

## 초고속 광전송 기술

沈 昌 燮

韓國電子通信研究所 光通信研究室室長

### I. 서 론

광전송기술은 초기의 45 Mbps, 90 Mbps, 400 Mbps, 565 Mbps 등 비동기식 광전송시스템 개발로 이어져 현재의 동기식 2.5Gbps 광전송시스템에 이르렀다. 비동기식 광전송시스템은 주로 64Kbps의 음성 신호를 시간분할 다중화하여 전송하는 것으로 제조회사마다 표준이 달라서 상호 호환성이 없었다. 또, 이러한 전송방식은 멀티미디어로 서비스 하고자 하는 광대역 종합정보통신망(BISDN)으로의 진화에도 적합하지 못하다. 이에따라 다양한 전송시스템간의 원활한 인터페이스를 위해 동기식 전송방식이 Bellcore와 CCITT를 중심으로 연구되어 SDH/SONET(synchronous digital hierarchy / synchronous optical network)으로 표준화 되었으며, 전송속도도 155Mbps를 기본으로 하여 STM-16인 2.5 Gbps 전송장치 및 초고속의 10Gbps(STM-48) 및 100 Gbps급 광전송 장치가 요구되고 있다.

고속 광전송기술은 고속변조가 가능한 반도체 레이저 및 외부변조기가 개발되고 고속 광검출기가 개발되면서 활기를 띠기 시작하였다. 특히, 처핑이 적은 동적 단일모드 반도체 레이저, 특수 광섬유를 이용한 광섬유증폭기, 고속전송시 레이저 다이오드의 처핑(chirping)현상에 기인한 펄스퍼짐현상을 줄여 줄 수 있는 분산천이 광섬유(dispersion-shifted fiber), 마이크로파 대역의 주파수 특성을 갖는 광전소자 등의 개발은 10Gbps 광전송 장치의 실용화를 앞당기고 있으며, 광주파수 다중화 기술과 이에 필요한 소자의 개발은 100 Gbps급 이상의 초고속 광전송장치를 가능케 할 것이고 향후 대두될 광대역 종합정보통신망

의 가능성을 열었다.

전자통신연구소에서는 비동기식 광전송장치인 90Mbps 및 565Mbps 광전송 장치를 개발 상용화하여 국내 기간통신망 구축에 이바지 하였으며, 현재는 동기식 전송망인 2.5 Gbps 광전송 장치를 개발하고 있다.<sup>[1]</sup> 아울러 10 Gbps 광전송 장치와 100 Gbps 급 광전송장치 개발도 HAN/BISDN 계획의 일환으로 추진되고 있다.

본 기술해설에서는 현재 개발 초기 단계인 10Gbps 광전송기술과 광증폭 기술을 소개하고 차세대 광전송 기술인 광주파수 다중화 기술과 솔리톤 전송 기술을 간략히 설명하고자 한다. 2.5Gbps 광전송 기술에 대해서는 참고문헌 [1,2] 에 상세히 설명되어 있다. 본 고의 2 장에서는 10Gbps 광전송장치에 대해서 알아보고, 3 장에서는 초고속 장거리 전송에 필수적인 광증폭기술을 설명하였다. 그리고 4 장에서는 10 Gbps 광신호를 파중분할 다중화하는 기술인 광주파수 다중화 기술을 알아보았다. 그리고 5장에서는 초장거리 광전송 기술인 솔리톤 전송 기술에 대해서 검토하였다. 마지막으로 6 장에는 결론을 실었다.

### II. 10 Gbps 광전송 기술

10 Gbps급 광통신 시스템의 광전송 링크의 기본 구성은 지금까지 개발한 직접변조/직접검파 방식의 광링크와 동일하다. 그러므로 송신기의 온도제어, 자동광출력제어, 수신기의 APD온도보상회로 등은 2.5 Gbps 광전송장치에서 습득한 기술들을 활용할 수 있을 것으로 판단되며<sup>[2]</sup>, 시스템의 운용 및 감시제어

소프트웨어와 하드웨어도 많은 부분 2.5 Gbps 광전송에서의 경험을 활용할 수 있다. <sup>[1]</sup> 10 Gbps 광전송 장치에서 특별히 고려해야 할 부분은 초고속부로서, 2.5 Gbps 신호 4 채널을 시간분할 다중화 하는 MUX부 및 역다중화 하는 DMUX부, 그리고 광전송장치의 핵심 광송신기를 포함한 광링크부이다. 그래서 본장에서는 광링크를 중심으로 10Gbps 광전송 장치의 구현에 필요한 기술들을 살펴보았다.

1. 광송신기

2.5 Gbps 신호를 시간분할 다중화하여 얻은 10 Gbps신호를 전기적으로 증폭하여 DFB 레이저나, 외부변조기를 구동함으로써 광송신기가 구현된다. 그림 1에 광링크의 구성도를 나타내었으며, 표 1에는 반도체 레이저 직접변조 방식과 외부변조기를 이용하는 방식으로 구현한 10 Gbps 광전송 실험 결과들을 나타내었다. 이러한 송신기를 구현하기 위해서 고려되어야 할 사항들은 전자소자의 스위칭 속도, 반도체 레이저 및 외부변조기의 변조 대역폭과 변조시에 유기되는 처핑의 양이다. 광송신기의 대표적인 전자소자는 MUX 및 반도체 레이저 드라이버(혹은 외부변조기 드라이버)가 있다. 이 중에서 특히 구현에 어려움이 있는 것은 대출력을 요구하는 반도체 레이저/외부변조기 드라이버이다. 그러나, 광송신기에서 무엇보다도 중요한 것은 반도체 레이저/외부변조기의 대역폭과 이들의 변조시에 유기되는 처핑이다. 특히 10Gbps이상의 광통신에서는 처핑의 양과 광섬유에서의 색분산이 전송거리를 결정하기 때문에 장거리 전송에서는 DFB 레이저 대신에 처핑이 적은 외부변조기를 사용하는 것이 바람직 할 것으로 예측되고 있다. 그러나, 외부변조기를 사용하는 경우는 변조기에서의 손실을 보상하기 위해서 송신단에서 광증폭기를 사용하여야 하는 등 송신기가 복잡해지고 신뢰성이

표 1. 직접 변조/직접검파방식의 광링크 실험결과

(a) 반도체 레이저 직접변조방식을 이용한 광링크 실험결과

전송속도	전송거리	Chirping	광증폭기	기관	비고
10 Gbps	140 Km	0.4 nm at -20 dB	a booster and a preamp. EDFA	Hitachi ECOC '91 H. Nakano	Sensitivity -26.5 dBm
10 Gbps	20 Km	0.62 nm at -20 dB	no EDFA	Toehiba ECOC '91 H. Tanakawa	Sensitivity -17 dBm
11 Gbps	81 Km		no EDFA	Bellcore EL '89 J.L. Gialletti	Sensitivity -19.8 dBm
10 Gbps	50 km	strained MQW DFB laser 0.35 nm at -20 dB	no amplifier	NTT EL '91 Y. Miyamoto	Sensitivity -23 dBm (APD) DSF, 1.3 us
16 Gbps	64.5 km	35 dB SAGR	SL preamp.	AT&T EL '89 A.H. Gnauck	pin-FET receive 1.3 us with normal fiber

