 용량을 확대하는 WDM 방식은 초기에는 주로 장거리(LH: Long Haul)/도시간(Metro) 네트워크에 적용되었으며[2-4]. 이후에는 무선 통신 및 데이터센터 트래픽 수요를 충족시키기 위해 관련 네트워크로 확대되어 적용되고 있다[5-7]. 또한, 대용량 장거리 전송 기술인 코히어런트 멀티레벨 변복조 기술을 Metro 망을 경유한 데이터센터 간 연결(DCI: Data Center Interconnection)에 결합하여 수백 km까지 전송이 가능한 분산형 데이터센터 구현이 가능해졌다. 이러한 대용량 장거리 전송 네트워크 기술의 발전은 실로 파장제어가 용이하고, 코히어런트 통신에 적합한 광 전송 소자에 기반을 두고 있다고 할 수 있겠다.

운용 파장대에서 발진파장을 가변할 수 있는 파장가변 광원은 WDM 시스템의 고도화로 인한 채널 관리의 복잡성을 해결하고, 동적 채널 할당(Dynamic Channel Allocation)과 같은 기능을 통해 네트워크의 유연성을 높일 수 있다. 또한, 코히어런트 전송 시스템에서 멀티레벨 신호의 송수신용 광원으로 활용되고 있다. 최근에는 광 위상 배열(OPA: Optical Phased Array) 구성과 결합하여 지상, 항공, 위성 운송체의 레이저 통신 및 탐색에 적용되는 빔 조향기의 광원으로 주목받고 있다[8-10].

본고에서는 WDM 기반의 통신 네트워크에서 파장가변 광원의 활용과 관련 요구사항을 검토하고, 해당 기술의 개발 현황을 소개한다. 또한, 빔 조향기를 비롯한 파장가변 기능이 활용되고 있는 응용 분야를 살펴보고, 이러한 기술의 성능 요구사항과 향후 개발 방향에 대해 검토하기로 한다.

II. 파장가변 광원 활용

파장가변 광원은 통신 네트워크의 성장과 다양성과 밀접한 관련이 있으며, 파장가변 동작은 정적과 동적 두 가지 측면에서 나누어 볼 수 있다. 정적 동작은 광원의 파장이 사용 중에 설정된 후에 시간이 흐르더라도 변경되지 않는 방식으로, 주로 파장 고정 광원의 대체로 활용된다. 반면에 동적 동작은 광원의 파장을 시간에 따라 변경하여 원하는 채널로 할당하는 능동적인 기능으로, 시스템 요구에 맞게 다양하게 활용될 수 있다. 이 장에서는 정적 활용 분야로는 수동형 WDM 네트워크, 동적 활용 분야로는 능동형 WDM 기반 코히어런트 네트워크에서 파장가변 광원의 활용과 요구사항을 검토하기로 한다.

1. 정적 활용 분야

정적 동작은 주로 송수신단 사이에 다중화/역다중화기가 배치된 수동형 WDM 네트워크에서 활용된다. 수동형 WDM 네트워크는 채널 확장이 용이하고, 신호의 프로토콜에 투명하여 그동안 DWDM(Dense WDM) LH/Metro[11], WDM-PON(Passive Optical Network)[12] 등 다양한 광 인터페이스에 적용되어 왔다.

그림 1은 수동형 WDM 네트워크 기반의 5G-RAN(Radio Access Network)의 구성도를 나타낸다. 여기서, 기저대역 신호의 실시간 처리를 담당하는 DU(Distribution Unit)와 무선 송수신부인 RU(Radio Unit) 사이를 MFH(Mobile Front Haul)로 정의하고 있다. MFH은 20km 이내의 SMF(Single Mode Fiber) 링크에서 터미널 내에 장착된 채널들을 통해 사용자 데이터 신호와 관리/제어/동기 신호 등을 디지털 프레임화하여 전달한다. MFH 통신 규격으

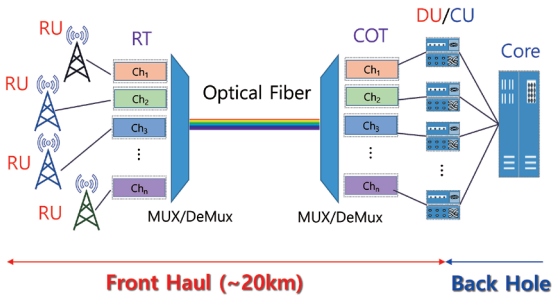


그림 1 수동형 WDM 기반 5G-RAN 구성도

로는 CPRI(Common Public Radio Interface)[13]와 5G의 요구사항을 반영한 eCPRI(evolved CPRI)[14]가 사용되고 있다. 한편, 고밀도 전송을 위해 국내에서는 다양한 WDM 기반의 광 인터페이스가 운용 중에 있다. 특히, 넓은 파장대역에서 고밀도 채널 운용을 위해 CWDM(Coarse WDM)[15] 기반에서 서브채널을 정의한 방식이 제안되어[16], SK Telecom의 4G-LTE(-A) MFH 시스템에서부터 상용화되어 운용 중이다. 여기서, 서브채널 수와 간격은 CWDM 채널 슬롯에 따라 세분화되어 정의되어 있다.

4G MFH 시스템에서는 CPRI 옵션 3/6에 대응하는 2.458/6.144Gbps 신호로, 총 96개의 서로 다른 파장을 갖는 파장고정 광원으로 운용되었다. 그러나 이러한 시스템에서는 재고 관리와 시스템 확장에 일부 어려움이 있었으며, 파장가변 광원으로 교체할 경우, 운영 파장 범위 내에서 동종의 모듈 사용으로 재고량과 관리 비용을 감소시킬 수 있고, 채널별로 정밀한 파장 조절이 가능하므로 채널 간격을 축소시킬 수 있어 더 많은 서브채널을 추가할 수 있다. 더불어, 파장가변 기능을 통해 네트워크의 효율적인 운영과 관리가 가능하며, 파장별로 성능을 다양화시켜 맞춤형 서비스를 제공할 수 있다.

5G MFH에서는 현재 10/25Gbps(옵션 7/10) 속도의 파장가변 광모듈이 적용되고 있으며[17], 이를

위한 파장가변 광원의 주요 요구사항은 기존 파장고정 광원과 동등한 성능과 함께 장기간 신뢰성을 필요로 한다. 가능한 한 정도의 가격은 파장고정 광원에 비해 최대 20%의 프리미엄으로 알려져 있다.

