

10 Gbps급 이상의 광통신 기술동향

李昌熹, 沈昌燮

韓國電子通信研究所 光通信研究室

본 논문에서는 차세대 통신 서비스 시스템으로 부각되고 있는 광대역 종합 통신망(broadband integrated service digital network(BISDN))을 구현하기 위한 핵심 전송기술인 10 Gbps급 이상의 광통신 기술동향을 분석하였다. 10 Gbps급 이상의 광통신을 구현하기 위한 다중화 방법인 시간 분할 다중화와 주파수 분할 다중화 방식에서의 기술적인 문제점을 기존의 보고된 문헌을 중심으로 분석하였으며, 광섬유에서의 색분산을 보상하는 여러가지 전송 방법들에 대해서도 자세히 검토하였다.

I. 서론

최근의 정보통신은 비데오 회의, 고화질 TV 분배, 영상전화 같은 다양한 서비스를 요구하고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 고속 대용량의 전송시스템이 필요하며 선진국에서는 이미 synchronous optical network(SONET) 시스템인 2.5 Gbps급(OC48) 광통신 시스템이 전송거리 40 km로 상용화 단계에 있고, 최근에 전송거리 80km 시스템의 개발이 완료되었다. 우리나라에서는 '86년에 90 Mbps, '90년에 565 Mbps급 광통신 시스템이 한국전자통신연구소에서 개발을 끝내고 상용화되었으며, 2.5 Gbps급 광통신 시스템이 '93년에 개발 완료될 예정이다. 현재 세계적으로 차세대의 통신 및 서비스 시스템으로는 광대역 종합 통신망(broadband integrated service digital network)을 구상하고 있다. 이를 실현하기 위해서 비동기식 교환망(asynchronous transfer mode)이 활발히 연구되고 있으며, 광대역 종합통신망

을 이루기 위한 핵심 전송기술로서 10 Gbps급 광통신 기술이 부각되고 있다^[1]. 그래서 미국, 일본등의 선진국에서는 이에 대한 연구를 몇 년전부터 시작하여 실험실에서의 동작에 성공하였다. 우리나라에서는 '93년부터 광대역종합통신망에 대한 연구가 G7과제의 일환으로 시작될 예정이다. 이 시점에서 10Gbps급 이상 광통신 시스템의 지금까지 연구결과 및 이를 구현하는데 필요한 핵심기술 그리고 광대역전송 시스템의 앞으로의 방향을 검토해 보는 것은 매우 의미있는 일이라 생각되어 광통신 시스템의 핵심기술인 광 링크에 관련된 기술들에 국한해서 검토하고자 한다.

광 링크에 대한 연구는 반도체 레이저 및 저손실의 광섬유가 개발되면서 본격화되었으며, 1 세대 광 링크로서 GaAs 반도체 레이저를 이용한 850 nm 대의 광전송이 개발되었다. 광섬유는 제작이 쉬운 step index 다중모드 광섬유에서 modal dispersion이 작은 graded index 다중모드 광섬유로 발전되었으며, 곧 modal dispersion이 없는 단일모드 광섬유를 사용하기 시작하였다. 단일모드 광섬유에서는 색분산과 손실이 광링크의 전송거리를 결정한다. 광링크의 전송거리를 길게 하기 위해서 광섬유에서의 색분산이 최소이고 광섬유의 손실도 850 nm보다 낮은 1,310 nm 부근을 이용하는 2 세대의 광 링크가 등장하였다. 이 때 광원은 InGaAsP 반도체 레이저이다. 색분산의 영향은 직접변조시에도 단일모드로 발전하는 1,310 nm 대의 distributed feedback(DFB)반도체 레이저가 개발되면서 최소화되었고 본격적인 대용량 장거리 전송이 시작되었다. 아울러 광섬유의 손실이 최소인 1,550 nm 부근에서 광 링크 구현에 대한 열망은 색분산이 최소인 파장을 1,310 nm 부근에서 1,550 nm 부근으로 변경시킨 분산천이 광섬유를 개

발하였고, 1,550 nm대에서 직접 변조시에 단일모드로 발진하는 DFB 레이저를 개발하였다. 이러한 성과와 광섬유의 손실을 보상해줄 수 있는 Er-doped fiber amplifier(EDFA)의 개발은 광링크의 전송과장을 1,310 nm대에서 1,550 nm대로 전환시키고 있다. 본 논문에서의 광 링크는 특별한 첨언이 없으면 1,550 nm 대의 광링크를 지칭한다.

본 논문의 제 2장에서는 10 Gbps 이상의 시분할 다중화 광링크 구현에 필요한 핵심 기술 및 기술적인 문제점을 반도체 레이저 직접변조방식과, 외부변조기를 이용하는 방식, 그리고 광학적 MUX/DMUX 방식으로 나누어서 검토하였으며, 광섬유의 손실 및 색분산의 영향을 극복할 수 있는 방법들에 대해서도 자세히 검토하였다. 제 3장에서는 파장분할 다중화 광링크의 구현에 있어서의 문제점과 광파통신의 구현에 필요한 핵심 기술들을 검토하였다. 마지막으로 제 4 장에는 결론을 실었다.

II. 시분할 다중화 광 링크

1. 반도체 레이저 직접변조방식의 광링크

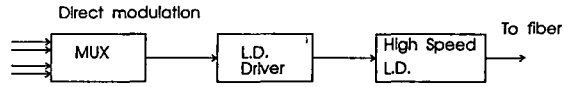
광통신 시스템의 핵심인 광 링크는 송신기, 전송로인 광섬유, 그리고 수신기로 구성된다. 그림 1(a)와 (b)는 반도체 레이저를 원하는 전송속도의 전기신호로 직접변조하여 전기신호를 광신호로 변환하고 이를 광섬유를 통해서 전송한 다음 직접 검출하여 광신호를 전기신호로 변환하는 광링크의 구성도이다. 이러한 방식의 광링크는 기존의 90 Mbps, 155 Mbps, 565 Mbps, 2.5 Gbps 등의 시스템에서 사용하는 방식으로 다른 방식에 비해서 가장 간단하고 저렴하게 광링크를 구현할 수 있으며, 그 신뢰성도 많은 실험을 통해서 확인되었다. 10 Gbps 이상의 전송실험도 실험실 레벨에서 성공되고 있으며, 표 1에 지금까지의 결과를 나타내었다^{[2] ~ [6]}. 가장 괄목할 만한 결과는 Bellcore에서 수행한 실험으로 광증폭기를 사용하지 않고 11 Gbps 광신호를 81 km 전송에 성공한 것이다^[6]. 그러나, 10 Gbps급 이상의 광링크가 실용화되기 위해서는 다음과 같은 기술적인 문제들을 해결해야 한다.

1) 소자의 스위칭 속도에 의한 제한

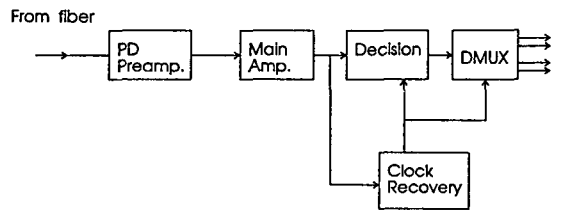
(1) 광검출기

10 Gbps급 이상의 광 링크를 구현하기 위해서 해

결되어야 할 첫번째 기술적인 문제는 사용하고자는 광자소자 및 전자소자의 스위칭 속도의 개선이다. 광자소자는 반도체 레이저와 광검출기가 있다. 광원인 반도체 레이저의 특성개선에 대해서는 다음 절에서 자세히 검토하기로 하고 여기서는 광검출기에 대



(a)반도체 레이저 직접변조방식을 이용하는 광링크 송신기의 구성도



(b)반도체 레이저 직접변조방식을 이용하는 광링크 수신기의 구성도

그림 1.

표 1. 반도체 레이저 직접변조방식을 이용한 광링크 실험결과

전송속도	전송거리	chirping	광증폭기	기관	비 고
10 Gbps	140Km	0.4nm at -20dB	a booster and a preamp. EDFA	Hitachi ECOC '91 H. Nakano	Sensitivity -26.5 dBm
10 Gbps	20Km	0.52nm at -20dB	no EDFA	Toshiba ECOC '91 H. Yamakawa	Sensitivity -17 dBm
11 Gbps	81Km		no EDFA	Bellcore EL '89 J.L. Gimlett	Sensitivity -19.8 dBm
10 Gbps	50Km	strained MQW DFB laser 0.35 nm at -20 dB	no amplifier	NTT EL '91 Y. Miyamoto	Sensitivity -23 dBm (APD) DSF, 1.3 μ m
16 Gbps	64.5Km	35 dB SMSR	SL preamp.	AT&T EL '89 A.H. Gnaouk	pin-FET receive 1.3 μ m with normal fiber

해서 알아보자. 광통신에 사용되는 광검출기로는 대부분 InGaAs 반도체를 이용하여 제작하며 PIN 검출기와 avalanche photodiode(APD)가 있다. PIN 검출기는 p-i-n 반도체 접합으로 i-영역에서 흡수된 빛에 의해 생성된 전자와 정공이 역방향으로 바이어스된 전계에 의해 각각 n과 p영역으로 이동하면서 광전류를 만든다. 이의 대역폭은 10Gbps 시스템에 사용할 수 있을 정도로 충분히 넓다. 그러나 이를 사용하는 경우 수신기의 수신감도(receiver sensitivity)가 열잡음에 의해서 결정되므로 APD를 사용하는 경우보다 수 dB 정도 떨어진다. APD의 구조는 PIN 검출기와 유사하나 생성된 전자와 정공이 i-영역의 높은 전계에 의해서 가속되어 다수의 새로운 전자 정공을 생성하여(avalanche 과정) 높은 광전류를 얻을 수 있다. 이는 등가적으로 PIN 검출기와 거의 이상적인 증폭기를 연결한 것과 같아서 수신감도가 열잡음이 아닌 양자역학적 한계인 산탄잡음(shot noise) 및 무작위적인 전자 정공의 증배(전자와 정공의 증배율이 차이)로 인한 잡음에 의해서 결정되므로 높은 수신감도를 얻을 수 있다. 10 Gbps에서 PIN 검출기를 사용하여 수신감도 -19.8 dBm^[4], APD를 사용하여 -23 dBm까지 얻은 결과^[5]가 보고되었다. APD를 10 Gbps 광링크에 사용하기 위해서는 이득과 대역폭을 곱한 것이 100 GHz 정도인 것이 요구된다. 최근에 Hitachi사에서 발표한 이득과 대역폭의 곱이 110 GHz이고, 대역폭이 12 GHz인 APD가 보고되었다.^[7] APD는 i-영역의 전자/정공 build-up 시간에 의한 제한으로 인하여 그 사용한계가 10 Gbps 정도일 것으로 예측되고 있다^[8]. 이와같이 PIN 검출기에 비해서 제작이 어려운 APD를 사용하지 않고 PIN 검출기를 사용하면서 EDFA를 pre-amp.로 이용하여 수신감도를 높이려는 연구가 진행되고 있으며 최근에 10 Gbps에서 -36dBm의 수신감도를 얻은 결과가 보고되었다^[9]. 이는 지금까지 EDFA를 사용하여 얻은 최고의 수신감도이다. 그러나, EDFA 가격이 너무 비싸므로 단거리 통신에서는 APD를 사용하는 것이 경제적이다.