(b) 외부변조기를 이용한 광링크 실험결과

전송속도	전송거리	변조/복조	광증폭기	기관	비고
20 Gbps	100 Km	EM/DD 10Gbps * 2	그라운드 EDFA for receiver	NTT OFC '92 K. Nagimoto	3 dBm signal is coupled to PIN
10 Gbps	220 Km	EM /DD	a booster (Zno) a pre-EDFA (20 GHz)	AT&T PTL '92 A.H. Gnauck	lunched power 12 dBm Sensitivity -36 dBm
17 Gbps	150 Km	EM/DD	a booster and a pre-EDFA	NTT Opt. Amp. and their Appl. '90 H. Nagimoto	Dis. compen. with normal SMF Sensitivity -24.8 dBm
10 Gbps	140 Km	Electroabs. modulation Tx and Rx mod. EM/DD	a booster and a preamp. EDFA	NEC OFC '92 T. Suzuki	Sensitivity -12.3 dBm with 24db EDFA -28.5 dBm
20 Gbps	100 Km	Electroabsorp. Modulation/DD	a booster and a pre-EDFA	NTT EL '92 T. Katoaka	No modulator driver
10 Gbps	4500 Km	Electroabsorp. modulation/DD Extinction ration 20 dB	138 EDFA 30Km span DSF a booster and a pre-EDFA	KDD Rad Lab. H. Taga OFC '92	Sensitivity -29.5 dBm

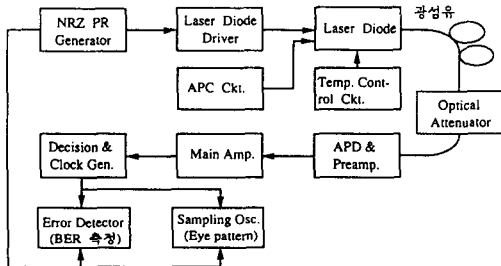


그림 1. 반도체 레이저 직접변조방식을 이용하는 광링크의 구성도

떨어지므로 최근에는 변조시의 처핑이 적은 양자구조 DFB 레이저를 개발하려는 노력이 진행되고 있다. <sup>[4]</sup> 10Gbps용 반도체 레이저의 특성에 대해서는 이미 많이 알려져 있으므로 <sup>[3,4]</sup> 여기에서는 외부변조기에 대해서 자세히 검토해 보기로 하자.

1) 흡수형 외부변조기

외부변조기는 흡수율을 변조하는 흡수형과 굴절율을 변조하고 간섭계를 이용하는 간섭계형이 있다. 흡수형은 III-V 반도체 bulk나 양자우물구조를 이용하여 구현한다. 이러한 변조기는 기존의 반도체 공정을 이용할 수 있고, 또 반도체 레이저와 monolithic하게 집적화 할 수 있는 장점이 있다. 먼저 bulk 반도체

체를 이용하는 흡수형 변조기는 Franz-Keldysh 효과(전계를 가하면 absorption edge가 낮은 에너지쪽으로 이동하는 효과)를 이용하여 입사 빛의 에너지  $E$ 를 반도체의 밴드 갭  $E_g$ 보다 낮게( $E < E_g$ )하고 전계를 가하면 흡수가 증가하는 것을 이용하여 변조한다. 반면 다중양자우물구조 변조기는 양자속박효과에서 기인하는 Quantum Confined Stark Effect (QCSE)를 이용한다. QCSE란 양자우물에 속박된 전자와 정공이 형성하는 exciton의 absorption peak가 전계를 가하면 낮은 에너지 쪽으로 이동하는 현상이다. 외부변조기는 빛을 효과적으로 변조하기 위해 광도파로를 이용하여 만든다. 흡수형 외부변조기의 길이는 70 - 200 $\mu$  m, 변조대역폭은 10 - 40 GHz, 동작전압은 2 - 4 V이며 이 때 변조된 광의 소광비는 10 - 25 dB이다.<sup>[1]</sup> 일반적으로 다중 양자우물구조 변조기가 bulk 반도체 변조기보다 2 배 정도 효율이 좋다. 흡수형 변조기의  $\alpha$  값은 0.2 에서 1 정도이다. 흡수형 변조기의 단점은 변조시 입사 빛의 세기가 증가하면 반도체의 흡수가 포화되어 변조대역폭이 감소하는 것이다. 그래서 광섬유에 센 빛을 전송하기 위해서는 송신단에서 별도의 광증폭기가 필요하다. 최근에는 흡수형 변조기와 DFB레이저를 집적화 하는 연구가 진행되고 있으나, 변조기 facet에서 레이저로 반사되는 빛에 의해서 레이저의 특성이 저하되는 것이 문제점으로 나타나고 있다.<sup>[5]</sup>

## 2) 간섭계형 외부변조기

다음은 간섭계형 외부변조기를 살펴보자. 간섭계형 변조기를 구현하는 대표적인 매질은 전기광학매질(전계를 가하면 굴절율이 변하는 매질)인 LiNbO<sub>3</sub> 이고, 주로 MZ(Mach - Zehnder) 간섭계를 이용하여 전기광학효과에 의한 위상변조를 진폭변조로 바꾸고 있다. 간섭계형 변조기는 앞의 흡수형 변조기에 비해서 길이가 매우 길므로 (수 센티미터) 10 Gbps용을 구현하기 위해서는 진행파형 전극구조를 이용한다(그렇지 않을 경우는 전극의 정전용량에 의해 변조 대역폭이 제한되어 10 Gbps용 변조기를 구현하기가 어렵다). 이 구조에서는 광신호와 변조신호가 같은 방향으로 진행하면서 광신호의 위상변화가 축적되어 변조가 이루어진다. 변조대역폭은 변조기의 길이와 초고주파 굴절율과 빛의 굴절율의 차이에 의해서 결정된다. 초고주파 굴절율은 변조기의 전극 구조를 변경하여 조정할 수 있으므로 광대역 변조기를 구현하기 위해서는 전극의 구조설계가 중요하다. 간섭계형 외부