최근에는 MFH에서 전송용량을 증가시키기 위해 PAM-4(Pulse Amplitude Modulation-Level 4) 변조 기술을 활용한 50Gbps급 속도의 파장가변 광원 칩[18,19]을 사용한 광모듈과 시스템 기술이 개발되어 대용량 MFH의 구현이 기대되고 있다. 연구 수준에서는 100Gbps PAM-4 파장가변 칩[20]과 200Gbps PAM-4 파장고정 칩[21]이 보고되었으며, 최근에는 400Gbps PAM-4에 대한 연구도 진행 중이어서 계속해서 고속 변조가 가능한 광원 연구가 이어질 것으로 예상된다. 또한, 관련 네트워크에서는 향후 개방형 RAN 구성[22] 및 6G 지원을 위한 효율적인 MFH 구성과 네트워크 진화에 파장가변 광원이 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

2. 동적 활용 분야

파장가변 기능의 동적 동작은 주로 Metro 네트워크의 ROADМ(Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexing)과 가입자 네트워크의 NG(Next Generation)-PON2(Passive Optical Network 2)에서 광 네트워크 단말장치인 ONU(Optical Network Unit)에 활용된다.

이러한 시스템에서 동적 동작을 통해 다양한 파장으로 신호 전송이 가능해지므로 네트워크의 유연성이 향상되며, 파장 할당과 함께 파장별 대역폭도 동적으로 할당할 수 있어서 효율적인 운용과 관리가 가능하다. 또한 시스템 업그레이드와 확장이 수월하며, 특정 파장에서 장애가 발생할 경우 다른 파장으로 전환할 수 있어 네트워크의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 이를 위한 파장가변 광원의 요구조건으로

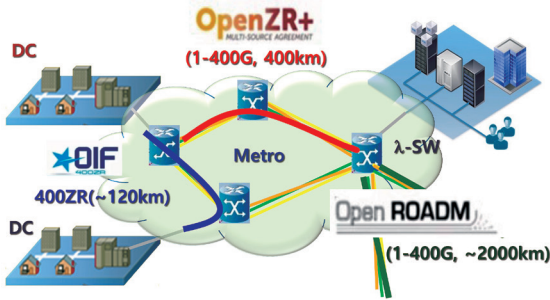


그림 2 DCI/Metro 네트워크 구성도

는 운용 파장 범위 내에서 충분한 광출력과 파장 안정성이 필요하며, 특히 Metro 네트워크의 경우, 장거리 전송 후 높은 신호 품질을 유지하기 위해 저잡음/저선폭 특성이 요구되며, NG-PON2 ONU에서는 광원의 가격이 중요한 이슈가 된다.

Metro 네트워크에서는 트래픽 관리와 네트워크 운용의 효율성을 극대화하기 위해 관련 협의체

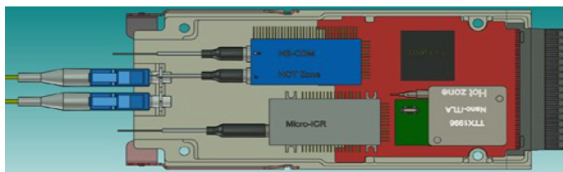
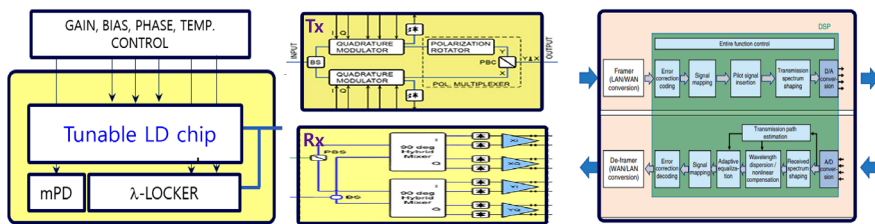
표 1 코히어런트 400G MSA 명세

Content	400ZR	OpenROADM	OpenZR+
Target Application	Edge DCI	Carrier ROADM Mesh	Regional/LH DCI & carrier
Client traffic	400GbE only	100~400GbE, OTN	100~400GbE, Multirate
Reach @400G	120km	500km	~400km
Form factor	QSFP-DD /OSFP	CFP2 or other	QSFP-DD /OSFP
SD-FEC	CFEC	oREC	oFEC
Max Pwr consumption	15~20W	20~26W	18~20W
Standards /MSA	OIF	OpenROADM MSA	OpenZR+ MSA

출처 Reproduced from [25].

인 OpenROADM MSA(Multi-Source Agreement)에서 CDC(Colorless, Directionless, Contentionsless) 기능과 유

Micro/nano-ITLA (~0.1MHz, full C-band) **400G/λ IC-TROSA** (~60Gbd 16QAM) **Coherent DSP** (Serdes/FEC/DSP/ADC&DAC)



400G CFP2 DCO
(41.5 × 107.5 × 12.4 mm³)
[400G Open ROADM]

QSFP-DD
(18.35 × 89.4 × 8.5 mm³)
[OIF 400ZR/OpenZR+]

그림 3 400G 코히어런트 광트랜시버 모듈 구성

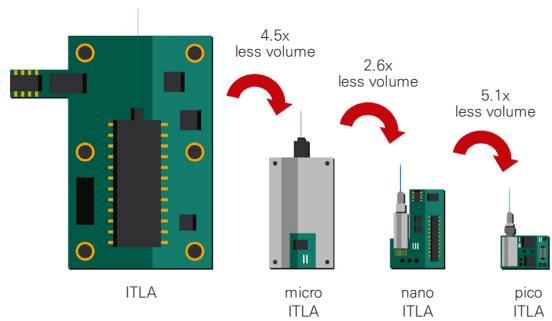
표 2 Micro- 및 Nano- ITLA의 명세

Item	Micro ITLA	Nano ITLA
Tuning range	Full C-Band (1,528~1,564nm)	Full C-Band
Optical output	16dBm	17dBm
Spectrum linewidth	< 300kHz	~100kHz
Frequency accuracy	< ±1.5GHz	< ±1.5GHz
Power consumption	4.5W	3.0W
Size	37.6×20×7.5mm ³	25×15.6×6.7mm ³

출처 Reproduced from [27,28].

연한 채널 간격을 갖는 ROADMs을 100~400GbE 및 OTN(Optical Transport Network)에 대해 인터페이스 규격화해 왔다[23]. 한편, OIF(Optical Inter-Networking Forum)에서는 대용량 코히어런트 기술이 LH/Metro 분야에서 시장 잠재력이 큰 DCI/Metro로 확대되고 있는 점을 고려하여, 표 1과 같이 코히어런트 기반의 400GbE 광 인터페이스 규격인 400ZR[24]을 OpenROADM 규격과 결합하여, 상호 운영이 가능한 OpenZR+로 표준화하였다[25]. DCI/Metro 네트워크 구성도는 그림 2에 나타나 있으며, 최근에는 향상된 기능과 확장성이 포함된 버전 3.0으로 2023년 9월에 발표되었다[26].