(2) 전자소자

다음은 전자소자에 대해서 알아보자. 반도체 레이저 직접변조 방식을 이용하는 광링크의 핵심전자소자는 송신단의 MUX, 반도체 레이저 드라이버가 있다. 또, 수신단에는 pre-amp., main amp., limiting amp., clock 재생회로, decision 회로,

DMUX가 있다. 디지털 스위칭소자인 레이저 드라이버, MUX, DMUX, clock 재생회로, decision 회로의 경우 10Gbps용으로는 스위칭 시간이 최소한 50ps 이하가 되어야 한다. 특히 송신단의 레이저 드라이버의 경우는 20mA - 100 mA 정도의 전류를 스위칭할 수 있는 고효율의 디지털 스위칭 소자가 필요하다. 10 Gbps의 광링크에 사용하기 위해서는 선형 증폭기인 pre-amp. 및 main amp.의 경우는 증폭기의 대역폭이 수 KHz-7GHz 정도 되어야 한다. 또한 pre-amp.는 대역폭도 중요하지만 수신감도를 높이기 위해서는 noise figure도 낮아야 한다. 10 Gbps급 이상의 clock recovery회로에는 기존의 SAW 필터를 사용하기가 어려우므로, 유전체 공진기 등을 이용한 협대역 밴드 통과 필터를 사용하여야 한다^[10]. 현재 10Gbps급 이상의 전자소자는 Si 및 GaAs를 이용하여 일부 연구소에서 구현하고 있으며, 대표적인 결과를 표 2에 정리하였다^{[10] ~ [16]}. 일본 NTT의 자회사인 NEL에서는 10 Gbps용

표 2. 10Gbps급 이상 전자소자의 개발 현황

소자및규격	기 관	비 고
27 Gbps 4 : 1 MUX, 27 Gbps 1 : 2 regenerating	Bellcore	GaAs HBT
30Gbps 2 : 1 MUX DMUX	OFC '92	
20 Gbps decision circuit, 11 Gbps laser driver	K. Runge	
10 Gbps receiver(preamp. AGC amp. DEC IC)	NEC OFC '92 K. Ishikawa	HBT Sensitivity -16.2 dBm
10 Gbps timing recovery circuit using dielectric resonator and active BPF	U. of Averio, Portugal EL '92 P. Monteiro	
10 Gbps bipolar laser driver(HBT) Modulation current 100mA rise/fall time 35/40 ps 3 dB BW 12.3GHz	AT&T EL '91 M. Banu	
23 Gbps Si bipolar decision circuit with 24 Gbps MUX/DMUX (DMUX - decision - MUX)	Ruht Univ. Germany EL '91 H. M. Rein	
10 Gbps decision circuit phase margin 240 degrees sensitivity 27 mV	AT&T EL '91 P.K. Montgomery	
20 Gbps MUX(Si bipolar) clock phase margin 150 degrees	Ruht Univ. EL '91 J. Hauenschild	Maximum 24 Gbps

MUX/DMUX, clock recovery, decision circuit, main amp. 등의 일부 전자소자를 판매하기 시작하였다. 지금까지 설명한 바와 같이 광자소자나 전자소자의 속도제한으로 인한 광 링크의 전송 속도 제한을 극복하고 보다 고속 전송이 가능한 광 링크를 구현하기 위해 광을 이용한 multiplex(MUX)/demultiplex(DMUX)와 optical clock 재생 방식들이 연구되고 있으며, 자세한 내용은 3절에 기술하였다.

2) 반도체 레이저의 동특성 및 광섬유의 색분산에 의한 제한

광 링크에서 전기신호를 광신호로 변환하는 반도체 레이저의 여러가지 특성중에서 광링크의 특성에 영향을 미치는 것은 변조대역폭과 변조시에 생기는 chirping, timing jitter 등이다. 특히 chirping은 광섬유에서의 색분산과 결부되어 시스템의 성능을 현저히 저하시킨다. 직접변조 방식의 10 Gbps 시스템에 반도체 레이저를 사용하기 위해서는

- 변조 대역폭이 7 GHz 이상이며
- 변조시 chirping이 적고(-20 dB 발진선폭 0.5 nm 이하)
- timing jitter가 25 ps 이하인 특성이 필요하다. 반도체 레이저의 변조폭은 실험실에서는 20GHz 이상이 이미 보고되었으므로^[17] 변조대역폭에 관한 아무런 문제가 없다고 할 수 있다. 그러나, 반도체 레이저의 직접변조시에 생기는 chirping, timing jitter 등이 10Gbps 광링크의 성능을 저하시키는 원인이 되고 있다.

(1) Timing jitter

반도체 레이저 직접변조시의 pattern effect와 timing jitter는 반도체 레이저의 동특성에 의해서 좌우되는 것으로 그 물리적 원리를 살펴보면 다음과 같다. 반도체 레이저를 발진임계전류 밀도로 바이어스하고, data를 변조신호로 공급하는 경우에 data가 "0" 상태를 여러 비트 지속하다가 "1"이 되는 경우와 "1"과 "0"가 계속 반복되는 경우에 레이저가 "OFF"에서 "ON"으로 천이되는 시간이 다르고 또, "ON"이 되었을 때 레이저 출력의 최대치도 각각 다르게 된다. 이와 같이 pattern의 형태에 따라 레이저의 출력이 달라지는 것을 pattern effect라 한다. 또, 레이저가 비발진 상태에서 발진 상태로의 천이("ON"이 되는 과정)는 공진기 내의 자연방출이 레이저에 발진임계치 이상으로 전류를 흘릴 때 공진기를 왕복

하면서 증폭·발진되어 출력이 나오는 과정으로 이해된다. 그러므로 레이저가 발진상태로 천이하는 시간은 레이저가 발진상태로 천이하려는 순간의 공진기내의 자연방출의 양에 따라 결정된다. 불행히도 공진기내의 자연방출의 양은 무작위적으로 바뀌므로 레이저에 변조신호가 가해지고 나서 레이저가 "ON"이 되는 시간도 무작위적이다. 이와같이 변조된 광신호의 펄스 위치가 시간축에서 흔들리는 것을 timing jitter라 한다. 레이저가 발진임계전류 이하로 바이어스된 경우는 pattern에 따라 레이저가 비발진에서 발진으로 천이하는 시간이 다르므로 timing jitter가 더 심각해진다. 한가지 언급해야 할 것은 반도체 레이저의 timing jitter는 고주파 jitter로 수신기의 clock 재생회로에서의 저주파 jitter와는 다르다. 지금까지 설명한 바와 같이 pattern effect와 timing jitter는 밀접하게 연관되어 있으며, 레이저를 발진임계전류 이상으로 바이어스 하면 감소된다. Timing jitter에 의한 power penalty가 1 dB 이하로 되기 위해서는 jitter의 양이 전송주기의 1/4 이하가 되어야 하므로 10 Gbps용 레이저는 변조시의 jitter가 25 ps 이하이어야 한다^[18].

(2) Chirping

다음으로는 반도체 레이저 직접변조시 생기는 chirping에 대해서 자세히 검토해 보자. 반도체 레이저를 직접변조하면 변조신호의 진폭에 따라 활성영역의 반송자 밀도가 바뀌고, 이는 활성영역의 굴절률 변화로 연결된다. 이와같이 굴절률이 반송자 밀도의 함수로 나타나는 것은 반도체 레이저에서의 근본적인 현상으로 레이저의 이득이 band와 band간의 천이에서 기인하기 때문이다. 활성영역의 굴절률의 변화는 바로 발진파장의 변화를 의미하므로 변조된 광신호(광펄스)의 파장이 일정한 값이 아니고 광펄스 안에서 시간에 따라 다른 값을 갖는다. 이와같은 현상을 chirping이라 부른다. 발진파장이 변화하는 정도는 반송자 밀도의 변화에 의해 굴절률이 바뀌는 정도에 따라 다르며, 반도체 레이저를 연구하는 사람들은 이를 line width enhancement factor α (굴절률의 실수성분의 변화율과 허수성분의 변화율의 비)라 부른다. 레이저의 직접변조시 발진파장이 변한다는 것은 레이저 출력의 spectrum이 변조신호에 의한 진폭 변조이외에 발진파장의 변화에 의한 주파수변조가 첨가된다는 것을 의미하므로 변조된 레이저 출력의 spectrum 폭은 변조신호의 spectrum 폭보다 훨씬

넓어진다(3 - 10 배)는 것을 의미한다. 레이저의 바이어스 전류를 발진임계전류 이상으로 하면 변조시의 반송자 밀도의 변화를 다소 감소시킬 수 있으므로 chirping의 양도 줄일 수 있다. 반도체 레이저를 직접변조하여 10 Gbps 이상의 광링크를 구현하려면 표 1에 보인 바와 같이 변조시의 발진선폭(-20 dB)이 0.5 nm 이하가 되어야 한다.