변조기를 push-pull 형식으로 구동(변조기의 두 개의 arm에 위상이 반대인 동일한 전압을 인가)하면  $\alpha$  값은 "0"이되고 변조시의 처핑을 제거할 수 있다. 또, 두 전극에 가해지는 전압의 위상과 진폭을 조정하여  $\alpha$  값을 -1 에서 +1 까지 변화시킬 수 있다. 이는 다음에 설명하는 바와 같이 광 링크의 전송거리를 길게 할 수 있는 중요한 장점이다. 간섭계형 변조기는 앞의 흡수형변조기보다 그 제작기술이 성숙되어 있지만 아직도 장시간에 걸친 안정도(약 20년)에 문제가 있다(변조신호의 바이어스점이 변조기에 가해지는 DC전압, 온도, 습도, stress 등에 매우 민감함). 지금까지 보고된 LiNbO<sub>3</sub> 외부변조기의 최대 변조대역폭은 최근에 40 GHz이고 이 때의 스위칭 전압은 3.5 V이다.<sup>[6]</sup> 최근에는 반도체에서의 전기광학효과 및 QCSE를 이용한 간섭계형 변조기도 연구되고 있다.<sup>[7]</sup> 특히 GEC-marconi에서는 대역폭 50 GHz의 GaAs 변조기를 상품화하였다.

## 2. 광섬유

광섬유를 진행하는 신호는 광섬유의 손실에 의해서 감쇄되고, 색분산에 의해서 왜곡된다. 광섬유에서의 감쇄정도는 보통의 단일모드 광섬유의 경우는 1,310 nm에서 약 0.45 dB/km, 1,550nm에서 약 0.25 dB/km 이다(현재 국내에 포설된 광섬유의 경우는 splicing 손실 0.15 dB를 포함하여 1,310 nm 에서 0.65 dB/km, 1,550nm에서 손실이 0.5 dB/km이다.<sup>[8]</sup> 광섬유의 손실은 1,550nm에서 제일 적기 때문에 이 파장대에서의 광통신이 많이 연구되고 있다. 특히, Er-doped fiber amplifier (EDFA)는 1,550 nm 영역에서의 광섬유의 감쇄를 보상할 수 있는 이상적인 광증폭기로 최근에는 전자회로를 사용하는 기존의 증계기대신 EDFA를 사용하는 광증계기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[9]</sup> 1,310 nm 영역에서의 광증폭기로는 기존의 반도체 레이저 광증폭기 이외에도 최근에 연구되고 있는 Pr<sup>3+</sup>-doped fluoride fiber 증폭기가 연구되고 있으나 아직 초보적인 단계이다.<sup>[10]</sup>

광섬유의 색분산은 광섬유에서의 군속도가 파장에 따라 다르기 때문에 생기는 현상으로 광펄스가 진행하면서 펄스폭이 넓어지는 정도를 나타낸다. 색분산은 ps/nm-km로 나타내고 1,310 nm 부근에서  $\pm 2$ ps/nm-km이고 1,550nm 부근에서 17 ps/nm-km이다. 색분산의 영향은 전송파장이 1,550 nm

(색분산이 1,310 nm 영역의 10배)로 이동되고, 전송속도가 증가하고, 전송거리가 길어지면서 그 영향이 더 심각해져서, 이제는 광섬유의 색분산이 광통신의 용량을 결정하는 주 요인이 되고 있다. 여기서 한 가지 언급하고 싶은 것은 반도체 레이저의 직접변조 시 생기는 처핑에 의한 발진선폭의 증대는 색분산의 영향을 더욱 증대시켜서 전송거리를 단축하는 요인이 되고 있다. 정상적인 광섬유( $D = 17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ )를 사용하면 색분산에 의해서 제한되는 1,550 nm대의 10 Gbps(처핑의 영향을 무시한 경우) 신호의 전송거리는 60 km (2.5Gbps는 480 km)이다. 그러나, 직접변조한 반도체 레이저의 처핑을 고려하면 전송거리가 10 km이하로 감소한다. 색분산을 보상해주는 가장 근본적인 방법은 분산천이 광섬유를 사용하는 것이다. 분산천이 광섬유의 경우 손실은 보통의 단일모드 광섬유보다 약 10% 정도 많으며 색분산은 1,550 nm 부근에서 약  $\pm 2 \text{ ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$  정도로 최소값을 갖는다. 이 경우는 보통의 단일모드 광섬유와 비교하여 약 10 배정도 전송거리를 길게할 수 있다.

### 3. 광수신기

직접검출 방식의 광수신기는 광검출기, 전치증폭기, 주증폭기, 리미팅증폭기(limiting amp.), 클럭 재생회로, 판별(decision)회로, DMUX로 구성되어 있다. 디지털 스위칭소자인 DMUX, 클럭 재생회로, 판별회로의 경우 10Gbps용으로는 스위칭 시간이 최소한 50ps 이하가 되어야 한다. 10 Gbps의 광링크에 사용하기 위해서는 선형 증폭기인 전치증폭기 및 주증폭기는 대역폭이 수 KHz-7GHz 정도 되어야 한다. 또한 전치증폭기는 대역폭도 중요하지만 수신감도를 높이기 위해서는 잡음지수도 낮아야 한다. 10 Gbps급 이상의 클럭재생회로에는 기존의 SAW 필터를 제작하기가 어려우므로, 유전체 공진기등을 이용한 협대역 밴드 통과 필터를 사용하여야 한다.<sup>[11]</sup> 광통신에 사용되는 광검출기로는 대부분 InGaAs 반도체를 이용하여 제작하며 PIN 검출기와 APD가 있다. PIN 검출기는 대역폭이 넓고 사용이 간편하나, 얻을 수 있는 수신감도(receiver sensitivity)가 열잡음에 의해서 결정되므로 APD를 사용하는 경우보다 수 dB 정도 떨어진다. APD는 PIN검출기에 비해서 대역폭이 좁고 사용이 불편하나 수신감도가 열잡음이 아닌 양자역학적 한계인 산탄잡음(shot noise) 및 무작위적인 전자 정공의 증배(전자와 정공

의 증배율이 차이)로 인한 잡음에 의해서 결정되므로 높은 수신감도를 얻을 수 있다. 10 Gbps에서 PIN 검출기를 사용하여 수신감도  $-20.4 \text{ dBm}$ <sup>[12]</sup>, APD를 사용하여  $-27 \text{ dBm}$ 까지 얻은 결과가 보고되었다.<sup>[13]</sup> APD를 10 Gbps 광링크에 사용하기 위해서는 이득과 대역폭을 곱한 것이 100 GHz정도인 것이 요구된다. 최근의 동향은 사용이 간편한 PIN 검출기를 이용하고 EDFA를 광전치증폭기로 이용하여 수신감도를 높이려는 연구가 진행되고 있으며 최근에 10 Gbps에서  $-36 \text{ dBm}$ 의 수신감도를 얻은 결과가 보고되었다.<sup>[14]</sup> 이 때의 수신감도는 광파통신에서 얻은 수신감도에 접근한다.