400G 코히어런트 광트랜시버는 그림 3에서와 같이 파장가변 광원이 포함된 ITLA(Integrated Tunable Laser Assembly), 코히어런트 송수신 모듈인 IC(Integrated Coherent)-TROSA(Transmit Receive Optical Sub-Assembly), 그리고 신호처리부인 코히어런트 DSP(Digital Signal Processor)로 구성된다. 코히어런트 광트랜시버는 응용별로 규격화된 형태로 구현되며, 여기서 ITLA는 IC-TROSA의 송신단 연속파(CW: Continuous Wave) 광원과 수신단 국부발진기(LO: Local Oscillator) 광원으로 활용되고, 요구 성능은 표 2의



출처 Reproduced with permission from [29].

그림 4 ITLA별 부피 변화

Micro-와 Nano-ITLA MSA 규격에 따른다[27,28].

ITLA는 그동안 성능이 향상되면서 동시에 적은 부피와 소비전력을 가지도록 개발되어왔다. 특히 최근에는 그림 4에서 나타낸 바와 같이 QSFP28(Quad Small Form Factor Pluggable 28)에 맞춰 부피와 소모전력을 더욱 낮춘 Pico-ITLA 제품도 연구 개발되고 있다.

파장가변 광원의 동적 동작에는 파장 스위칭 시간이 활용에 있어서 중요한 변수가 된다. Metro 네트워크의 광신호 교차 연결 기능인 OXC(Optical Cross-Connect) 구성에서 실시간으로 파장 스위칭을 통해 파장 차단을 피할 수 있고, OPS(Optical Packet Switching) 네트워크에서 데이터 패킷(Packet)에 따라 파장을 할당한 후 라우팅(Routing)시켜 신호의 광 경로를 설정하거나 변경시킬 수 있어, 기존의 동일한 기능의 광-전기-광 인터페이스를 상당 부분 줄여 시스템을 간단하게 구현시킬 수 있다.

ITU-T G. 989.2(NG-PON2)에서는 파장 스위칭 시간을 표 3에 나타난 대로 클래스별로 구분하여 응용 범위와 기능을 규정하고 있다[30]. Class 1의 경우, OLT(Optical Line Terminal)의 전송 시간 및 지속 시간 외에도 ONU의 전송 파장을 동적으로 제어하여 전송 기간에 파장 변경을 허용할 수 있도록 동적

표 3 클래스별 파장 스위칭 시간

클래스	스위칭 시간
1	< 10 μ s
2	10 μ s to 25ms
3	25ms to 1s

출처 Reproduced with permission from [30], © ITU.

파장 및 대역폭 할당 기능이 제공된다. Class 2는 동적으로 부하 분담 및 동적 전력 절약 기능에 활용되며, Class 3는 파장가변 동작 대신 짧은 서비스 중단 등 채널 보호용으로 응용될 수 있다.

III. 파장가변 광원 개발 현황

파장가변 광원은 다양한 활용 분야에 맞게 다양한 방법과 구성으로 개발되어 왔으며[31-54] 동시에 경쟁했기 때문에, 성능뿐만 아니라 독창성, 경제성, 신뢰성 등과 같은 요소도 중요한 이슈가 되었다. 파장가변 광원은 다양한 관점에서 분류될 수 있으며, 협대역 광원은 파장가변 방식에 크게 의존하는 반면, 광대역 광원은 가변 범위를 확장하기 위한 별도 구성이 필요하므로, 이 장에서는 현재 통신망에서 활용 중인 광원을 중심으로 파장가변 방식과 광대역 구성으로 구분해서 개발 현황을 소개한다.

1. 파장가변 방식

파장가변 광원을 광이득부와 파장선택부가 결합된 공진기 형태로 볼 때, 파장선택부의 동작에 따라 열적, 전기적, 기계적 방식으로 나눌 수 있다. 통신용 광부품에서는 소형화와 장기간 신뢰성과 같은 요소가 중요한 고려 사항으로 기계적 방식은 일반적으로 선호되지 않으며, 여기서는 열적 방식과 전기적 방식에 대해 설명한다.

가. 열적 파장가변 방식

열적 방식은 LD(Laser Diode) 칩 마운트 하단에 장착된 TEC(Thermal Electric Cooler) 온도를 변화시키는 방법[33]과 LD 칩에 별도의 마이크로 히터를 구현시켜 활용하는 방법[34]이 보고되었다. TEC를 활용한 방법은 LD 칩의 구조를 변경하지 않고도 파장을 가변시킬 수 있는 가장 간단한 방법으로, 기존 상용 칩의 구성과 성능을 그대로 활용할 수 있어 DFB(Distributed Feedback)-LD와 같은 파장고정 광원에서 많이 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 온도 변화에 따른 광출력 감소 문제와 낮은 파장가변율(약 0.1nm/°C)로 인해 파장가변 범위가 5nm 이내로 제한되며, 전체 칩의 온도가 변경되므로 구동 전력이 높고 파장가변 속도가 느린 문제가 있다.

마이크로 히터를 활용한 방법은 칩 상단에 금속 패틴을 형성하여 도파로에 국부적으로 주울열을 발생시키는 방법이다. 이 방법은 TEC 방법에 비해 구동 전력을 상당히 낮출 수 있으며, 상대적으로 빠른 응답속도를 가지고 있어 Class 2의 응용 분야에 활용할 수 있다[35]. 특히 DBR(Distributed Bragg Reflector)-LD의 히터 동작 영역인 파장선택부는 광이득부와 공간적으로 분리되어 있어서 발진 특성에 영향을 최소화하면서 높은 온도까지 구동시킬 수 있다. 마이크로 히터에서 발생한 열을 효과적으로 차단할 수 있는 구성을 활용하면, 적은 전력으로 O-band에서 15nm 이상, C-band 대역에서 40nm까지 파장가변 범위를 얻을 수 있는 것으로 보고되어 있다[36,37].

나. 전기적 파장가변 방식

전기적 방식은 광도파로의 코어층에 전류 주입 및 전압 인가를 통해 매질의 굴절률을 변화시키는 방식으로, 주로 플라즈마 효과(Plasma Effect)[38]와 전기-광학 효과(Electro-Optic Effect)[39]가 사용된다.

표 4 파장가변 방식별 특성

가변 방식	구성	구동 전력	스위칭 속도	특징
열적	TEC	> 1W 높음	> 1ms class 2/3	구현간단 좁은 파장가변
	마이크로 히터	> 0.1W 보통	< 500 μ s class 2	저전력 구동
전기적	플라즈마	< 0.1W 낮음	< 1 μ s class 1	노이즈 증가
	전기광학	< 0.05W 매우 낮음	~ 50ns class 1	낮은 굴절률 변화

출처 Reproduced from [39].

플라즈마 효과는 전하 유도에 의한 매질 굴절률 변화 현상[40]에 기인하며, 전하 수명시간(Carrier Lifetime)급의 응답 속도(ns~ps)와 저전력 동작이 가능한 장점을 가지고 있다. 플라즈마 효과의 파장가변 범위는 대개 O-band에서 2~3nm, C-band에서 10nm 이내로 제한되며, 코어층의 물질 밴드갭을 동작 파장에 가깝게 가져가면 굴절률 변화를 크게 할 수 있어 가변 범위를 높일 수 있지만, 광흡수 증가로 인해 광출력이 낮아지는 문제가 있다. 또한, 전하에 의한 잡음 발생으로 구동 시 선폭이 증가하므로 [41], 저선폭 구현을 위해서는 별도의 구성이 요구된다.