(3) Mode partition noise

레이저의 동특성으로서 광링크의 특성에 영향을 미치는 또 다른 특성은 레이저에서의 mode partition noise(MPN)이다. MPN이란 직접변조한 반도체 레이저의 종모드의 광출력 분포가 무작위적으로 바뀌는 현상으로 주로 레이저가 변조신호에 의해서 비발진 상태에서 발진 상태로 천이할 때 생긴다. 즉 천이상에서의 레이저의 발진모드의 분포는 레이저가 발진을 시작하려는 순간에 공진기에 존재하는 각 모드의 자연방출의 양에 따라서 결정된다. 자연방출은 무작위적이므로 각 모드의 자연방출의 양도 무작위적으로 변화하고 따라서 발진모드의 분포도 무작위적으로 변화한다. 이러한 현상은 주로 Fabry-Perot 레이저에서 심각하게 나타나는 현상이다. DFB 레이저에서는 레이저가 비발진 상태에서 발진 상태로 천이할 때 100 ps 이하의 시간동안 side mode가 생성되기도 한다^[20]. 이와같은 레이저 발진모드의 power 분포의 변화는 광섬유를 통과한 후 수신된 광펄스의 timing jitter로 연결되기 때문에 신호의 세기를 증가하여도 error가 감소하지 않는다. 이는 수신감도 곡선에서 error floor가 나타나는 원인이다.^[21]

지금까지의 결과(timing jitter, pattern effect, chirping)를 종합하면 10Gbps 이상의 광통신에서는 레이저의 바이어스 전류를 발진임계전류 이하로 하기가 어렵다는 것을 알 수 있다. 그러나, 레이저의 바이어스 전류를 발진임계전류 이상으로 하면, 광출력의 소광비(출력이 "1"일 때의 광출력과 출력이 "0"일 때의 광출력의 비)가 감소하여 수신기의 수신감도를 저하시킨다. 그래서 가능하면 앞에서 요구한 것과 같은 특성을 갖는 레이저(바이어스 전류가 발진임계전류 이하에서)를 구현하고자 하는 것이다. 이때 가장 문제되는 것은 다음에 설명하는 바와 같이 광섬유의 색분산의 영향을 증폭시키는 chirping이다. 근본적으로 chirping을 줄이는 방법으로는 활성영역의 굴절율이 반송자 밀도에 무관하게 만드는 것이다. 최근에 연구중인 양자우물 반도체나, strained 양자우물

반도체에서는 밴드내의 전자의 상태가 양자속박효과에 의해서 다시한번 양자화되기 때문에 굴절율의 반송자 밀도에 대한 의존율이 감소된다^[22]. 그러므로 이러한 매질을 이용하여 반도체 레이저를 제작하면 chirping이 적은 레이저를 만들 수 있다. 양자속박효과를 이용한 반도체 레이저에 관해서 선진국의 연구소 실험실들이 제작에 성공한 결과들을 많이 보고하고 있다^[22].

(4) 광섬유의 특성 : 손실 및 색분산

i) 광섬유의 손실

앞에서 설명한 반도체 레이저의 직접변조에 생기는 chirping은 우리가 사용하는 단일모드 광섬유가 이상적인 전송로라면 아무런 문제가 되지 않는다. 그러나 광섬유를 진행하는 신호는 광섬유의 손실에 의해서 감쇄되고, 색분산에 의해서 왜곡된다. 광섬유에서의 감쇄정도는 Rayleigh scattering, 불순물에 의한 흡수, atomic vibration에 의한 흡수에 의해서 결정되며, splicing에 의한 손실을 고려하면 보통의 단일모드 광섬유의 경우는 1,310nm에서 약 0.45 dB/km, 1,550nm 약 0.25dB/km 이다(현재 국내에 포설된 광섬유의 경우는 splicing 손실 0.15dB를 포함하여 1,310nm에서 0.65dB/km, 1,550nm에서 손실이 0.5dB/km이다). 광섬유의 손실만을 고려하면 40km(2.5 Gbps 시스템의 CCITT 권고 전송거리)를 1,310nm 영역에서 전송하는 경우 전체 손실은 18dB이고, 1,550nm에서 80km를 전송하는 경우의 전체 손실은 20dB이므로 2dB의 손실 차이를 레이저의 출력력을 높이거나 수신기의 수신감도를 개선하여 보상해주면 전송거리를 2배로 할 수 있다. 이러한 장점 때문에 광통신 파장이 1,310nm에서 1,550nm로 바뀌고 있다. 광섬유의 손실을 보상할 수 있는 방법으로 레이저 광증폭기가 오래전부터 연구되었다. 특히, 최근에 개발된 Er-doped fiber amplifier(EDFA)는 1,550nm 영역에서의 광섬유의 감쇄를 보상할 수 있는 이상적인 광증폭기로서, 반도체 레이저 광증폭기와 비교하여 높은 이득(30dB 이상), 넓은 이득 대역폭(20 - 30nm), 높은 saturation power(10dBm), 긴 이득의 수명(수 ms), 편광에 무관한 이득, 그리고 다른 광섬유와 접속이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 그래서 최근에는 전자적인 증계기대신 EDFA를 사용하는 광증계기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1]. 1,310nm 영역에서의 광증폭기로는 기존의 반도체 레이저 광증폭기이외에도 최근에

연구되고 있는 Pr³⁺-doped fluoride fiber 증폭기가 연구되고 있으나 아직 초보적인 단계이다^[23].

ii) 광섬유의 색분산

광섬유에서의 손실은 광증폭기로 보상이 되므로 (1,550nm 영역) 광 링크의 특성에 영향을 미치는 광섬유의 특성은 광섬유의 색분산이다. 광섬유의 색분산은 광섬유에서의 군속도가 파장에 따라 다르기 때문에 생기는 현상으로 광펄스가 진행하면서 펄스폭이 넓어지는 정도를 나타낸다. 전송한 펄스폭이 넓어지면 intersymbol interference가 일어나서 에러가 생긴다. 이를 제거하기 위해서는 수신되는 광전력을 높게 해야 하므로(신호 대 잡음비를 높이기 위해서) 전송거리가 단축된다. 색분산은 ps/nm-km로 나타내고 1,310nm 부근에서 ±2ps/nm-km이고 1,550nm 부근에서 17ps/nm-km이다. 색분산의 영향은 전송파장이 1,550nm (색분산이 1,310nm 영역의 10배)로 이동되고, 전송속도가 증가하고, 전송거리가 길어지면서 그 영향이 더 심각해져서, 이제는 광섬유의 색분산이 광통신의 용량을 결정하는 주요인이 되고 있다(1,550nm 영역에서의 2.5Gbps 이상의 광통신에서는 색분산에 의한 신호의 왜곡에서 기인하는 전송거리의 제한을 고려하지 않으면 안된다). 여기서 한가지 언급하고 싶은 것은 앞에서 설명한 반도체 레이저의 직접변조시 생기는 chirping에 의한 발진선폭의 증대는 색분산의 영향을 더욱 증대시켜서 전송거리를 단축하는 요인이 되고 있다. 색분산에 의해서 1 dB의 power penalty가 생기는 전송거리는 다음과 같이 주어진다^[24].

$$L = \frac{c}{4\lambda^2 D B \sigma_l}$$

여기서 c 는 빛의 속도, λ 는 중심파장, D 는 광섬유의 색분산 상수, B 는 전송 bit rate, σ_l 은 레이저의 RMS(root mean square) 발진 선폭이다. 정상적인 광섬유($D = 17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$)를 사용하면 색분산에 의해서 제한되는 10Gbps(chirping의 영향을 무시한 경우)신호의 전송거리는 60km(2.5Gbps는 480km)이다. 그러나, 직접변조한 반도체 레이저의 chirping을 고려하면 전송거리가 10km이하로 감소한다. 이는 10Gbps급 이상의 광통신 시스템에서는 색분산의 영향을 보상해 주지 않으면 장거리 전송이 불가능하다는 것을 단적으로 보여주고 있다. 색분산을 보상해

주는 가장 근본적인 방법은 분산천이 광섬유를 사용하는 것이다. 분산천이 광섬유의 경우 손실은 보통의 단일모드 광섬유보다 약 10% 정도 많으며 색분산은 1550nm 부근에서 약 ±2ps/nm-km정도로 최소값을 갖는다. 이 경우는 보통의 단일모드 광섬유와 비교하여 약 10배정도 전송거리를 길게할 수 있다. 분산천이 광섬유를 사용하는 경우 가장 큰 단점은 분산천이 광섬유를 다시 전 전송구간에 포설해야 한다는 점이다. 그래서 기존의 포설된 단일 모드 광섬유를 이용하기 위해 여러가지 색분산 보상법이 연구되고 있다. 이에 대해서는 색분산 보상법을 다루는 절에서 자세히 검토하기로 한다.

반도체 레이저를 직접변조하면서(외부변조기를 사용하지 않고) chirping 및 색분산에 의한 전송거리의 제한을 극복하고자 하는 연구도 진행되고 있다. 예를 들면 반도체 레이저를 주파수 변조하고 이를 MZ 간섭계를 통과시켜서 진폭변조된 신호로 바꾸어서 전송하여 수신하는 방식^[25]과, 주파수변조된 신호를 전송하고 광섬유의 색분산을 이용하여 주파수 변조된 신호를 진폭변조된 신호로 바꾸어서 수신하는 방식^[26]이 있다. 두가지 방식 다 반도체 레이저에서의 chirping을 오히려 역으로 이용하는 전송방식으로 앞으로 계속 연구할 가치가 있다.

2. 외부변조기 이용방식의 광링크

그림 2는 반도체 레이저의 직접변조시에 생기는 chirping과 광섬유의 색분산에 의해서 제한되는 전송용량 및 전송거리를 증가시키기 위해서 초고속 반도체 레이저를 상대적으로 속도가 느리고 발진 선폭이 좁은 반도체 레이저와 변조시 chirping이 적은 외부변조기로 대체한 것이다. 여기서 변조신호는 외부변조기에 가해지고 반도체 레이저에는 바이어스 전류만 가하고 발진선폭을 최소화한다. 수신단은 직접변조방식의 경우와 동일하다. 외부변조기를 사용하는 경우 또 다른 장점으로서는 반도체 레이저를 직접변조한 경우보다 timing jitter가 감소된다는 점을 들 수 있으나, 외부변조기의 삽입손실이 커서 송신단에서 별도의 광증폭기가 필요로 하는 경우가 많으며, 아직 외부변조기의 신뢰성이 확인되지 않았으며, 시스템이 복잡해진다는 단점이 있다.

1) 흡수형 외부변조기

외부변조기는 흡수율을 변조하는 흡수형과 굴절율을 변조하고 간섭계를 이용하는 간섭계형이 있다.