### 4. 색분산 보상법

앞에서 초고속 광통신은 처핑 및 색분산에 의해서 심각하게 영향을 받는 것을 설명하였다. 여기서는 여러가지 색분산 보상방법에 대해서 알아보기로 하자.

- 보통의 단일모드 광섬유와 분산천이 광섬유를 조합한 색분산 보상<sup>[15]</sup>
- prechirping을 이용하는 방법<sup>[16]</sup>
- 광학적 색분산 보상법<sup>[17]</sup>
- phase conjugation을 이용하는 방법<sup>[18]</sup>
- Nonlinear pulse transmission<sup>[19]</sup>
- Soliton 전송 (adiabatic elimination of dispersion)<sup>[20]</sup>

등이 있다. 단일모드 광섬유와 분산천이 광섬유를 조합하여 색분산을 보상하는 방법은 실험실에서 분산천이 광섬유의 색분산을 보상하는 방법으로 분산천이 광섬유에서의 색분산량에 해당하는 거리의 단일모드 광섬유를 사용하여 분산을 상쇄시키는 방법이다.<sup>[15]</sup> 색분산의 보상을 위해서 색분산이 매우 크고 손실이 적은 광섬유를 연구하고 있으나, 이 방법은 실제 현장에서 사용하기에는 어려움이 있다.

Prechirping을 이용한 방법이란 앞에서 설명한 처핑을 이용하여 전송거리를 늘리는 방법중의 하나로, 송신기에서 인위적으로 광섬유에서의 분산에 의한 처핑과의 반대방향으로 prechirping을 주어 이 신호가 광섬유를 진행할 때 처핑이 감소하는 것을 이용하여 색분산의 영향을 감소시키는 방법이다.<sup>[16]</sup> Prechirping을 주는 방법으로는 반도체 레이저를 clock주파수로 FM변조하는 방법<sup>[16]</sup>, 반도체 레이저 광 증폭기에서의 자기위상변조(self-phase modulation)을 이용하는 방법<sup>[21]</sup>이 연구되고 있다. 그림 2에 반도체 레

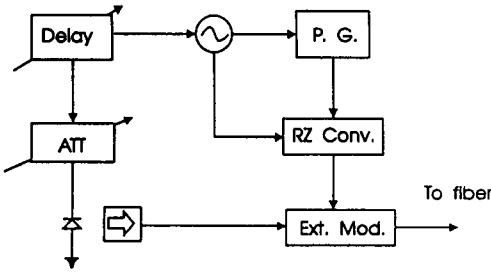


그림 2. Prechirping을 이용하여 색분산을 보상하는 광송신기

이러 주파수 변조를 이용하여 prechirping을 주는 광송신기의 구조를 나타내었다.

광학적인 방법은 수신기쪽에서 광신호를 한쪽 거울의 반사율이 100 % 인 Fabry-Perot 간섭계에 입사 시키서 반사되는 빛을 검출하여 색분산을 보상하는 방법으로, 간섭계를 삽입하기 때문에 생길 수 있는 손실을 제거하고, 간섭계에서의 분산을 이용하여 색분산을 보상한다.<sup>[17]</sup> Phase conjugation을 이용하는 방법에서는 전송하고자 하는 거리의 절반이 되는 지점에서 진행해 온 광파의 위상을 반전시키는 방법이다. 그러면, 나머지 절반의 구간을 진행하는 동안에 광파는 색분산에 의해서 앞에서와 매우 유사한 위상변화를 경험하므로 결과적으로 최종단에서의 펄스는 거의 색분산이 되지 않는 상태가 되는 것이다. 광파의 위상을 반전시키기 위해서는 광섬유에서의 비선형 현상에 의한 four wave mixing이나, 반도체 광증폭기에서의 four wave mixing을 이용한다.

또 하나의 색분산 보상 방법은 광섬유에서의 비선형 효과에 의한 펄스의 압축을 이용하는 방법이다. 이 방법을 사용하기 위해서는 전송광장이 광섬유의 이상분산영역이어야 한다. 즉, 광섬유에 대출력의 펄스를 보내서 광섬유에서의 비선형효과에 의한 자기위상변조와 색분산효과와의 상호작용에 의한 펄스의 압축을 이용하여 색분산에 의한 펄스폭의 확산을 보상하는 방법이다.<sup>[19]</sup> 마지막 방법으로 광섬유의 색분산의 영향을 제거하기 위한 초장거리 전송방법인 soliton 전송법은 솔리톤 전송을 다루는 장에서 자세히 검토하겠다.

### 5. 기타고려사항

지금까지 설명한 바와 같이 광자소자나 전자소자의

속도제한으로 인한 광 링크의 전송 속도 제한을 극복하고 보다 고속 전송이 가능한 광 링크를 구현하기 위해 광을 이용한 MUX / DMUX 와 광학적 클럭 재생 방식들이 연구되고 있다.<sup>[22]</sup>

또한, 반도체 레이저를 직접변조하면서(외부변조기를 사용하지 않고) 처핑 및 색분산에 의한 전송거리의 제한을 극복하고자하는 연구도 진행되고 있다. 예를 들면 반도체 레이저를 주파수 변조하고 이를 MZ 간섭계를 통과시켜서 진폭변조된 신호로 바꾸어서 전송하여 수신하는 방식(FSK-IM 방식)<sup>[23]</sup> 과, 주파수 변조된 신호를 전송하고 광섬유의 색분산을 이용하여 주파수 변조된 신호를 진폭변조된 신호로 바꾸어서 수신하는 방식<sup>[24]</sup> 이 있다. 두가지 방식 다 반도체 레이저에서의 처핑을 오히려 역으로 이용하는 전송방식으로 앞으로 계속 연구할 가치가 있다.

### Ⅲ. 광증폭 기술

미약해진 광신호를 광/전, 전/광 변환없이 빛의 상태로 증폭하는 광섬유 증폭기술은 지속적인 기술적 진보로 광전송 시스템의 설계 및 발전 방향에 매우 크게 기여하고 있으며, 특히 10Gbps급 이상의 초고속 광통신에서 그 역할이 매우 주목된다.

광섬유 증폭기 중에서 일반 석영계 광섬유의 최저 손실 대역인 1550nm에서 사용이 가능한 EDFA는 편광에 무관한 높은 이득(30dB 이상), 이론적 한계치에 가까운 낮은 잡음지수(약3dB), 높은 포화출력(10dBm이상), 전송속도 및 변조방식에 무관한 증폭 특성, 100kHz 이상 변조시 무시할 수 있는 채널간의 누화, 전송용 광섬유와의 높은 결합 효율 등의 장점을 지니고 있기 때문에 그 연구가 가장 활발하다. EDFA는 광섬유에 희토류 원소인 erbium이 소량 첨가된 erbium 광섬유, 신호광과 여기광을 동시에 erbium 광섬유로 혼입시켜주는 WDM, EDFA 내에서의 반사광 제환으로 인한 laser 발진을 막아주는 광 isolator, ASE(Amplified Spontaneous Emission) 잡음성분을 제거하기 위한 필터 및 erbium 이온들을 여기시키기 위한 여기용 LD 등으로 구성된다.