전기-광학효과는 외부전계에 대한 유전체의 응답 특성으로 표 4에 나타낸 바와 같이 스위칭 속도와 구동전력은 가장 우수하며, 열 혹은 전하에 의한 잡음 발생원이 없어, 저선폭 광원 구현과 함께 신뢰성과 안정성이 보장되는 방법이다. 그러나 굴절률 변화량이 매우 낮아서 파장가변 광원 구현 시 별도의 구성이 요구된다[39].

2. 광대역 파장가변 구성

광대역 파장가변 구성은 미국, 일본, 유럽의 주요 메이저 광부품 업체에서 독자적인 기술을 기반으

로 상용화된 기술로, 크게 다채널 어레이, 버니어 효과(Vernier Effect), 그리고 외부 공진기 형태로 구분된다. 광통신 시장에서는 요구 성능을 충족시키면서 소형화와 저전력 소모에 이점이 있는 단일 칩 형태가 주로 채택되고 있다. 이 절에서는 집적형 다채널 어레이와 버니어 효과를 기반으로 한 광원에 대해 자세히 설명한다.

가. 집적형 다채널 어레이

광대역 파장가변을 위해서 서로 다른 파장 범위를 갖는 다수의 협대역 LD를 광결합기로 묶어 하나의 출력포트로 구현하는 다채널 어레이를 도입할 수 있다. 개별 채널의 파장가변 동작은 앞서 언급한 열적 및 전기적 방식을 통해 조절할 수 있으며, 그동안 다양한 형태가 개발되었다. TEC 구동의 DFB-LD 어레이[42], DFB 구성에 광이득부와 가변부를 교대로 배치한 구성으로 연속 파장가변이 가능한 TDA(Tunable Distribution Amplification)-DFB-LD 어레이[43,44], 짧은 공동(SC: Short Cavity)을 활용하여 넓은 공동모드(Cavity Mode) 내에서 연속 파장가변을 구현한 SC-DBR 어레이[45], 도파로형 회절격자 구성에서 광편향기와 채널별 이득 도파로가 단일집적된 형태의 MGCL(Multichannel Grating Cavity Laser) [46] 등이 보고되었다.

다채널 어레이 구성은 성숙한 DFB/DBR-LD 기술을 활용할 수 있고, 한 번에 한 채널만 동작하므로, 어레이 간격을 줄여 결합기와 단일집적 형태로 개발할 수 있어, 주로 일본 업체에서 개발되었다 [42-45]. 그러나 결합기의 높은 분기 손실로 인해 출력단에 고이득의 광증폭기(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)가 필요하며, 단일채널 파장가변 광원에 비해 소자가 크고, 다수의 채널로 인한 복잡한 구성으로 가격이 높고, 전력 소비량이 높은 문제가 있다.

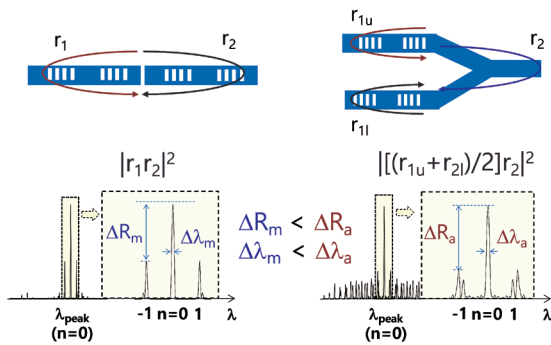


그림 5 MV(좌)와 AV(우)의 반사기 구성(상단)과 중첩 시 반사스펙트럼 해석 결과(하단)

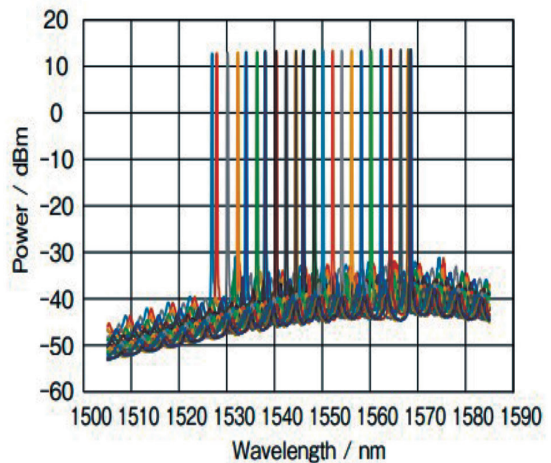
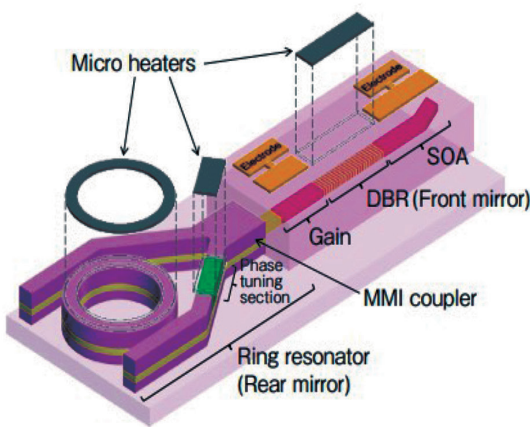
나. 버니어 효과

버니어 효과는 공진기 내에 서로 다른 파장 간격의 두 개 이상의 주기적인 반사 스펙트럼들을 중첩시켜 특정 파장에서 발진시키고, 한쪽 반사기의 굴절률 변화로 다른 쪽의 주기에 해당하는 파장 간격만큼 가변시키는 방법이다. 이 방법은 반사 스펙트럼이 중첩되는 형태에 따라 MV(Multiplicative Vernier)와 AV(Additive Vernier)로 구분된다. 그림 5는 MV(좌)

와 AV(우) 반사기 구성(상단)과 중첩된 반사 스펙트럼 해석결과를 나타낸다. 여기서, ΔR 은 주 모드와 측 모드 간의 반사율 차를 나타내고, $\Delta\lambda$ 는 주모드의 반사 스펙트럼 폭을 나타낸다.