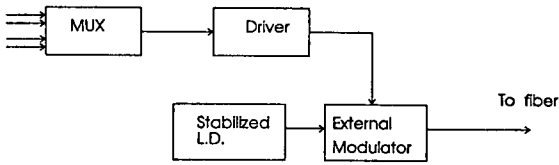


그림 2. 외부변조기를 사용하는 광링크 송신기의 구성도

흡수형은 III-V 반도체 bulk나 양자우물구조를 이용하여 구현한다. 이러한 변조기는 기존의 반도체 공정을 이용할 수 있고, 또 반도체 레이저와 monolithic 하게 집적화 할 수 있는 장점이 있다. 먼저 bulk 반도체를 이용하는 흡수형 변조기는 Franz-Keldysh 효과(전계를 가하면 absorption edge가 낮은 에너지 쪽으로 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 excitation의 absorption peak가 전계를 가하면 낮은 에너지 쪽으로 이동하는 현상이다. 외부변조기는 빛을 효과적으로 변조하기 위해 광도파로를 이용하여 만든다. 흡수형 외부변조기의 길이는 70 - 200 μm , 변조대역폭은 10 - 40 GHz, 동작전압은 2 - 4(V)이며 이 때 변조된 광의 소광비는 10 - 25dB이다^[1]. 일반적으로 다중 양자우물구조 변조기가 bulk 반도체 변조기보다 2배정도 효율이 좋다. 흡수형 변조기의 α 값은 0.2 에서 1 정도이다. 이론적으로는 이 값은 $|E - E_g| < 30 \text{ meV}$ 에서 "0" 혹은 "-" 값을 갖는 것이 밝혀 졌지만 아직 실험적인 결과는 없다. 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.

2) 간섭계형 외부변조기

다음은 간섭계형 외부변조기를 살펴보자. 간섭계형 변조기를 구현하는 대표적인 매질은 전기광학매질(전계를 가하면 굴절율이 변하는 매질)인 LiNbO₃ 이고,

주로 MZ(Mach - Zehnder) 간섭계를 이용하여 전기광학효과에 의한 위상변조를 진폭변조로 바꾸고 있다. 간섭계형 변조기는 앞의 흡수형 변조기에 비해서 길이가 매우 길므로(수 센티미터) 10Gbps용을 구현하기 위해서는 진행파형 전극구조를 이용한다(그렇지 않을 경우는 전극의 정전용량에 의해 변조 대역폭이 제한되어 10Gbps용 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 외부변조기를 push-pull 형식으로 구동(변조기의 두 개의 arm에 위상이 반대인 동일한 전압을 인가)하면 α 값은 "0"이 되고 변조시의 chirping을 제거할 수 있다. 또, 두 전극에 가해지는 전압의 위상과 진폭을 조정하여 α 값을 -1에서 +1까지 변화시킬 수 있다. 이는 다음에 설명하는 바와 같이 광 링크의 전송거리를 길게 할 수 있는 중요한 장점이다. 간섭계형 변조기는 앞의 흡수형 변조기보다 그 제작기술이 성숙되어 있지만 아직도 long term stability(약 20 년)에 문제가 있다(변조신호의 바이어스점이 변조기에 가해지는 DC전압, 온도, 습도, stress등에 매우 민감함). 지금까지 보고된 LiNbO₃ 외부변조기의 최대 변조대역폭은 최근에 40GHz이고 이 때의 스위칭 전압은 3.5 (V)이다^[27]. 최근에는 반도체에서의 전기광학효과 및 QCSE를 이용한 간섭계형 변조기도 연구되고 있다^[28].

3) 외부변조기에서의 chirping

지금까지 설명한 바와 같이 외부변조기의 linewidth enhancement factor α 는 -1 에서 1 정도이다. 이는 반도체 레이저의 $\alpha \sim 5$ 보다 훨씬 적은 값이다. 이해를 돕기 위해서 실제 변조된 광의 선폭을 보면, 반도체 레이저를 10Gbps로 직접변조하면 chirping에 의해서 광출력의 3dB 선폭은 약 40 GHz 이상이나 외부변조기를 사용하면 광출력의 선폭이 10GHz 정도이다. 외부변조기에서 변조시 chirping이 생기는 것은 변조의 원리를 살펴보면 알 수 있다. 즉 변조신호를 인가하면 변조신호가 외부변조기를 구성하는 매질의 굴절율 혹은 흡수율을 변화시킨다. 흡수율의 변화는 Kramer-Kronig 관계에 의하여 굴절율 변화로 연결된다. 변조시 매질의 굴절

율이 바뀐다는 것은 변조기를 통과하는 빛의 위상이 변한다는 것이므로 chirping(위상의 변화를 시간에 대해 미분한 것)이 생긴다. 다만 그 양이 직접변조한 반도체 레이저의 경우보다 작다는 것이다.

외부변조기에서의 이러한 소량의 chirping이나 직접 변조한 반도체 레이저에서의 chirping은 광링크의 전송거리를 향상시키는데 역으로 이용할 수도 있다. 이를 이해하기 위해서 먼저 chirping이 없는 펄스가 광섬유를 진행하는 것을 보자. 펄스의 파장이 광섬유의 이상분산영역(장파장이 단파장보다 느리게 진행되는 영역)인 경우에 국한해서 생각하기로 한다. 광섬유의 색분산에 의해 광섬유를 진행하는 펄스의 폭은 증가하고 단파장은 펄스의 leading edge로, 장파장은 펄스의 falling edge로 이동하여 펄스에 chirping이 생긴다. 여기서는 광섬유의 비선형 특성을 고려하지 않으므로 광펄스의 spectrum 폭은 광섬유의 위치에 따라 변화하지 않는다. 만약 입력 펄스가 leading edge에 장파장이, falling edge에 단파장이 오도록 chirping이 되어 있으면 이 펄스는 광섬유를 진행하는 동안 처음에는 chirping의 양이 감소하면서 펄스폭도 감소하고, chirping이 최소가 되는 점을 지나면 다시 펄스폭이 증가하면서 이번에는 반대방향으로 chirping이 생긴다. 그래서 chirping이 없는 펄스를 전송하는 경우보다 원하는 방향으로 chirping된 펄스를 전송하면 광섬유의 분산에 의한 펄스폭의 증가를 둔화시키고 전송거리를 늘릴 수 있다. 만약 입력펄스의 chirping이 반대방향(leading edge에 단파장, falling edge에 장파장)이면 전송거리가 감소하리라는 것을 쉽게 알 수 있다.

4) Prechirping에 의한 색분산 보상

외부변조기를 사용하여도 분산천이 광섬유를 사용하지 않고 기존의 단일모드 광섬유를 사용하는 경우나 전송거리가 매우 긴 경우, 10Gbps급 이상의 광통신은 광섬유의 색분산에 의한 전송거리의 제한이 심각하므로 이를 보상해 주기 위해서 송신기에서 prechirping을 주는 방법이 연구되었다. Prechirping이란 앞에서 설명한 chirping을 이용하여 전송거리를 늘리는 방법중의 하나로, 송신기에서 인위적으로 광섬유에서의 분산에 의한 chirping과의 반대방향으로 prechirping을 주어 이 신호가 광섬유를 진행할 때 chirping이 감소하는 것을 이용하여 색분산의 영향을 감소시키는 방법이다. Prechirping을 주는 방법으로는 반도체 레이저를 clock주파수로

FM변조하는 방법^[29], 반도체 레이저 광 증폭기에서의 self-phase modulation을 이용하는 방법^[30]이 연구되고 있다. 가장 많이 사용되고 있는 반도체 레이저 FM변조에 의한 prechirping에 대해서 좀더 자세히 알아보자. 그림 3에 prechirping을 위한 시스템의 구성도를 나타내었다. 시스템의 구성도는 반도체 레이저와 외부변조기로 구성되어 있다. 반도체 레이저의 바이어스 전류를 발진임계전류보다 훨씬 위로 하고 시스템의 클럭주파수로 FM변조한다. 그리고 data는 외부변조기 드라이버를 통해 외부변조기에 가해져서 레이저의 출력에 data가 실린다. 이 때 반도체 레이저의 클럭과 외부변조기에 가해지는 data 간의 지연시간을 조정하여 FM변조시의 chirping의 방향을 조정하여 광섬유에서의 색분산을 보상한다. 이 경우는 외부변조기를 사용한다 하더라도 고속 반도체 레이저를 사용하지 않으면 안된다.

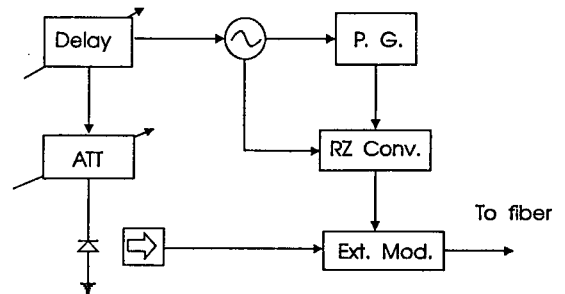


그림 3. Prechirping을 이용한 색분산 보상의 구성도

5) 외부변조기를 사용한 전송 실험 결과

표 3에 간섭계형 외부변조기와 흡수형 외부변조기를 이용한 대표적인 전송실험 결과를 종합하였다^{[9] - [38]}. 모든 실험에서 외부변조기의 삽입 손실을 보상하기 위해서 booster 광증폭기를 사용하였으며, 장거리 전송을 위해서 앞에서 열거한 여러가지 색분산 보상법도 도입되었다. 또, EDFA를 pre-amp.로 사용하여 수신기에 입사되는 빛의 세기를 증가시켜서 색분산에 의한 power penalty 및 광섬유의 손실을 보상하여 장거리 전송에 성공하였다. 특기할 만한 결과는 일본의 KDD 연구소에서 얻은 10Gbps 신호의 4500km 전송에 성공한 결과로 매 30km 마다 EDFA를 사용하였다^[38]. 이는 전송거리가 동일한 분산천이 광섬유의 색분산에 의한 제한(1dB power

panalty를 주는 전송거리 600km)을 넘어선 것으로, 신호광의 파장을 전체 광섬유의 평균분산이 최소인 파장으로 택했다. 또, EDFA를 이용하여 여분의 색 분산에 의한 power penalty(약 5dB)를 보상해 준 것이다.

표 3.