여기용 LD로는 저잡음지수가 요구되는 전치증폭기에는 980nm LD가, 그리고 고출력이 요구되는 부스

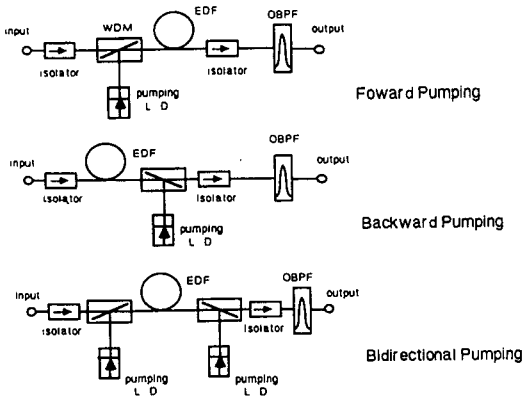


그림 3. 여기방향에 따른 광증폭기의 구성도

터 증폭기에는 1480nm LD가 많이 사용된다. 여기 광의 진행방향에 따라서도 EDFA의 특성이 달라진다. 그래서 전치증폭기에서는 신호광과 여기광의 진행방향을 같이하고 부스터 증폭기에서는 두 빛이 서로 다른 방향으로 진행하는 구조를 많이 사용한다. 또한 양방향의 여기광을 사용하여 광증폭기의 특성을 최적화하여 높은 이득과 낮은 잡음지수 특성을 얻고자 하는 노력이 계속되고 있다. 그림 3은 여기광의 방향에 따른 광증폭기의 구성도를 나타내었다.

EDFA는 전송속도와 방식에 무관한 증폭특성을 보이므로 광전송 시스템 설계에 있어서 광섬유 손실에 의한 제한을 효과적으로 극복할 수 있으며, 영 분산 대역이 1550nm로 천이된 분산선이 광섬유를 사용하는 경우 무중계 장거리 전송거리 및 기존의 중계 거리를 더폭 늘일 수 있게 되었다.

최근에 보고된 EDFA를 이용한 광전송 실험 결과 중에서 미국의 AT&T에서는 두개의 EDFA를 직렬로 연결한 부스터 증폭기와 기존의 일반 광섬유 및 1480nm LD를 여기광으로 하는 전치 증폭기를 사용하여 2.5Gbps 광신호의 318km 무중계 전송에 성공하였다.<sup>[25]</sup> 또한 영국의 Southampton 대학과 미국의 AT&T에서는 erbium 광섬유의 중간에 isolator를 삽입하는 새로운 방식의 "Composite EDFA"를 구현하여 소신호이득 46dB와 3.1dB의 잡음지수를 동시에 얻었으며, 이를 이용하여 10Gbps 광신호를 45Km 전송하여 -37.6dBm의 수신감도를 얻었다.<sup>[26]</sup> 중계기용 광증폭기로는 원격제어 및 상태감시에 관한 방법이 정립되지 못하여 그 발전속도가 상대적으로 더딘 중계기 분야에서는 일본의 KDD와 미국의

AT & T에서 태평양 해저 케이블용으로 9,000km의 광전송로를 274개의 EDFA를 이용하여 10Gbps의 광신호를 전송하는데 성공하였다.<sup>[27]</sup> 이때 광전송로는 분산 천이된 광섬유가 사용되었으며 EDFA 중계기의 간격은 33km였다.

광증폭기로 반도체 레이저 광증폭기도 연구되고 있으나, 전송시의 채널간의 누화, 분극에 따라 다른 이득, 광섬유와의 결합효율 등의 문제점이 있어서 광전송용으로서의 응용보다는 주로 광신호처리용으로 많이 연구되고 있다.<sup>[21]</sup> 그러나, 최근에 이의 특성이 많이 개선되고, 분극에 따른 이득변화가 거의 없는 반도체 레이저 광증폭기들이 개발되고 있으므로 광전송에의 응용도 기대된다.

#### IV. 광주파수 다중화 기술

시간을 분할하여 다중화하는 방식의 광통신소지는 스위칭속도 및 광송신기에서의 처핑과 광섬유의 색분산으로 인한 제한 때문에 10 Gbps이상에 적용하기에는 많은 어려움이 있을 것으로 예측된다. 100 Gbps급 광전송 장치는 10 Gbps급 광전송 링크가 개발되면 이를 광학적 파장분할 다중화하여 구현한다. 이 방법은 광전송장치의 전송용량을 대폭 높일 수 있는 다중화 방법으로 기존의 초고주파 통신에서 주파수를 분할하여 다중화 하는 방법에서 아이디어를 얻은 것으로 약 2000GHz 정도되는 광섬유의 전송대역폭(분산이 최소인 영역에서의 산출한 값)을 충분히 이용할 수 있는 방법이며, 채널간의 주파수 간격이 nm 정도로 전송신호의 대역폭보다 훨씬 넓은 경우를 파장분할 다중화(WDM : Wavelength Division Multiplexing)라고 한다. 반면에 채널간의 주파수 간격이 전송신호의 대역폭과 유사한 경우를 주파수분할(FDM : Frequency Division Multiplexing)이라 부르며, 100Gbps급 광통신 (160 Gbps)에서는 10 Gbps 16개를 WDM하여 구현한다. 그림 4은 파장분할 방식의 광 링크의 구성도를 나타내었다. WDM을 위해서는 송신단에서는 각각 다른 파장의 신호를 하나의 광섬유에 보낼 수 있도록 해주는 광결합기와, 수신단에는 송신단에서 보낸 단일 파장의 신호만을 선택할 수 있는 광 필터가 필요하다.