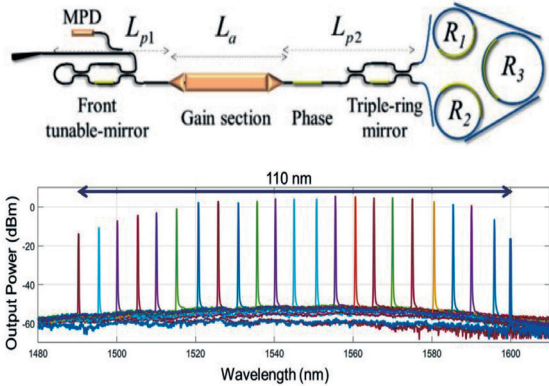
MV 구성은 회절격자 간 반사율의 곱에 의해 발진되는 방식으로, 합에 의해 얻어지는 AV 구성에 비해 동일한 반사율 조건에서 주 모드와 측 모드 간의 반사율 차가 적어서($\Delta R_m < \Delta R_a$), 파장가변 시 단일 모드 안정성이 다소 낮아지는 반면, 반사 스펙트럼의 폭이 좁아져서($\Delta\lambda_m < \Delta\lambda_a$), 저선폭 동작에 유리한 특성을 가지고 있다[47].

MV 구성으로는 DBR 영역에 회절격자가 공간상으로 샘플링된 형태인 SG(Sampled Grating)-DBR-LD[48]은 Lumentum사(구 JDSU/Agility 인수)에서, SG 구성에서 출력단에 다양한 주기의 회절격자를 구현시켜 전류 주입을 통해 디지털로 발진파장을 선택하는 DS(Digital Supermode) DBR-LD[49]은 Oclaro사(구 Bookham/Marconi), DFB와 DBR 구조가 단일집적된 DR(Distributed Reflector) 구성에서 DFB의 회절격자는 SG, DBR 회절격자는 축방향(Longitudinal Direction)



출처 Reproduced with permission from [53].

그림 6 Y분기-링공동과 DBR 구성이 단일집적된 파장가변 광원 구조(좌)와 파장가변 특성(우)



출처 Reprinted from [54], CC BY 4.0.

그림 7 이종집적 기반 링공동 버니어 파장가변 광원 구조(상) 과 파장가변 특성(하)

으로 주기가 점차 달라지는 CSG(Chirped SG)로 구현시킨 CSG-DR-LD[50]는 SEI사, SG 구성에서 축 방향으로 종방향(Vertical Direction) 광결합을 활용한 형태인 GCSR(Grating-assisted Codirectional coupler with Sampled bragg Reflector)[51]은 ADC사에서 제품을 개발하였고, AV 구성으로는 Y-branch의 개별 암(Arm)에 서로 다른 SG를 구현시킨 MGY(Modulated Grating Y-branch) DBR-LD[52]로 II-V(구 Finisar/Syntune 인수)에서 판매하고 있다. 이러한 광원들은 이미 15년 이상의 개발로 기술이 매우 성숙되어 있으며, 모두 ITLA MSA 요구사항을 만족시키고, 모듈뿐만 아니라 파장가변 시 필요한 제어 변수들의 자동조절 구성도 개발되어 제품으로 출시되어 있다.

최근 파장가변 광원 칩은 더 작은 크기와 더 전력 소모를 줄이는 형태로 발전하고 있다. 그림 6은 Y-분기 링 공동(Ring Cavity)과 DBR 구조가 단일 집적된 파장가변 광원으로, 고 굴절률차 PLC(Planar Lightwave Circuit) 기반의 WL(Wavelength Locker)와 결합하여 Nano-ITLA를 보고하였다[53].

한편 실리콘 포토닉스 기반의 이종집적(Heterogeneous Integration) 기술을 통해 화합물 반도체와 안정

적인 단일 칩 구현이 가능해지면서 다양한 형태의 파장가변 광원들이 등장하고 있다. 이종집적 기술은 각 기능을 개별적으로 제작한 후 결합시키는 하이브리드 집적(Hybrid Integration)과는 달리 칩 제작 단계에서 집적된 상태에서 제작되므로 외부 조건에서 안정적이고 신뢰성이 높은 장점이 있다. 그림 7은 이종집적 기반의 링공동 버니어 구성의 파장가변 광원과 가변 스펙트럼을 나타내며, 다양한 버니어 중첩 구성으로 광대역 및 저선폭 구성의 광원이 보고되었다[54].

IV. 다양한 파장가변 기능의 활용

파장가변 광원은 통신용 광원뿐만 아니라 다양한 응용 분야와 시장의 요구에 맞게 개발된 광융합 부품이다[55,56]. 이 장에서는 파장가변 광원을 활용한 다양한 응용 분야 중에서 간섭계를 활용한 구성과 빔 조향기에서 파장가변 광원의 기능과 요구사항에 대해 검토하기로 한다.

1. 파장훅음 광원

파장훅음은 시간에 따라 동작 파장을 주기적으로 변화시키는 파장가변 동적 동작의 한 형태로서, 훅음 광원에 기반한 광간섭 단층 영상장치인 SS-OCT(Swept Source-Optical Coherent Tomography)와 광감지 거리 측정 장치인 FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave)-LiDAR(Light Detection And Ranging)에 활용된다. 두 장치 모두 세부 적용 대상에 따라 요구 수치가 다를 수는 있겠지만, OCT는 대개 수~수십 μm 의 분해능으로 수mm 이내의 침투 깊이의 단층 영상을 획득하는 데 사용되며, FMCW LiDAR는 수~수백mm의 분해능으로 수~수백m의 거리에 있는 대상 물체를 탐지하는 데 활용된다.

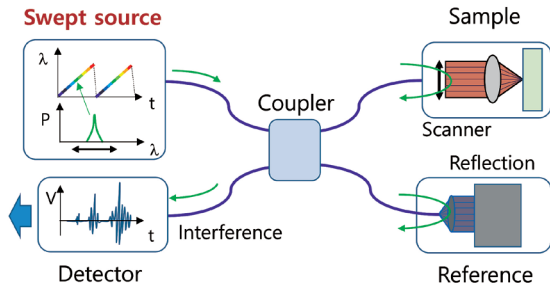


그림 8 SS-OCT 광학계 구성도

그림 8은 SS-OCT 광학계의 구성도를 나타낸다. 홀름 광원에서 출사된 빔은 커플러에서 분기되어 시료(Sample)와 기준면(Reference)에 입사되고, 반사된 빔들은 커플러에서 결합되어 광검출기에서 간섭 신호에 대한 전기적 패턴을 생성한다. 여기서 기준면의 기계적 변위 없이 파장홀름(A-scan)만으로 시료의 깊이 영상 정보를 획득할 수 있으며, 표 5[57]에서 확인되는 바와 같이 영상의 분해능(Resolution)과 간섭 길이(Coherence Length)는 홀름 광원의 파장 범위와 선폭에 직접적으로 관계된다.

SS-OCT 시스템에서는 고밀도 영상과 실시간 영상 확인을 위해 넓은 파장 범위와 높은 홀름 반복률

표 5 SS-OCT 성능지표에 대한 시스템 요구성과 홀름 광원의 성능

성능 지표	시스템 요구 성능	홀름 광원 성능
분해능	< 10μm	파장홀름범위 > 100nm
간섭길이 (롤오프)	> 2mm (< 20dB)	순간 선폭 < 0.24nm
이미지 속도	< 0.2 sec [full 3D 500 ³ pixel]	홀름 반복률 > 1MHz
동적범위	> 35dB (40~50dB)	광 출력 > 10mW
민감도	> 95dB	상대세기 잡음 < -120dBc/Hz

출처 Reproduced from [57].