(a) 간섭계형 외부변조기를 이용한 광링크 실험결과

전송속도	전송거리	변조/복조	광증폭기	기 관	비 고
10 Gbps	100Km	EM(prechirp)/DD 5Gbps * 2 Optical Mux	a booster and a pre-EDFA	NEC OFC '91 N. Henmi	DFM + external modulation Normal SMF
20 Gbps	100Km	EM/DD 10Gbps * 2	고출력 EDFA for receiver	NTT OFC '92 K. Hagimoto	3dBm signal is coupled to pin
20 Gbps	140Km	5 Gbps * 4	Distributed EDFA	BTRL OFC '92 D.M. Spirit	Dispersion을 보통 파이버로 보상함
10 Gbps	220Km	EM/DD	a booster(2nm) a pre-EDFA (20 GHz)	AT&T PTL '92 A.H. Gnauck	lunched power 12 dBm Sensitivity -36 dBm
17 Gbps	150Km	EM/DD	a booster and a pre-EDFA	NTT Opt. Amp. and their Appl. '90 H. Hagimoto	Dis. compen. with normal SMF Sensitivity -24.8 dbm
20 Gbps	205Km	EM/DD 5 Gbps * 4	two booster a pre-EDFA 3 EDFA : 51.2Km span	BTRL W.E. Wickens EL '92	DSF Sensitivity -20.5 dBm(BB) 19.7 dBm with fiber

(b) 흡수형 외부변조기를 이용한 광링크 실험결과

전송속도	전송거리	변조/복조	광증폭기	기 관	비 고
10 Gbps	140Km	Electroabs. modulation Tx and Rx mod. EM/DD	a booster and a preamp. EDFA	NEC OFC '92 T. Suzaki	Sensitivity -12.3 dBm with 24dB EDFA
20 Gbps	100Km	electroabsorp. Modulation/DD	a booster and a pre-EDFA	NTT EL '92 T. Kataoka	No modulator driver
10 Gbps	4500Km	Electroabsorp. modulation/DD Extinction 20 dB	138 EDFA 30Km span DSF a booster and a pre-EDFA	KDD R&D Lab. H. Taga OFC '92	Sensitivity -29.5 dBm

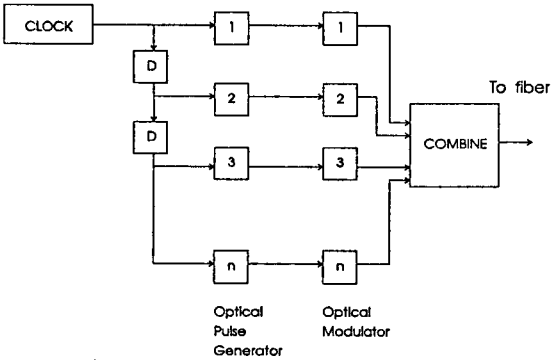
3. 광학적 MUX/DMUX에 의한 광링크

1) 광학적 MUX

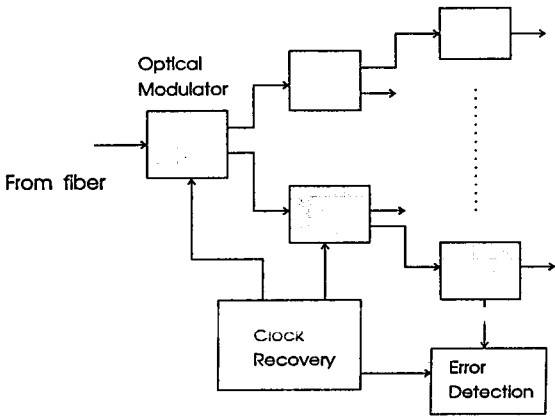
광학적 다중화는 가장 기본적인 방법으로 충분히 짧은 광펄스를 변조신호로 변조한 다음 일정한 시간 지연을 시켜서 광펄스가 없는 시간공간에 끼워넣는 방식으로 그림 4 (a)에 광학적으로 MUX를 행하는 광통신 시스템의 구성도를 나타내었다. 이러한 방법을 이용하여 10Gbps를 광학적으로 4 channel MUX 하여 40Gbps의 광통신 시스템을 10Gbps용 전자소자를 이용하여 구현할 수 있다. 표 3(a)에 외부변조기와 광학적 MUX를 이용하여 10 Gbps이상의 대용량 광링크를 구현한 대표적인 결과를 정리하였다. MUX를 위해서 먼저 clock 주파수(= 전송 bit rate에 해당하는 광펄스열을 생성하고, 이를 다중화하고자 하는 channel 수 만큼 균일하게 광 파워를 분리한다. 이 때 광펄스의 폭은 1/전송 bit rate 보다 짧아야 한다. 분리된 광펄스열을 일정한 시간 (= 1/(전송 bit rate × channel 수)) 지연시켜서, 각각의 channel의 광펄스열을 외부변조기로 변조한다. 이 때 외부변조기의 변조주파수는 전송 bit rate를 channel 수로 나눈 값이므로 전자소자의 스위칭 속도가 느려도 되므로 전자소자의 스위칭 속도에 의한 전송속도의 제한을 극복할 수 있다. 변조된 신호를 광결합기로 합하면 원하는 전송속도의 광신호를 얻는다. 이러한 방식에서의 핵심기술은 극초단 광펄스를 생성하는 기술이고, 현재 반도체 레이저의 이득 스위칭법, Q-스위칭법, 그리고 여러가지 모드록킹법 등이 연구되고 있다^[39]. 생성한 극초단 펄스폭은 수 ps 정도이며, 이를 압축하여 0.270 f_g를 얻은 결과도 보고되었다^[40]. 하나의 반도체 레이저를 사용하여 극초단 펄스를 생성한 다음 광 파워를 분리하는 방식은 광섬유에 결합되는 신호의 세기가 매우 낮으나, 전기적으로 clock 신호를 일정한 시간 지연시켜서 극초단 광펄스를 생성하고 이를 외부변조기로 변조한 다음 합하는 방식을 이용하면 광섬유에 입사되는 신호의 세기를 높일 수 있다. 그러나, channel 수 만큼의 반도체 레이저를 사용하여야 한다.

2) 광학적 DMUX

광학적으로 DMUX하는 방법에는 전기광학효과를 이용하는 광스위치를 사용하는 방법과, 전기광학 효과를 사용하지 않고 광학적 비선형성을 이용하는 완전광 스위치를 이용하는 방법이 연구되고 있다. 그림 4 (b)에 전기광학적 광스위치를 사용한 DMUX에



(a) 광학적 MUX를 이용한 송신기의 구성도



(b) 광학적 MUX를 이용한 수신기의 구성도

그림 4.

의한 광수신기의 구성도를 나타내었다. 전송된 광신호는 광스위치로 입사되어 주어진 변조신호에 의해서 2 개의 출력으로 분리된다. 이 때 각 출력의 bit rate는 전송된 bit rate의 절반이며, 이 신호는 다시 계속되는 광스위치를 통과하여 다시 bit rate가 절반으로 감소한다. 이 과정은 광스위치를 통과한 신호의 bit rate가 송신단에서의 단위 channel 당의 bit rate와 같아질 때까지 계속된다. 광스위치계를 통과하여 얻은 최종 광신호는 직접변조방식에서와 같은 수신기를 이용하여 송신단에서 보낸 정보를 각 channel별로 재생한다. 그러나, 광스위치계의 삽입 손실로 광검출기에 도달하는 광세기의 감소가 심하므로 광검출기 전단에 pre-amp.를 필요로 하는 단점이 있다. Channel별 정보를 재생하면서 기본 clock

도 같이 재생되어 광스위치의 변조신호로 인가되며, 상위레벨의 변조기에는 기본 clock 주파수의 2^n (n 은 최종단으로부터의 상위 레벨의 수)배에 해당하는 주파수의 신호가 변조신호로 인가된다.

3) 완전광 DMUX

지금까지 설명한 광학적 DMUX 방식은 전기광학 효과에 의한 초고속 광변조기나 광스위치를 사용하여야 한다. 여기에는 피할 수 없이 이들을 구동하기 위한 약간의 고속전자소자가 필요하므로, 전자소자에서 오는 제한을 완전히 극복하지는 못하고 있다. 최근에는 광섬유에서의 비선형현상이 일어나는 시간이 $100 f_s$ 이하로 매우 빠른 것을 응용한 광섬유만을 이용하는 DMUX 방식이 활발히 연구되고 있으며 60 Gbps에서의 동작이 보고되었다^[41]. 광비선형 효과를 이용한 DMUX에서는 역다중화가 끝난 최종단에서 광검출기 및 판별회로를 이용하여 전송된 신호를 재생한다. 그러나 이 방식을 실제의 시스템에 사용하기 위해서는 DMUX의 소형화, 그리고 이를 구현하는데 필요한 부품의 가격인하이다.

광섬유를 이용한 DMUX방법에는 첫째, 방향성 결합기를 구현하고 센 조절광으로 결합기의 결합효율을 바꿈으로써 원하는 신호광을 가려내는 방향성 결합기형^[42], 둘째, 편광이 다른 두 soliton이 광섬유를 진행할 때의 soliton trapping에 의한 soliton의 진행속도와 단일 soliton이 진행할 때의 soliton의 진행속도의 차이를 이용하는 soliton 스위치형^[43], 셋째, 광섬유에서 진행되는 신호광의 편광을 센 조절광으로 회전시켜서 원하는 신호광을 편광기로 가려내는 편광스위치형^[44], 넷째, 간섭계의 경로가 비선형 매질인 간섭계를 구성하고, 각각의 경로에 입사되는 조절광의 세기를 다르게 하여 같은 세기로 간섭계의 경로에 입사된 신호광의 위상을 변화시켜서 원하는 신호광만을 보강간섭이 되게하는 간섭계형^[45], 다섯째, 파장이 다른 조절광과 신호광과의 4 광파 혼합에 의해 새로이 생성되는 주파수 성분을 가려내는 광파 혼합형^[46] 등이 연구되고 있다. 광섬유에서의 비선형성은 상호작용하는 광의 편광에 민감하므로 광섬유를 이용하는 DMUX에서는 편광유지 파이버를 이용하고 있다. 간섭계형과 soliton 스위치형을 제외한 나머지 방법에서는 스위칭되는 신호광이 조절광의 파형에 영향을 받으므로 완전한 스위칭을 위해서는 구형과 펄스의 조절광이 필요하다. 이러한 펄스를 구현하기 위해서는 펄스폭이 스위칭하고자 하는 신호의 펄스폭보다

훨씬 좁은 폭을 갖는 펄스와 광펄스 조형기가 필요하다. 구형과 펄스는 광섬유를 진행하는 동안에 색분산에 의해서 쉽게 펄스의 모양이 바뀌므로 시스템에서 사용하기에는 바람직하지 않다.

4. 색분산 보상법

지금까지 앞에서 몇가지 chirping을 감소시키는 방법(외부공진기 사용, 주파수 변조를 진폭변조로 변환)과 색분산을 보상해주는 방법(prechirping)을 설명하였다. 이외에도 다음과 같은 색분산 보상방법이 연구되고 있어서 소개하기로 한다.