파장분할 다중화 시스템의 상용화를 위해서 해결해

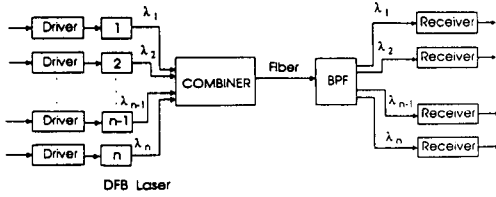


그림 4. 파장분할 다중화를 이용한 광링크의 구성도

야 될 문제점으로는 제일 먼저 광원인 DFB레이저의 수율 및 파장의 재현성이다. 시분할 방식에서는 광섬유의 대역폭이 넓고 광검출기의 수신 대역폭도 매우 넓으므로 전송 파장의 절대값은 중요하지 않다. 그러나, 파장분할 방식에서는 각 채널의 파장이 명확히 정해져 있고 여기에 상응하는 필터를 수신단에서 사용하므로 상황이 매우 다르다는 것을 쉽게 알 수 있다. 그러므로 시간분할 방식과 달리 송신용 레이저 선택의 자유도가 없고 결정된 전송파장에 맞는 레이저를 선택해야 한다. 그래서 파장을 연속적으로 가변할 수 있는 반도체 레이저인 multisection DFB 레이저<sup>[28]</sup>, 파장가변 DBR 레이저<sup>[29]</sup>, 그리고 파장가변 파이버 레이저<sup>[30]</sup> 등을 연구하고 있으나, 그 가변폭이 충분히 넓지 못하다. 파장분할 광 링크에 사용할 레이저의 또하나의 요구조건은 발진 파장이 장시간 (20년) 동안 매우 안정해야한다는 것이다.

송신단의 반도체 레이저에서 제기됐던 문제점이 수신단의 광필터에도 그대로 적용된다. 즉 장시간동안 매우 안정된 통과파장가변 필터가 필요하다. 회절격자 필터를 사용하는 경우 회절격자의 회절효율이 입사광의 편광에 의존하기 때문에 시스템의 성능을 저하되고, PZT를 사용하는 파이버 Fabry-Perot 필터는 아직 수명이 보장되지 않고 있다. 저가의 신뢰도가 높은 파장가변을 개발하기 위해서 ZnS를 이용한 temperature tuning filter가 연구되고 있다.<sup>[31]</sup>

파장분할 다중화 광링크에서 중요한 변수 중에 하나는 채널간의 파장 간격이다. 파장간격이 너무 좁으면 수신단에서 필터를 구현하기가 힘들어질 뿐만 아니라, 근본적인 문제인 광섬유에서의 비선형성에 의한 four wave mixing, stimulated Raman scattering, stimulated Brillouin scattering 등이 영향을 미치기 시작하여 광 링크의 성능을 저하시킨다. 일반적으로 광학적 비선형 현상은 광섬유 코어의 직경이 가는 분산천이 광섬유에서 보통의 단일 모드 광섬유보다 훨씬 크게 나타난다. 이는 파장분할

다중화 방식에서 분산천이 광섬유를 사용하지 않고 보통의 단일모드 광섬유를 사용하는 또 다른 이유이다. 또한, 채널폭을 넓게하는 것은 장거리 전송을 위해서 사용해야하는 EDFA의 대역폭에 의해서 제한된다. 이러한 영향을 고려해서 10Gbps신호를 파장분할로 다중화하는 경우 채널폭은 수 nm정도가 적당할 것으로 예측하고 있다.

### V. 솔리톤(Soliton) 전송기술

솔리톤 전송은 광섬유에서의 비선형 현상과 색분산을 적절히 이용하여 광펄스가 변형되지 않고 광섬유를 진행하도록 하는 방법으로 초고속 신호의 초장거리 전송에 이용할 수 있다. 솔리톤 전송의 원리를 살펴보면 다음과 같다.

광섬유에 강한 빛의 펄스를 보내면 광섬유의 비선형성에 의해서 자기위상변조가 일어나서 펄스의 leading edge에 장파장이, falling edge에 단파장이 위치하는 chirping이 생긴다. 펄스의 파장이 광섬유의 이상분산영역이라면 처핑된 펄스는 진행하면서 압축하려고 할 것이다. 한편 파이버의 색분산은 펄스폭을 증가시키면서 자기위상변조에서와는 반대방향으로 chirping을 유기한다. 이와같이 펄스를 압축하려는 힘과 펄스폭을 늘리려는 힘이 서로 상쇄되면서 펄스가 광섬유를 왜곡없이 진행하는 것을 솔리톤이라하며, 이때 펄스는 마치 하나의 입자처럼 서로 충돌한 후에도 그 성질을 보존하는 행동한다고 해서 붙여진 이름이다.

이상적인 상황에서의 솔리톤은 색분산의 영향을 받지 않으나, 실제로 광섬유를 진행하는 광펄스는 광섬유의 손실 때문에 펄스의 강도가 감소한다. 이는 광펄스가 경험하는 비선형 현상을 감소시키므로 어느 정도의 광섬유를 진행한 펄스는 솔리톤 펄스가 되지 못한다. 그래서 광증폭기를 이용하여 펄스의 강도를 키워주어야 한다. 솔리톤 펄스를 증폭시키기 위해서는 여러가지 광증폭기가 연구되었으나, 최근에 개발된 EDFA가 가장 많이 사용되고 있다. 표 2에 여러가지 솔리톤 전송실험결과를 종합하였으며<sup>[20,32-35]</sup>, 직접변조 방식이나 외부변조기를 사용한 방식의 광링크보다 전송거리가 훨씬 길다는 것을 알 수 있다. 특기할만한 결과는 AT&T Bell Lab.에서 성공한 11.

표 2. 솔리톤 전송 실험결과

전송속도	전송거리	변조/복조	광증폭기	기관	비고
10 Gbps	1200 Km	ED/OD source : gain switched DBF	24 EDFA 50 Km span loss 11.5 dB	NTT EL '92 M. Nakazawa	Soliton Trans. Sensitivity -29.4 dB
20 Gbps	1020 Km	ED/OD	30 EDFA + a pre-EDFA 50 Km span	NTT EL '92 M. Nakazawa	Soliton Trans. Sensitivity -30.0 dBm
32 Gbps	90 Km	ED/OD 4 Gbps * 8 Optical DMUX	4 EDFA (1 booster)	AT&T OFC '92 M.A. Olsson	Soliton 전송
10 Gbps	11,000Km	ED/OD source mode locked LD	80 Km loop	AT&T EL '92 L.F. Hollenauer	2.5 Gbps 17,000 Km 5 Gbps 15,000 Km
10 Gbps	1820 Km	Electroabs. modulation	22 EDFA 14 dB gain 66 Km span	KDD R&D Japan ECCO '91 H. Edagawa	Soliton trans. Sensitivity -30.7 dBm BER 10 <sup>-11</sup>

000km의 10Gbps 전송실험결과<sup>[20]</sup>와 광학적 MUX와 4 광파혼합을 이용한 완전광 DMUX를 이용한 32Gbps의 90km 솔리톤 전송실험결과이다.<sup>[34]</sup>

솔리톤 전송의 핵심기술은 광섬유에서의 솔리톤의 전송특성을 이해하고 솔리톤 펄스를 만드는 초단펄스 생성기술이다.<sup>[36]</sup> 솔리톤 펄스를 생성하는 방법은 반도체 레이저의 이득 스위칭을 이용하는 방법과, 반도체 레이저 모드록킹을 이용하는 방법이 있다. 반도체 레이저의 이득 스위칭 하여 얻은 펄스는 펄스에 처핑이 존재하므로 솔리톤 펄스를 생성하기 위해서는 이 펄스를 좁은 대역폭을 갖는 필터를 통과시켜 펄스에 존재하는 처핑을 제거하여 주어야 한다. 반도체 레이저의 모드록킹을 이용하여 솔리톤 펄스를 생성하는 경우도 펄스폭이 짧은 펄스를 생성하는 것보다 펄스에 처핑이 없는 transform limited 펄스를 생성하는 것이 중요하다. 최근에는 EDFA를 이용하는 광섬유 레이저를 모드록킹하여 솔리톤 펄스를 생성하려는 연구<sup>[37]</sup>와 흡수형 외부변조기를 이용하여 솔리톤을 생성하려는 연구<sup>[38]</sup>도 진행되고 있다.