의 광원이 필요하다. 그러나, 홀름 반복률이 높을수록 공진기 형성이 불안정해져서 선폭이 증가하고 광출력이 감소하기 때문에, 파장홀름 동작 중에 성능지표를 만족시키는 광원 구성이 요구된다.

그동안 다양한 형태와 구성의 파장홀름 광원들이 보고되었으며, 단일 칩 형태의 파장가변 광원은 시스템 요구사항에 맞게 파장홀름 범위를 넓히고 고속 동작 시 모드 호핑 등을 개선한 구성이 개발되었으며[58-60], 칩 성능향상과 함께 홀름파장/주파수의 선형성 개선 및 영상처리 속도향상을 위한 다양한 하드웨어 및 소프트웨어 개발 관련 연구가 되었다.

홀름 광원의 또 다른 활용 분야로서, FMCW-LiDAR는 기존 방식들에 비해 높은 신호대잡음비 덕분에 100mW 미만의 반도체 광원을 사용할 수 있어, 초소형 및 저에너지 소모 LiDAR 구현에 관심을 모으고 있다[61]. FMCW 구성은 그림 9에 나타난 것처럼 광원에서 출사된 빔을 분기하여 하나는 목표물을 조사하고, 다른 하나는 경로 1을 통해 검출기로 입사되며, 목표물에서 반사된 광은 경로 2를 통해 검출기에 입사된다. 이때 경로 1과 2 간의 시간 차이가 발생하며, 홀름 광원의 주파수 변화가 선형적이면 광 검출기에서 비트 주파수(Beat Frequency)를 통해 목표물의 거리를 쉽게 산정할 수 있다.

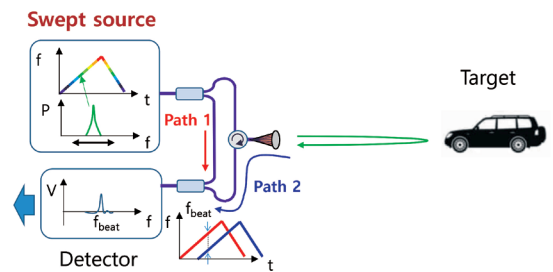


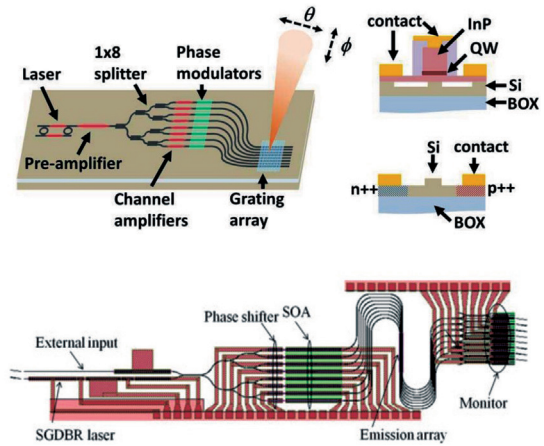
그림 9 FMCW 광학계 구성도

FMCW에서도 SS-OCT와 유사하게 분해능, 간섭거리, 탐지속도 등의 시스템 성능지표에 대해 주파수 훑음 범위, 선폭, 훑음 반복률, 선형성 등의 광원 성능과 직접적으로 관련이 있다. LiDAR 적용의 경우 상대적으로 짧은 거리(~30m)와 긴 거리(~300m)에 대한 시스템 요구 명세[62]가 있으며, 이를 충족시킬 수 있는 주의 깊은 광원 선정과 구성이 필요하다. 특히 반도체 기반 파장가변 광원에서는 대략 300kHz의 선폭에 약 150m의 간섭거리, 25GHz의 주파수 훑음 범위에 약 10mm 이하의 분해능으로 구현될 수 있음이 보고되었다[63-65].

2. 레이저 빔 조향기

레이저 빔조향 기술은 물체를 다각도로 탐지하고 영상화하는 데 활용되어 왔으며, LiDAR 모듈뿐만 아니라 국방, 항공, 위성통신, 3차원 홀로그램 등 그 응용성이 확장되고 있다. 파장가변 광원은 광 위상 배열 구성과 결합하여 비기계식 빔 조향기를 구현하는 데 활용되며, 반도체 집적기술의 발달로 소형화와 저전력 구동을 목적으로 레이저 빔 조향 구성 일체를 단일 칩으로 구현하는 연구가 수행되어왔다[66-70].

그림 10은 실리콘 이종접합과 화합물 반도체 단일집적 기반의 빔 조향기 구성을 나타낸다[66,67]. 여기서 파장가변 광원은 링 공동과 SG 기반의 버니어 효과를 활용한 구성으로 파장가변을 통해 회절각을 변화시켜 종방향(θ)으로 빔을 조향시킨다. 최근 더욱 집적된 구성으로 구현되고 있으며, 특히 비균등 어레이 구성을 통해 개선된 조향 특성이 보고되고 있다[8-10]. 이를 통해 적은 수의 어레이 광도파로와 상대적으로 넓은 어레이 간격으로도 넓은 조향범위 및 좁은 발산각을



출처 Reproduced from [66,67].

그림 10 실리콘 이종접합(상단)과 반도체 단일집적 기반(하단)의 빔 조향기 칩 구성도

가지는 배열 안테나 설계가 가능하여, 고집적 구성에서 광도파로의 복잡성을 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

V. 결론

본고에서는 WDM 통신용 네트워크에서 파장가변 동작별 활용 분야와 광원의 요구사항을 검토하였고, 파장가변 방식 및 광대역 구성에 대한 광원 구성을 살펴보았고, 파장가변 기능을 활용한 분야의 관련 광원 개발 현황을 조사하였다. 파장가변 광원은 다양한 구성과 함께 집적/공정기술 발달로 더욱 소형화, 저전력 소모형태로 진화될 것이며, 파장가변 기능은 정적에서 동적으로 그 활용범위가 확대되고, 그 활용 범위도 광섬유 기반의 통신 네트워크를 넘어서, 다양한 응용과 함께 특히 국방, 항공 및 우주 통신에서 핵심 부품으로 활용될 것으로 예상된다.