- 보통의 단일모드 광섬유와 분산천이 광섬유를 조합한 색분산 보상
- 광학적 색분산 보상법^[47]
- Nonlinear pulse transmission^[34]
- Soliton 전송(adiabatic elimination of dispersion)^[48] 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. 색분산의 보상을 위해서 색분산이 매우 크고 손실이 적은 광섬유를 연구하고 있으나, 이 방법은 실제 현장에서 사용하기에는 어려움이 있다. 다음 방법인 광학적인 방법은 수신기쪽에서 광신호를 한쪽 거울의 반사율이 100%인 Fabry-Perot 간섭계에 입사시켜서 반사되는 빛을 검출하여 색분산을 보상하는 방법으로, 간섭계를 삽입하기 때문에 생길 수 있는 손실을 제거하고, 간섭계에서의 dispersion을 이용하여 색분산을 보상한다^[47]. 또 하나의 색분산 보상 방법은 광섬유에서의 비선형 효과에 의한 펄스의 압축을 이용하는 방법이다. 이 방법을 사용하기 위해서는 전송파장이 광섬유의 이상분산 영역이어야 한다. 즉, 광섬유에 대출력의 data 펄스를 보내서 광섬유에서의 비선형효과에 의한 자기위상변조(self-phase modulation)와 색분산효과의 상호작용에 의한 펄스의 압축을 이용하여 색분산만에 의한 펄스폭의 확산을 보상하는 방법이다^[34].

마지막 방법인 솔리톤 전송은 비선형 펄스 압축에 의한 색분산 보상을 극대화하는 방법이다. 광섬유에 강한 빛의 펄스를 보내면 광섬유의 비선형성에 의해서 자기위상변조(self phase modulation)가 일어나서 펄스의 leading edge에 장파장이, falling edge

에 단파장이 위치하는 chirping이 생긴다. 펄스의 파장이 광섬유의 이상분산영역이라면 chirping된 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 솔리톤이라 하며, 이때 펄스는 마치 하나의 입자처럼 서로 충돌한 후에도 그 성질을 보존하는 행동을 한다고 해서 붙여진 이름이다. 솔리톤은 색분산의 영향을 받지 않으므로 EDFA로 광섬유에서의 손실을 보상해 주면 초장거리 초광대역통신을 할 수 있다. 표 4에 여러가지 솔리톤 전송실험 결과를 종합하였으며^{[48] ~ [52]}, 직접변조 방식이나 외부변조기를 사용한 방식의 광링크보다 전송거리가 훨씬 길다는 것을 알 수 있다. 특기할만한 결과는 AT&T Bell Lab.에서 성공한 11,000 km의 10 Gbps 전송실험결과^[51]와 광학적 MUX와 4 광파혼합을 이용한 완전광 DMUX를 이용한 32 Gbps의 90 km 솔리톤 전송실험 결과이다^[50]. 솔리톤 전송의 핵심기술은 광섬유에서의 솔리톤의 전송특성을 이해하고 솔리톤 펄스를 만드는 초단펄스

표 4. Soliton 전송을 이용한 광링크의 전송실험 결과

전송속도	전송거리	변조/복조	광증폭기	기관	비고
10 Gbps	1200Km	ED/DD	24 EDFA	NTT EL '92 M. Nakazawa	Soliton Trans. Sensitivity -29.4 dB
		source:gain	50 Km span		
		switched DFB	loss 11.5 dB		
20 Gbps	1020Km	ED/DD	20 EDFA + a pre-EDFA	NTT EL '92 M. Nakazawa	Soliton Trans. Sensitivity -30.0 dB
	50 Km span				
32 Gbps	90Km	ED/DD	4 EDFA (1 booster)	AT&T OFC '92 N.A. olsson	Soliton 전송
10 Gbps	11,000Km	EM/DD	80 Km loop	AT&T	2.5 Gbps
		source		EL '92	17,000 Km
		mode locked		L.F.	5 Gbps
		LD		Mollenauer	15,000 Km
10 Gbps	1520Km	Electroabs.	22 EDFA	KDD R&D JAPAN ECOC '91 N. Edagawa	Soliton trans. Sensitivity -30.7 dBm BER 10 ⁻¹¹
		modulation	14 dB gain		
			66 Km span		

생성기술이다. 솔리톤 펄스를 생성하는 방법은 반도체 레이저의 이득 스위칭을 이용하는 방법과, 반도체 레이저 모드록킹을 이용하는 방법이 있다.

Ⅲ. 파장분할 다중화 광링크

지금까지 제 2 장에서 설명한 광링크는 시간을 분할하여 다중화하는 방식이다. 그러나, 전송속도를 높이기 위한 다중화 방법에는 기존의 초고주파 통신에서처럼 주파수를 분할하여 다중화하는 방법도 있다. 이 방법은 약 2,000GHz 정도되는 광섬유의 전송대역폭(분산이 최소인 영역에서의 산출한 값임)을 충분히 이용할 수 있는 방법이며, channel 간의 주파수 간격이 nm 정도로 전송신호의 대역폭보다 훨씬 넓은 경우를 파장분할 다중화(WDM : wavelength division multiplexing)라고 한다. 반면에 channel 간의 주파수 간격이 전송신호의 대역폭과 유사한 경우를 주파수분할(FDM : frequency division multiplexing)부른다. 이러한 광링크들은 이미 오래 전에 제안되고 몇몇 연구소에서 연구를 수행하고 있었다. 이러한 연구는 광통신의 전송속도가 증가하면서 전자소자 및 광자소자의 스위칭 속도에서 오는 전송속도의 제한을 극복할 수 있는 방법으로 최근에 다시 각광을 받기 시작하고 있다. 파장분할 방식 및 주파수 분할 방식을 사용하면 각 channel당의 전송속도가 channel의 수만큼 감소되므로 변조된 레이저의 발전선폭도 감소되어 광섬유의 색분산에 의한 전송거리의 감소를 둔화시킬 수 있는 장점도 있다. 그래서 10Gbps이상의 통신을 분산천이 광섬유를 사용하지 않고 기존의 단일 모드 광섬유를 사용하여 구현할 수 있는 방법으로 이러한 방법들이 연구되고 있다(2.5 Gbps 광 링크 4개를 4개의 다른 파장으로 하나의 광섬유에 보내서 10Gbps 광링크를 구현하는 경우 색분산의 영향은 2.5Gbps 광 링크에서와 동일하다). 그림 5에 파장분할 방식의 광 링크의 구성도를 나타내었다. 파장분할방식의 단일 파장만을 생각하면 광링크는 제 2 장의 시간분할 방식 광링크와 동일하다. 이러한 광링크를 여러개를 만들어서 각기 다른 파장으로 정보를 송수신하면 그 만큼 전송량을 늘릴 수 있다. 송신단에서는 각각 다른 파장의 신호를 하나의 광섬유에 보낼 수 있도록 해주는 광결합기와, 수신단

에는 송신단에서 보낸 단일 파장의 신호만을 선택할 수 있는 광 필터가 필요하다. 이러한 광링크를 구현하기 위해서는 다음과 같은 해결해야될 기술적인 문제점이 있다.

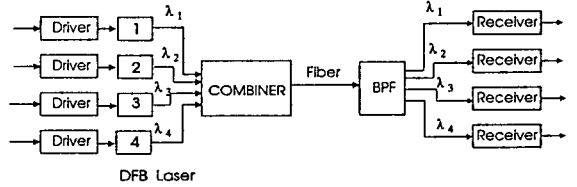


그림 5. 파장분할 다중화를 이용한 광링크의 구성도

1. 파장분할 다중화

파장분할 다중화 시스템의 상용화를 위해서 해결해야될 문제점으로는 제일 먼저 광원인 DFB 레이저의 수율 및 파장의 재현성이다. 시분할 방식에서는 광섬유의 대역폭이 넓고 광검출기의 수신 대역폭도 매우 넓으므로 전송 파장의 절대값은 중요하지 않다. 그러나, 파장분할 방식에서는 각 channel의 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. 이는 필요한 DFB 레이저의 수율을 급격히 저하시키고 상대적으로 레이저의 가격을 수 배 상승시킨다. 여기서 또 한가지 문제점은 사용하는 레이저가 죽었을 때의 레이저의 교환이다. 이때도 기존의 레이저와 파장이 정확히 일치하는 레이저로 교체하여야 하므로 결코 쉬운 일이 아니다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 현재 많은 사람들이 파장을 연속적으로 가변할 수 있는 반도체 레이저인 multisection DFB 레이저^[53], tunable DBR 레이저^[54], 그리고 tunable 파이버 레이저^[55] 등을 연구하고 있으나, 그 가변폭이 충분히 넓지 못하다(8 개의 channel을 약 1nm의 channel 폭으로 다중화하는 경우 각 레이저의 중심파장이 동일하다면 최소한 8nm 이상 파장이 연속적으로 가변되는 레이저가 필요하다). 파장분할 광 링크에 사용할 레이저의 또 하나의 요구조건은 발전 파장이 장시간(20년) 동안 매우 안정해야 한다는 것이다.

송신단의 반도체 레이저에서 제기됐던 문제점이 수신단의 광필터에도 그대로 적용된다. 즉 장시간동안

매우 안정된 통과파장 가변(tunable) 필터가 필요하다. Grating filter를 사용하는 경우 grating의 회절효율이 입사광의 polarization에 의존하기 때문에 시스템의 성능이 저하되고, PZT를 사용하는 파이버 Fabry-Perot filter는 아직 수명이 보장되지 않고 있다. 저가의 신뢰도가 높은 tunable filter를 개발하기 위해서 ZnS-based temperatue tuning filter가 연구되고 있다^[56].