VI. 결론

10 Gbps이상의 초고속 광전송 장치에서는 광링크 및 MUX/DMUX기술을 제외한 많은 분야의 기술이 2.5Gbps에서 습득한 것을 토대로하여 개발할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, BISDN등과 연계되므로 통신망관련 기술과 보다 많은 교류 및 상호보완이 이루어져야 할 것으로 예측된다.

10Gbps 광링크와 100Gbps급 광링크의 전송거리를 제한하는 요인은 1) 전자소자 및 광자소자의 스위칭 속도, 2) 광섬유의 색분산, 3) 광섬유의 광학적 비선형성을 들 수 있다. 반도체 레이저의 성능은 10 Gbps급의 광통신 링크에서 직접변조방식을 택하느냐 아니면 외부변조기를 이용하는 방식을 하느냐를 결정하게 되므로 이에 대한 연구는 매우 중요하다. 색분산 보상법으로는 분산천이 광섬유를 사용하는 방법등 여러가지 대안이 연구되어야 한다. 색분산에 의한 전송거리의 제한 및 소자의 스위칭 속도에 의한 전송거리의 제한을 극복하고 기포설된 단일모드 광섬유를 이용하고자 하는 열망이 파장분할 다중화 방식의 광링크 개발의 동기를 부여해주고 있다. 어떠한 다중화 방식을 택하건 초고속 장거리 전송에서는 광섬유에서 전송되는 빛의 세기를 증가시키기 위해 송신단에서 booster 광 증폭기를 사용하고 또, 증계기대신 EDFA를 사용한다.

參考文獻

- [1] 한국전자통신연구소, 2.5 Gbps 광전송 시스템 개발, 연구보고서, 1992.
- [2] 윤태열, 한정희, 이창희, 심창섭, "2.5Gbps 광신호의 98km 무중계 광섬유전송," 대한전공학회지 논문지 '93년 12월호에 게재예정
- [3] 이창희, 심 창섭, "10 Gbps이상의 광통신 기술동향," 전자공학회지, 20, no. 1, pp. 62-80, 1993.
- [4] Y. Suematsu, K. Iga, and S. Arai, "Advanced semiconductor lasers," *Proceedings of IEEE*, 80, pp. 383-397, 1992.
- [5] M. Suzuki, H. Tanaka, H. Toga, S. Yamamoto, and Y. Matsushima, " /4-shifted DBF laser/electoabsorption modulator integrated light source for multigigabit transmission," *IEEE J. Lightwave Tech.*, 10, pp.90-95, 1992
- [6] N. Noguchi, O. Mitomi, and Yanagibashi, "40 GHz Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical modulator with driving voltage



- of 3.6 V," *Digest of 4th Optoelectronics Conf.*, pp. 4-5, PD2, July 15-17, Chiba, Japan, 1992.
- [7] J.E. Zucker, "Integrated multiple quantum well amplifier and Mach-Zehnder modulator," *Digest of 4th Optoelectronics Conf.*, pp. 318-319, 17C3-1, July 15-17, Chiba, Japan, 1992.
- [8] 한국통신, "광섬유, 광케이블 규격," 통신 6145-3281-파, 1991.
- [9] C. Rolland, L. E. Tarof, and A. Somani, "Multigigabit networks : The challenge," *IEEE Lightwave Telecommunication Systems*, pp. 16-26, May, 1992.
- [10] Y. Miyajima, T. Sugawa, and Y. Fukasaku, "38.2 dB amplification at 1.31  $\mu\text{m}$  and the possibility of 0.98  $\mu\text{m}$  pumping in Pr<sup>3+</sup> doped Fluoride fiber," 1991 *Topical meeting on Opt. Amplifiers and thier Applications*, paper PdP1-1, Snowmass, Colo., USA, 1991.
- [11] P. Monteiro, J.N. Matos, A. Gameiro, and J.R.F. da Rocha, "10 Gbit/s timing recovery circuit using dielectric resonator and active bandpass filters," *Electron. Lett.*, 28, pp. 819-821, 1992.
- [12] E.M. Kimber, B.L. Patel, I. Hardcastle, and A. Hadjifotiou, "High performance 10Gbit/s pin-FET optical receiver," *Electron. Lett.*, 28, pp.120-122, 1992.
- [13] A. H. Gnauck, C. A. Burrus, and D. T. Ekholm, "A transimpedance APD optical receiver operating at 10 Gb/s," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 4, pp.468-470, 1992.
- [14] A. H. Gnauck and C. R. Giles, "2.5 and 10 Gb/s transmission experiments using a 137 photon/bit Erbium-fiber preamplifier receiver," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 4, pp. 80-82, 1992.
- [15] N. Suzuki and T. Ozeki, "Laser-chirp compensation by fiber nonlinearity and dispersion in high-speed long-haul optical transmission system," *Digest of Optical Fiber Comm. Conf.*, p. 256, paper FC7, Feb. 21-26, San Jose, CA, USA, 1993.
- [16] N. Henmi, T. Saito, M. Yamaguchi, and S. Fujita, "10 Gb/s, 100 km normal fiber transmission experiment employing a modified prechirp technique," *Digest of Optical Fiber Comm. Conf.*, p. 54, paper TuO2, Feb. 18-22, San Diego, CA, USA, 1991.
- [17] L.J. Cimini, Jr., L.J. Greenstein, A. A.M. Salsh, "Optical equalization to combat the effects of laser chirp and fiber dispersion," *J. Lightwavw Tech.*, LT-8, pp. 649-659, 1990.
- [18] A.H. Gnauck, R.M. Jopson, and R. M. Derosoer, "10-Gb/s 360-km transmission over dispersive fiber using midsystem spectral inversion," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 5, pp. 663-666, 1993.
- [19] D. Spirit, G.E. Wickens, G.E. Walker, D.L. Williams, and L.C. Blank, "140km 20 bit/s repeaterless transmission employing distributed erbium amplification," *Digest of Optical Fiber Communication Conference*, p. 51, paper Tul5, San Jose, CA, USA, Feb. 2-7, 1992.
- [20] L.F. Mollenauer, E. Lichtman, G.T. Harvey, M.J. Neubelt, and B.M. Nyman, "Demonstration of errot-free solition transmission over more than 15,000 km at 5 Gbit/s, single channel, and over more than 11,000 km at 10 Gbit/s in two-channel WDM," *Electron. Lett.*, 28, pp. 792-794, 1992.
- [21] N.A. Olsson, "Lightwave systems with