용어해설

WDM 광전송 시스템의 하나로, 서로 다른 파장의 신호들을 여러 채널로 묶어서 하나의 광섬유를 통해 동시에 전송할 수 있도록 하는 기술

ROADM WDM 광전송 네트워크에서 신호의 삽입/추출/경로 제어 기능을 원격지에서 자동으로 통제할 수 있는 장치

Coherent Transmission 광의 세기뿐만 아니라 위상, 편광, 주파수 등을 활용해서 신호를 변조시켜 전송하고, 검출하는 방식

RAN 무선 접속 네트워크로, 휴대전화, 노트북 등 사용자 장치와 무선 핵심망 간의 연결 네트워크

DFB-LD 분포 격자형 레이저 다이오드로, 활성영역에 회절격자를 구현시켜 주파수 선택 반사특성을 통해 단일 모드로 동작하는 반도체 레이저 다이오드

DBR-LD 분포 브래그 반사형 레이저 다이오드로, 공진기를 구성하는 수동영역에 회절격자를 구현시켜 단일모드로 동작하고, 수동영역의 회절조건을 변화시켜 단일모드의 파장을 가변시킬 수 있는 반도체 레이저 다이오드

약어 정리

CDC	Colorless, Directionless, Contentionless
CPRI	Common Public Radio Interface
CSG	Chirped SG
DBR	Distributed Bragg Reflector
DCI	Data Center Interconnection
DFB	Distributed Feedback
DR	Distributed Reflector
DS	Digital Supermode
DSP	Digital Signal Processor
DU	Distribution Unit
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
GCSR	Gating-assisted Codirectional coupler with Sampled bragg Reflector
IC-TROSA	Integrated Coherent Transmit Receive Optical Sub-Assembly
ITLA	Integrated Tunable Laser Assembly
LiDAR	Light Detection And Ranging
MFH	Mobile Front Haul
MGCL	Multichannel Grating Cavity Laser
MGY	Modulated Grating Y-branch
MSA	Multi-Source Agreement

OIF	Optical Inter-networking Forum
OLT	Optical Line Terminal
ONU	Optical Network Unit
OPS	Optical Packet Switching
OTN	Optical Transport Network
OXC	Optical Cross-Connect
PAM 4	Pulse Amplitude Modulation Level 4
PLC	Planar Lightwave Circuit
PON	Passive Optical Network
QSFP	Quad Small Form Factor Pluggable
RAN	Radio Access Network
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexing
RU	Radio Unit
SC	Short Cavity
SG	Sampled Grating
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SS-OCT	Swept Source-Optical Coherent Tomography
TDA	Tunable Distribution Amplification
TDM	Time Division Multiplexing
TEC	Thermal Electric Cooler
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WL	Wavelength Locker

참고문헌

- [1] <http://www.koita.co.kr/news/articleView.html?idxno=118231>
- [2] 김광준 외, "광전송 기술 및 동향," 전자통신동향분석, 제27권 제2호, 2012, pp. 99-108.
- [3] 백용순, "대용량 광통신부품 기술동향," 한국광학회지, 제24권 제6호, 2013, pp. 297-310.
- [4] 윤천주 외, "SDN 구현을 위한 광통신 핵심 요소 기술," 전자통신동향분석, 제28권 제4호, 2013, pp. 43-56.
- [5] 권오균 외, "유무선가입자 광부품 기술 및 산업동향," 전자통신동향분석, 제31권 제6호, 2016, pp. 21-30.
- [6] 한영탁 외, "데이터센터 통신용 광소자 및 광부품 기술 동향," 전자통신동향분석, 제37권 제2호, 2022, pp. 42-52.
- [7] 장순혁 외, "5G 모바일 프론트홀 광전송 기술 동향," 전자통신동향분석, 제37권 제3호, 2022, pp. 23-32.
- [8] W. Ma et al., "Practical two-dimensional beam steering

- system using an integrated tunable laser and an optical phased array," *Appl. Opt.*, vol. 59, no. 32, 2020, pp. 9985-9994.
- [9] A. Khachaturian et al., "Achieving full grating-lobe-free field of view with low-complexity co-prime photonic beamforming transceivers," *Photonics Res.*, vol. 10, no. 5, 2022, pp. A66-A77.
- [10] C. Yang et al., "Advances in silicon-based, integrated tunable semiconductor lasers," *Nanophotonics*, vol. 12, no. 2, 2023, pp. 197-217.
- [11] ITU-T Recommendation, G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, 2020.
- [12] ITU-T Recommendation, G.9802.1: Wavelength division multiplexed passive optical networks (WDM PON): General requirements, 2021.
- [13] Common Public Radio Interface (CPRI) Specification V7.0, 2015.
- [14] eCPRI Interface Specification V2.0, Common Public Radio Interface: eCPRI Interface Specification, 2019.
- [15] ITU-T Recommendation, G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid, 2003.
- [16] 한국정보통신기술협회(TTA), TTA.E.KO-03.0022/R2: 다수의 서브 채널을 갖는 다채널 CWDM 광인터페이스, 2017.
- [17] <https://www.etnews.com/20220323000165>
- [18] 권오기 외, "전계흡수 변조기가 집적된 양방향 파장가변 분포반사기 레이저 다이오드," *Optics and Photonics Congress*, 2021, article no. MP-II.005.
- [19] 권오기 외, "파장당 50 Gbps PAM4 신호를 지원하는 12채널 Tunable DBR-EAM," *광전자 및 광통신 학술회의(COOC)*, 2021, article no. WP-CH3.01.
- [20] O.K. Kwon et al., "100-Gb/s/λ PAM-4 EAM-integrated DBR-LD supporting multiple sub-channels within 1.29 μm window," *J. Lightw. Technol.*, vol. 41, no. 18, 2023, pp. 6015-6020.
- [21] 이동훈 외, "데이터센터 내부 통신용 200Gbps PAM4 EML 광원개발," *광자기술학회(PC)*, 2022, pp. 1-3.
- [22] <https://www.o-ran.org/>
- [23] <http://www.openroadm.org/>
- [24] <https://www.oiforum.com/technical-work/hot-topics/400zr-2/>
- [25] <https://www.openzrplus.org/about-us/>
- [26] <https://www.openzrplus.org/documents/>
- [27] <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/2019/01/OIF-Micro-ITLA-01.1.pdf>
- [28] https://www.furukawa.co.jp/en/release/2019/comm_190920.html
- [29] https://effectphotonics.com/wp-content/uploads/2023/10/pTLA-Brochure_V12_A4_digital.pdf
- [30] ITU-T Recommendation, G.989.2: 40-Gigabit-capable passive optical networks(NG-PON2): Physical media dependent(PMD) layer specification, 2014.
- [31] L.A. Coldren et al., "Tunable semiconductor lasers: A tutorial," *J. Lightw. Technol.*, vol. 22, no. 1, 2004, pp. 193-202.
- [32] L.A. Coldren et al., "A review of photonic systems-on-chip enabled by widely tunable lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 58, no. 4, 2022, article no. 6300110.
- [33] L. Han et al., "Electroabsorption-modulated widely tunable DBR laser transmitter for WDM-PONs," *Opt. Express*, vol. 22, no. 24, 2014, pp. 30368-30376.
- [34] O.K. Kwon, et al., "Proposal of novel structure for wide wavelength tuning in distributed Bragg reflector laser diode with single grating mirror," *Opt. Express*, vol. 26, no. 22, 2018, pp. 28704-28712.
- [35] 박수익 외, "DBR-LD의 파장가변 방식별 파장스위칭 시간 평가," *광자기술학회(PC)*, 2023, pp. 1-3.
- [36] S.I. Park et al., "Heater-tuned DBR laser diode for high thermal efficiency," in *Proc. ISLC 2022*, (Matsue, Japan), Oct. 2022, article no. TuP-31.
- [37] C.W. Lee et al., "Wide-wavelength-tunable distributed Bragg reflector laser diode with high thermal efficiency," *Opt. Express*, vol. 31, no. 20, 2023, pp. 32126-32133.
- [38] O.K. Kwon et al., "Proposal of novel structure for wide wavelength tuning in distributed Bragg reflector laser diode with single grating mirror," *Opt. Express*, vol. 26, no. 22, 2018, pp. 28704-28712.
- [39] Y. Ueda et al., "High-speed tunable laser based on electro-optic effect for wavelength switching," *NTT Technical Review*, vol. 20, no. 4, 2022, pp. 65-73.
- [40] B.R. Bennett et al., "Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs, and InGaAsP," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 1, 1990, pp. 113-122.
- [41] M.-C. Amann et al., "Linewidth broadening by 1/f noise in wavelength-tunable laser diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, no. 12, 1997, pp. 1512-1514.
- [42] H. Ishii et al., "Spectral linewidth reduction in widely wavelength tunable DFB laser array," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 15, no. 3, 2009, pp. 514-520.
- [43] K. Takabayashi et al., "Mode-hop-free and electrically wavelength-tunable laser array with 39.5 nm tuning range using tunable distributed amplification DFB structure," in *Proc. ISLC 2006*, (Kohala Coast, HI, USA), Sept. 2006, pp. 27-28.
- [44] N. Nunoya et al., "110-channel operation with a 50-GHz grid in mode-hop-free tunable distributed amplification(TDA-) DFB laser array," in *Proc. ISLC 2008*, (Sorrento, Italy), Sept. 2008, pp. 143-144.