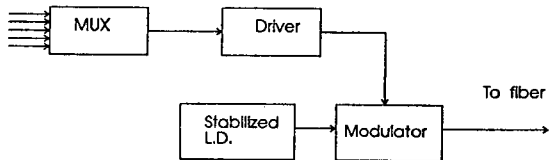
파장분할 다중화 광링크에서 중요한 변수 중에 하나는 channel 간의 파장 간격이다. 파장간격이 너무 좁으면 수신단에서 필터를 구현하기가 힘들어질 뿐만 아니라, 근본적인 문제인 광섬유에서의 비선형성에 의한 four wave mixing, stimulated Raman scattering, stimulated Brillon scattering 등이 영향을 미치기 시작하여 광 링크의 성능을 저하시킨다. 일반적으로 광학적 비선형 현상은 광섬유 core의 직경이 가는 분산천이 광섬유에서 보통의 단일 모드 광섬유보다 훨씬 크게 나타난다. 이는 파장분할 다중화 방식에서 분산천이 광섬유를 사용하지 않고 보통의 단일모드 광섬유를 사용하는 또 다른 이유이다. 또한, channel 폭을 넓게하는 것은 장거리 전송을 위해서 사용해야 하는 EDFA의 대역폭에 의해서 제한된다. 이러한 영향을 고려해서 2.5Gbps 신호를 파장분할로 다중화하는 경우 channel폭은 약 1nm정도가 적당할 것으로 예측하고 있다.

2. 주파수분할 다중화

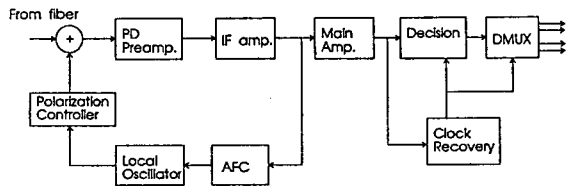
주파수분할 다중화에는 앞에서 설명한 파장분할 다중화의 경우에서 channel간의 주파수폭을 감소시키고 직접 검출방식을 이용하는 경우와 광파통신을 이용하는 경우가 있다. 직접검출방식을 이용하는 광 링크에서의 기술적인 문제는 앞의 파장분할 방식에서 송신단의 파장가변 반도체 레이저 구현문제와 수신단에서 통과대역폭이 좁은 광필터를 구현하는 문제가 있다. 특히, 광섬유의 광학적 비선형성에서 기인하는 광 링크의 성능저하를 막기 위한 연구가 필요하다.

지금까지 설명한 광통신 방식은 광의 가간섭성을 이용하지 않으므로 빛을 사용하는 경우 반송주파수가 높아서 통신가능 속도를 매우 높일 수 있는 장점을 충분히 사용하지 못하고 있다. 광파통신은 빛의 파형적인 특성을 충분히 살려서 통신속도를 높이면서 동시에 수신기의 수신감도를 높이는 것에 그 목적이 있다. 그림 6(a)와 (b)는 광파통신을 이용한 송신기

와 수신기의 구성도를 나타낸 것이다. 송신측에서는 가간섭성이 매우 좋은 빛을 사용하여, 빛의 전계 성분의 진폭, 주파수, 또는 위상을 변조하고, 변조시의 변조된 빛의 대역폭을 최소화함으로써 매우 많은 channel을 주파수 다중화할 수 있도록 하여 광섬유의 전송대역폭을 최대한 이용할 수 있도록 한다. 수신단에서는 기존의 라디오 수신기에서처럼 국부발진기를 사용하여 입력광과 국부발진기의 광을 혼합한 다음 그 비트 주파수를 검출하여 주파수 분할 역다중화를 한다. 이 때 비트 신호는 입력광신호와 국부발진기의 출력의 곱에 비례하므로 국부발진기의 출력을 높여서 수신기의 수신감도를 높인다. 광파통신에서의 수신감도는 양자역학적 한계인 산탄잡음에 의해서 결정되므로 직접검출방식보다 20dB 정도 개선된다. 여기서 한가지 언급할 것은 광파통신에 의한 이러한 수신감도의 개선은 직접검파 방식을 사용하고 EDFA를 pre-amp.를 사용하여 개선되는 수신감도와 유사하다. 광파통신의 경우도 광섬유의 색분산의 영향은 앞의 강도변조의 경우와 동일하나, 색분산의 영향을 수신기의 IF단에서 전기적인 delay line을 이용하여 보상해 줄 수 있다.



(a) 광파통신의 송신기의 구성도



(b) 광파통신의 수신기의 구성도

그림 6.

광파통신을 구현하기 위한 핵심기술로는 송신기쪽에서는 협대역 파장가변 반도체 레이저(전송하고자 하는 bit rate의 1/100 정도의 발진선폭)가 요구된

다. 또한, 송신주파수 및 수신기 필터의 표준화를 위하여 안정된 표준 광주파수가 필요하다. 이러한 광원을 구현하기 위하여 외부공진기 반도체 레이저, 반도체 레이저의 여러가지 주파수 안정화법, 그리고 atomic 흡수선에 반도체 레이저의 발진파장을 록킹하는 법이 연구되고 있다^[57]. 수신단에는 고효율 협대역 반도체 레이저가 국부발진기용으로 필요하며, 광섬유에서 전송한 광신호의 분극이 변화하는 것을 보상하여 국부발진기의 분극과 일치시켜줄 수 있는 연속적인 분극제어기가 필요하다. 또한, 국부발진기의 주파수 및 위상을 특정한 값에 록킹할 수 있는 광학적 위상록킹(optical phase locking)루프가 필요하다. 전송로인 광섬유에서의 광학적 비선형성에 의한 신호의 왜곡에 대한 연구도 앞의 직접검파방식의 주파수분할 광링크에서처럼 매우 중요하다.

IV. 결론

광링크의 전송거리를 제한하는 요인은 첫째, 전자소자 및 광자소자의 스위칭 속도, 둘째, 광섬유의 색분산, 셋째, 광섬유의 광학적 비선형성을 들 수 있다. 고속 전자소자는 광통신 이외의 다른 분야에도 널리 응용되므로 활발히 연구되고 있어서 10Gbps용의 소자의 일부가 상용화되었고 머지않아 많은 회사에서 상용화 제품을 낼 것으로 예측된다. 그러나, 광자소자의 경우는 상대적으로 수요가 적어서 상황이 다르다. 특히, 반도체 레이저의 성능은 10Gbps급의 광통신 링크에서 직접변조방식을 택하느냐 아니면 LiNbO₃나 반도체를 이용하는 외부변조기를 이용하는 방식을 하느냐를 결정하게 되므로 이에 대한 연구는 매우 중요하다.

광섬유에서의 색분산에 의한 전송거리의 제한을 극복하기 위한 색분산 보상법으로는 분산천이 파이버를 사용하는 방법, 보통의 단일모드 파이버와 분산천이 파이버를 조합하여 사용하는 방법, prechirping을 이용하여 색분산을 보상하는 방법, 광섬유의 광학적 비선형성을 이용하여 색분산을 보상하는 방법, 그리고, soliton 전송을 이용하는 방법등이 연구되고 있으며, 색분산에 의한 전송거리의 제한을 극복하고 기포설된 단일모드 광섬유를 이용하고자 하는 열망이 파장분할 다중화 및 주파수 분할 다중화 방식의 광링

크 개발의 동기를 부여해 주고 있다.

어떠한 다중화 방식을 택하건 초고속 장거리 전송에서는 광섬유에서 전송되는 빛의 세기를 증가시키기 위해 송신단에서 booster 광 증폭기를 사용하고 또, 증계기 대신 EDFA를 사용한다. 그리하여 광섬유의 비선형성에 의한 신호의 왜곡이 광링크의 성능을 저하시키는 또 하나의 요인으로 대두되고 있다.

10Gbps급 이상의 광링크를 구현하기 위해서는 본문에서 검토한 바와 같이 확보 가능한 소자에서 오는 제한, 광섬유의 색분산에서 오는 제한, 광섬유에서의 광비선형성에서 오는 제한 등의 여러가지 영향을 종합적으로 고려하고, 앞으로 개발할 더 큰 용량의 광 링크와의 연계성등을 예측하여 광링크를 설계하고 이의 성능을 분석하는 시스템 연구와 함께 광링크를 구성하는 각각의 subsystem에 관한 전문화된 연구가 필요하다.

감사의 글

이 글의 초고를 읽으시고 많은 조언과 용기를 주신 한국과학기술원의 신상영 교수님께 감사드리며, 이 글의 작성에 많은 도움을 주신 한국전자통신연구소 기초기술연구부의 이학규 박사님께도 감사의 마음을 전합니다.


參考文獻

- [1] C. Rolland, L. E. Tarof, and A. Somani, "Multigigabit networks: The challenge," IEEE Lightwave Telecommunication Systems, pp. 16-26, May 1992.
- [2] H. Nakano, K. Kitamura, K. Ishikawa, T. Hamagishi, M. Aoki, K. Itoh, A. Takai, and Y. Takahashi, "High-gain 10 Gbit/s 3R optical repeater with direct clock extraction," Digest of 17th European Conf. on Optical Comm. ECOC '91, pp. 513-516, paper WeA 9-5, Sept. 9-12, Paris,

- France, 1991.
- [3] H. Yamakawa, H. Ibe, K. Ide, J. Akahgi, Y. Kuriyama, and T. Ozeki, "All-HBT IC 10 Gb/s 3R optical repeater," Digest of 17th European Conf. on Optical Comm. ECOC '91, pp. 517-520, paper WeA 9-6, Sept. 9-12, Paris, France, 1991.
- [4] J. L. Gimlett, M. Z. Iqbal, J. Young, L. Curtis, R. Spicer, N. K. Cheung, and S. Tsuji, "11 Gbit/s optical transmission experiment using 1540 nm DFB laser with non-return-to-zero modulation and pin/HEMT receiver," *Electron. Lett.*, 27, pp.596-597, 1989.
- [5] Y. Miyamoto, K. Hagimoto, F. Ichikawa, M. Yamamoto, and T. Kagawa, "10 Gbit/s-50km dispersive fiber transmission experiment using strained multiquantum-well DFB laser diode," *Electron. Lett.*, 27, pp.853-855, 1991.
- [6] A.H. Gnauck, R.H. Jopson, J.D. Evankow, C.A. Burrus, S-J Wang, N. K. Dutta, and H.M. Presby, "1 Tbit/s km transmission experiment at 16 Gbit/s using conventional fiber," *Electron. Lett.*, 25, pp. 1695-1696, 1989.
- [7] H. Nakamura, H. Hanatani, S. Tanaka, C. Notsu, Y. Matsuoka, and K. Ishida, "An InAlAs/InGaAs superlattice avalanche photodiode with a gain-bandwidth products of 110 GHz," Digest of 18th European Conf. on Optical Communications, pp.593-596, paper We B11.3, Sept. 27 - Oct. 1, Berlin, Germany, 1992.
- [8] T. Ikegami, "Survey of telecommunications applications of quantum electronics - progress with optical fiber communications," *Proceedings of IEEE*, 80, pp.411-419, 1992.
- [9] 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.
- [10] 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.819-829, 1992.
- [11] K. Runge, R.D. Standley, J.L. Gimlett, R.B. Nubling, S. Beccue, K. C. Wang, N.H. Sheng, M.F. Chang, D.M. Chen, and P.M. Asbeck, "A 27-Gbit/s 1:2 regenerating demultiplexer, 20 Gbit/s decision circuit and an 11 Gbit/s laser driver IC fabricated using AlGaAs/GaAs HBTs," Digest of Optical Fiber Communication Conference, pp.49-50, paper Tul4, San Jose, CA, USA, Feb. 2-7, 1992.
- [12] K. Ishikawa, T. Hamagishi, E. Endo, N. Nakano, C. Kusano, and Y. Takahashi, "Ten-Gbit/s optical receiver using ICs with low-capacitance HBT technology," Digest of Optical Fiber Communication Conference, pp.54, paper Tul7, San Jose, CA, USA, Feb. 2-7, 1992.
- [13] M. Banu, B. Jalali, R. Nottenburg, D.A. Humphrey, R.K. Montgomery, R.A. Hamm, and M.B. Panish, "10 Gbit/s bipolar laser driver," *Electron. Lett.*, 27, pp.278-280, 1991.
- [14] H.-M. Rein, J. Hauenschield, W. Mcfarland, and D. Pettengill, "23 Gbit/s Si bipolar decision circuit consisting of 24 Gbit/s MUX and DEMUX ICs," *Electron. Lett.*, 27, pp. 974-976, 1991.
- [15] R.K. Montgomery, P.R. Smith, F. Ren, T.R. Fullowan, C.R. Abernathy,