- optical amplifiers." *J. Lightwave Technology*, 7, pp. 1071-1082, 1989.
- [22] N.A. Olsson and P.A. Anderkson, "Optical technique for beyond 10-Gbit/s systems," *Digest of Optical Fiber Communication Conference*, pp. 46-47, paper Tu11, San Jose, CA, USA, Feb. 2-7, 1992.
- [23] U. Fischer, "10 Gbit/s transmission over 69 km of non-dispersion-shifted singlemode fiber with CPFSK direct modulation of 1.55  $\mu\text{m}$  BH DFB laser," *Electron. Lett.*, 28, pp. 1305-1306, 1992.
- [24] W. Wedding, "New method for optical transmission beyond dispersion limit," *Electron. Lett.*, 28, pp. 1298-1230, 1992.
- [25] Y.K. Park, S.W. Granlund, T.W. Cline, L.D. Tzeng, J.S. French, J.M. P. Delavaux, R.E. Tench, S.K. Korotky, J.J. Veselka, and D.J. Digiovanni, "2.488Gb/s-318 km repeaterless transmission using erbium-doped fiber amplifier in a direct-detection system," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 4, pp. 179-182, 1992.
- [26] O. Lumholt, K. Schusler, A. Bjarklev, S. Dahl-Petersen, J.H. Povlsen, T. Rasmussen, and K. Rottwitt, "Optimum position of isolators within erbium-doped fibers," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 4, pp. 568-570, 1992.
- [27] H. Taga, N. Edagawa, H. Tanaka, M. Suzuki, S. Yamamoto, H. Wakabayashi, N. S. Ber4gano, C.D. Davidson, G.M. Homsey, D.J. Kalmus, P. Trischitta, D.A. Gray, R.L. and Maybach, "10Gbit/s, 9,000 km IM-DD transmission experiments using 274 Er-doped fiber amplifier repeaters," *Digest of Optical Fiber Comm. Conf.*, p. 9, paper PD1-1], Feb. 21-26, San Jose, CA, USA, 1993.
- [28] U. Ohlander, D. Karlsson-Varga, S. Nilsson, J. Andre, J. Wallin, S. Lindgren, S. Lourduoss, O. Kjebon, B. Broberg, and G. Landgren, "Three section GRIN-SCH SI-MQW 1.55  $\mu\text{m}$  SI-DFB lasers for coherent telecommunications," *Digest of 18th European Conf. on Optical Communications*, pp. 181-184, paper TuB5.4, Sept. 27 - Oct. 1, Berlin, Germany, 1992.
- [29] T. Takano, T. Morimoto, H. Hasum, T. Nakamura, M. Yamaguchi, T. Sakai, and I. Mito, "1.55  $\mu\text{m}$  wavelength-tunable MQW-DBR-LDs employing bandgap energy control in all selective MOVPE growth," *Digest of 18th European Conf. on Optical Communications*, pp. 177-180, paper TuB5.3, Sept. 27 - Oct. 1, Berlin, Germany, 1992.
- [30] J.L. Zyskind, J.W. Sulhoff, J. Stone, D.J. Digiovanni, L.W. Stulz, H.M. Presby, A. Piccirilli, and P.E. Pramayon, "Electrically tunable, diode-pumped erbium-doped fiber ring laser with fiber | Fabry-Perot etalon," *Electron. Lett.*, 27, pp. 1950-1951, 1991.
- [31] Y.C. Chung, "Temperature-tuned ZnS etalon filters for WDM systems," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 4, pp. 600-602, 1992.
- [32] M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Yamada, H. Kubota, and Y. Kimura, "10 Gbit/s, 1200 km error-free soliton data transmission using erbium-doped fiber amplifier," *Electron. Lett.*, 28, pp. 817-818, 1992.
- [33] M. Nakazawa, K. Suzuki, and E. Yamada, "20 Gbit/s, 1020 km penalty-free soliton data transmission using erbium-doped fiber amplifier," *Electron.*

*Lett.*, 28, pp. 1046-1-47, 1992.

[34] N.A. Olsson and P.A. Anderkson, "Optical technique for beyond 10-Gbit/s systems," *Digest of Optical Fiber Communication Conference*, pp. 46-47, paper Tull, San Jose, CA, USA, Feb. 2-7, 1992.

[35] N. Edagawa, H. Taga, Y. Yoshida, M. Suzuki, S. Yamamoto, and H. Wakabayashi, "10 Gbit/s, 1500 km transmission experiment using 22 Er-doped fiber amplifier repeater," *Digest of 17th European Conf. on Optical Comm. ECOC '91*, pp. 76-79, post deadline paper, Sept. 9-12, Paris, France, 1991.

[36] 이 창희, 정 태형, "극초단 펄스의 새로운 생성법과 그 응용," *대한전자공학회지*, 17, pp. 488-500, 1990.

[37] T. Takara, S. Kawanishi, and M. Saruwatari, "20 GHz transform-limited optical pulse generation and bit-error-free operation using a tunable, actively modelocked Er-doped fiber ring laser," *Electronic. Lett.*, 29, pp.1149-1150, 1993.

[38] M. Suzuki, H. Tanaka, N. Edagawa, K. Utaka, and Y. Matsushima, "Transform-limited optical pulse generation up to 20-GHz repetition rate by a sinusoidally driven InGaAs electroabsorption modulator," *J. Lightwave Tech.*, 11, pp. 468-472, 1993. Ⓢ

筆者紹介



沈昌燮

1952年 5月 6日生  
 1975年 2月 서울대학교 응용 물리학과(학사)  
 1987年 7月 한남대학교 대학원 물리학과(석사)  
 1994年 2月 한국과학기술원 전기.전자공학과 박사예정

1975年 2月 ~ 1982年 12月 국방과학연구소 선임연구원  
 1983年 3月 ~ 현재 한국전자통신연구소 책임연구원(광통신 연구실장)

주관심분야 : 광통신 시스템 및 반도체 레이저 개발

- 565 Mbos 광전송 장치 개발
- 2.5 Gbps 광전송 장치 개발
- 10Gbps 광전송 장치 개발