- [45] H. Arimoto et al., "Wavelength-tunable short-cavity DBR laser array with active distributed Bragg reflector," *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, no. 11, 2006, pp. 4366-4371.
- [46] O.K. Kwon et al., "Widely tunable multi-channel grating cavity laser based on a light-deflector," in *Proc. OFC/NFOEC 2006*, (Anaheim, CA, USA), Mar. 2006, pp. 1-3.
- [47] F. Liu et al., "Investigation into the phase noise of modulated grating Y-branch lasers," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 23, no. 6, 2017, article no. 1801009.
- [48] V. Jayaraman et al., "Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, 1993, pp. 1824-1834.
- [49] A.J. Ward et al., "Widely tunable DS-DBR laser with monolithically integrated SOA: Design and performance," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 11, no. 1, 2005, pp. 149-156.
- [50] T. Ishikawa et al., "Narrow spectral linewidth full-band wavelength tunable lasers for digital coherent communication systems," *Tech. Rev.*, no. 77, 2013, pp. 54-58.
- [51] M. Oberg et al., "74nm wavelength tuning range of an InGaAsP/InP vertical grating assisted codirectional coupler laser with rear sampled grating reflector," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 7, 1993, pp. 735-737.
- [52] J.-O. Wesstrom et al., "Design of a widely tunable modulated grating Y-branch laser using the additive vernier effect for improved super-mode selection," in *Proc. ISLC 2022*, (Garmisch, Germany), Dec. 2002, pp. 99-100.
- [53] M. Nishita et al., "The development of a nano-ITLA for digital coherent datacenter interconnects," *Furukawa Electric Rev.*, no. 52, 2021, pp. 44-48.
- [54] M.A. Tran et al., "Ring-resonator based widely-tunable narrow-linewidth Si/InP integrated lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 2, 2020, article no. 1500514.
- [55] <http://www.opticsjournal.com/tla.htm>
- [56] <https://www.giikorea.co.kr/report/dbmr996871-global-tunable-laser-market-industry-trends.html?CODE=dbmr996871-global-tunable-laser-market-industry-trends.html&TYPE=0>
- [57] W. Weser et al., "Multi-megahertz OCT: High quality 3D imaging at 20 million A-scans and 4.5 GVoxels per second," *Opt. Express*, vol. 18, no. 14, 2010, pp. 14685-14704.
- [58] D. Derickson et al., "SGDBR single-chip wavelength tunable lasers for swept source OCT," *Proc. of SPIE*, vol. 6847, 2008, article no. 68472P-3.
- [59] N. Fujiwara, "143-nm Swept Source for OFDR-OCT Utilizing TDC-SSG-DBR Lasers," *NTT Technical Review*, vol. 7, no. 1, 2009, pp. 1-7.
- [60] D. Choi et al., "Tuning of successively scanned two monolithic Vernier-tuned lasers and selective data sampling in optical comb swept source optical coherence tomography," *Biomed. Opt. Express*, vol. 4, no. 12, 2013, pp. 2962-2987.
- [61] https://www.photonics.com/Articles/Integrated_Photonics_Looks_to_Advance_Safety_for/a64791
- [62] M.E. Warren, "Automotive LIDAR technology," in *Proc. 2019 Symp. VLSI Circuits*, (Kyoto, Japan), June 2019, pp. 254-255.
- [63] X. Zhang, "Laser frequency sweep linearization by iterative learning pre-distortion for FMCW LiDAR," *Opt. Express*, vol. 27, no. 7, 2019, pp. 9965-9974.
- [64] G. Zhang et al., "Demonstration of high output power DBR laser integrated with SOA for the FMCW LiDAR system," *Opt. Express*, vol. 30, no. 2, 2022, pp. 2599-2609.
- [65] L. Chuxin et al., "Hybrid integrated frequency-modulated continuous-wave laser with synchronous tuning," *J. Lightw. Technol.*, vol. 40, no. 16, 2022, pp. 5636-5644.
- [66] J.K. Doylend, "Hybrid III/V silicon photonic source with integrated 1D free-space beam steering," *Opt. Express*, vol. 37, no. 20, 2012, pp. 4257-4259.
- [67] W. Guo, "Two-dimensional optical beam steering with InP-based photonic integrated circuits," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 19, no. 4, 2013, article no. 6100212.
- [68] J.C. Hulme, "Fully integrated hybrid silicon two dimensional beam scanner," *Opt. Express*, vol. 23, no. 5, 2015, pp. 5861-5874.
- [69] D. Shin et al., "Commoditizing the uncommoditized: chip-scale LiDAR," *Proc. of SPIE*, vol. 12007, 2002, article no.1200708.
- [70] M. Nickerson et al, "Gallium arsenide optical phased array photonic integrated circuit," *Opt. Express*, vol. 31, no. 17, 2023, pp. 27106-27122.