- R.F. Kopf, S.J. Pearton, J. Lothian, P. Wisk, and R.N. Nottenburg, "10 Gbit/s high sensitivity low error rate decision circuit implemented with c-doped AlGaAs/GaAs HBTs," *Electron. Lett.*, 27, pp.976-978, 1991.
- [16] J. Hauenschild, H.-M. Rein, W. Mcfarland, J. Doernberg, and D. Pettengill, "Demonstration of retiming capability of silicon bipolar time-division multiplexer operating to 24 Gbit/s," *Electron. Lett.*, 27, pp. 978-979, 1991.
- [17] S. Murata, K. Naniwae, J. Shimizu, M. Nido, A. Tomita, and A. Suzuki, "High-frequency modulation characteristics in $1.5\mu\text{m}$ compressively strained multiquantum well lasers," *Electron. Lett.*, 28, pp.1456-1457, 1992.
- [18] G.P. Agrawal, T.M. Shen, "Power penalty due to decision-time jitter in optical communication systems," *Electronic Lett.*, 22, pp.450-451, 1986.
- [19] T. L. Koch and R. A. Linke, "Effect of nonlinear gain reduction on semiconductor laser wavelength chirping," *Appl. Phys. Lett.*, 48, pp. 613-615.
- [20] B. W. Hakki, "Evaluation of transmission characteristics of chirped DFB lasers in dispersive optical fiber," *J. Lightwave Tech.*, 10, pp. 964-970, 1992.
- [21] K. Ogawa, "Analysis of mode partition noise in laser transmission systems," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-18, pp. 849-855, 1982.
- [22] Y. Suematsu, K. Iga, and S. Arai, "Advanced semiconductor lasers," *Proceedings of IEEE*, 80, pp. 383-397, 1992.
- [23] 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^{3+} doped Fluoride fiber," 1991 Topical meeting on Opt. Amplifiers and thier Applications, paper PdP1-1, Snowmass, Colo., USA, 1991.
- [24] P.S. Henry, "Lightwave primer," *IEEE J. Quantum Electron.*, pp.1862-1879, 1985.
- [25] 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.
- [26] W. Wedding, "New method for optical transmission beyond dispersion limit," *Electron. Lett.*, 28, pp.1298-1230, 1992.
- [27] N. Noguchi, O. Mitomi, and Yanagibashi, "40 GHz $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ optical modulator with driving voltage of 3.6 V," *Digest of 4th Optoelectronics Conf.*, pp.4-5, PD2, July 15-17, Chiba, Japan, 1992.
- [28] 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.
- [29] T.L. Koch and R.C. Alferness, "Dispersion compansation by active predistorted signal synthesis," *J. Lightwave Technology*, LT-3, pp.800-805, 1985.
- [30] N.A. Olsson, "Lightwave systems with optical amplifiers," *J. Lightwave Technology*, 7, pp.1071-1082, 1989.
- [31] 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.
- [32] K. Hagimoto, Y. Miyamoto, T. Kataoka, H. Ichino, and O. Nakajima, "Twenty-Gbit/s signal transmission using a simple high sensitivity optical receiver," Digest of Optical Fiber Communication Conference, p. 48, paper Tul3, San Jose, CA, USA, Feb. 2-7, 1992.
- [33] D. Spirit, G.E. Wickens, G.E. Walker, D.L. Williams, and L.C. Blank, "140 km 20 Gbit/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.
- [34] K. Hagimoto, Y. Miyamoto, T. Kataoka, K. Kawano, and M. Ohhata, "A 17 Gb/s long-span fiber transmission experiment using a low noise broadband receiver with optical amplification and equalization," Digest of Optical Amplifiers and their Applications, pp.100-103, paper TuA2, Aug. 6-8, Monterey, CA, USA, 1990.
- [35] G.E. Wickens, D.M. Spirit, and L.C. Blank, "Nonlinear transmission of 20 Gbit/s optical time-division-multiplexed data, over 205 km of dispersion shifted fiber," Electron. Lett., 28, pp.117-118, 1992.
- [36] T. Suzaki, Y. Suzuki, A. Ajisawa, Y. Abe, M. Soda, T. Kato, Y. Ogawa, and S. Fujita, "Ten-Gbit/s optical transmitter module using modulator driver IC and semiconductor modulator," Digest of Optical Fiber Communication Conference, pp.52-53, paper Tul6, San Jose, CA, USA, Feb. 2-7, 1992.
- [37] T. Kataoka, Y. Miyamoto, K. Hagimoto, K. Wakita, and I. Kotaka, "Ultra-high speed driverless MQW intensity modulation, and 20 Gbit/s, 100 km transmission experiments," Electron. Lett., 28, pp.897-898, 1992.
- [38] H. Taga, N. Edagawa, Y. Yoshida, S. Yamamoto, M. Suzuki, and H. Wakabayashi, "10 Gbit/s, 4500 km transmission experiment using 138 cascaded Er-doped fiber amplifier," Digest of Optical Fiber Communication Conference, pp.359-362, paper PD12, San Jose, CA, USA, Feb. 2-7, 1992.
- [39] 이창희, 정태형, "극초단 펄스의 새로운 생성 법과 그 응용," 전자공학회지, 17, pp. 488-500, 1990.
- [40] P.J. Delfyett, L. Florez, N. Stoffel, T. Gmitter, N. Andreadakis, and G. Alphonse, "Ultrafast laser diodes," Digest of Conf. on Lasers and Electro-Optics, pp.406-408, paper JTB1, May 10-15, Anaheim, CA, USA, 1992.
- [41] T. Morioka, K. Mori, and M. Saruwatari, "Ultrafast polarization independent optical demultiplexer using optical carrier frequency shift through crossphase modulation," Electron. Lett., 28, pp.1070-1072, 1992.
- [42] L.P.K. Wa, et. al., Electron. Lett., 21, 26(1985).
- [43] M.N. Islam, C.E. Soccolich, S.T. Ho, R.E. Slusher, W.S. Hobson, and A.F. J. Levi, Opt. Lett., 16, 116(1991).
- [44] P. Ferro, M. Haelterman, S. Trillo, S. Wabnitz, and B. Daino, Electron. Lett., 27, 1407(1991).
- [45] B.P. Nelson, K.J. Blow, P.D. Constantine, N.J. Doran, J.K. Lucek, I.W. Marshall, and K. Smith, Electron. Lett., 27, 704(1991).

- [46] P.A. Anderkson, N.A. Olsson, J.R. Simpson, T. Tanbun-ek, R.A. Logan, and M. Haner, "16 Gbit/s all-optical demultiplexing using four-wave mixing," *Electron. Lett.*, 27, pp.922-924, 1991.
- [47] L.J. Cimini, Jr., L.J. Greenstein, A. A.M. Salsh, "Optical equalization to combat the effects of laser chirp and fiber dispersion," *J. Lightwave Tech.*, LT-8, pp.649-659, 1990.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] L.F. Mollenauer, E. Lichtman, G.T. Harvey, M.J. Neubelt, and B.M. Nyman, "Demonstration of error-free soliton 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.
- [52] N. Edagawa, H. Taga, Y. Yoshida, M. Suzuki, S. Yamamoto, and H. Wakabayashi, "10 Gbit/s, 150 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.
- [53] U. Ohlander, D. Karlsson-Varga, S. Nilsson, J. Andre, J. Wallin, S. Lindgren, S. Lourdudoss, O. Kjebon, B. Broberg, and G. Landgren, "Three section GRIN-SCH SI-MQW 1.55 μm 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.
- [54] T. Takano, T. Morimoto, H. Hasum, T. Nakamura, M. Yamaguchi, T. Sakai, and I. Mito, "1.55 μm 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.
- [55] 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.
- [56] Y.C. Chung, "Temperature-tuned ZnS etalon filters for WDM systems," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 4, pp.600-602, 1992.
- [57] Y.C. Chung, R.M. Derosier, H.M. Presby, C.A. Burrus, Y. Akai, N. Masuda, "A 1.5 μm laser package frequency-locked with a novel miniature discharge lamp," *IEEE Photonic. Tech. Lett.*, 3, pp.841-844, 1991. 

筆者紹介



李昌煥

1961年 9月 23日生

1983年 2月 한양대학교 전자공학과(학사)

1985年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(석사)

1989年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(박사)

1989年 7月~ 1990年 6月 Bellcore(Red Bank) Post Doc.

1989年 3月~ 현재 한국전자통신연구소 선임연구원

주관심분야: 광통신, 반도체 레이저, 극초단 광펄스 생성



沈昌燮

1952年 5月 6日生

1975年 2月 서울대학교 응용물리학과

1987年 8月 한남대학교 물리학과(석사)

1988年 3月 ~ 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(박사과정)

1975年 3月~ 1982年 12月 국방과학연구소 선임연구원

1983年 3月~ 현재 한국전자통신연구소 책임연구원 광통신연구실장