

HAN/B-ISDN에서의 광통신 기술 및 선진 각국의 광통신 시스템 개발현황

沈 昌 燮

韓國電子通信研究所 光通信研究室長

1. 서론

지난 약 20년간 광통신 기술의 비약적인 발전으로 초창기 45Mbps 시스템을 필두하여 2.5Gbps 디지털 광전송시스템까지 국외에는 상용화되었고, 국내에는 거의 상용화 단계에 와 있다. 광통신시스템 개발초기에는 세계적으로 비동기식 방식의 시스템이 일반적으로 사용되었으나 '90년대 접어들면서 거의 모든 디지털 광통신 시스템이 동기식 방식으로 표준화되어 적용되고 있는 실정이다. 이에따라 국내에서도 동기식 방식을 채택하는 STM-1, STM-4 및 STM-16의 광전송시스템이 개발되고 있다. 특히, 1993년부터는 주책연구원 HAN BISDN사업의 일환으로 STM-64 및 10Gbps 동기식 광전송 시스템의 개발을 '96년말 상용화를 목표로 개발 착수하였을 뿐만 아니라 100Gbps급 광전송시스템의 개발도 2001년 목표로하여 연구를 착수하였다. 이 시스템들은 2000년대 국내 기간통신망 구축에 필수적인 네트워크 소자로 사용될 것으로 확신되며 국내 광 CATV 및 BISDN 네트워크 구축에 이용될 것으로 전망된다.

이러한 10Gbps, 100Gbps급 광전송 시스템을 개발하기 위해서는 초고속 광전송 기술 및 초고속 전자소자의 개발이 필수적이다. 초고속 광전송 기술은 고주파 변조가 가능한 반도체 레이저 및 외부 변조기가 개발되고 고속 광검출기가 개발되면서 10Gbps 정도 데이터 전송이 가능케되었다. 특히 처핑이 적은 능동 단일모드 반도체 레이저, 희토류 원소를 첨가한 광섬유를 이용한 광증폭기, 고속 전송시 레이저 다이오드의 처핑에 기인한 펄스퍼짐 현상을 줄여줄 수 있는 분산선이 광섬유, 마이크로파 대역의 주파수 특성

을 갖는 광전소자등의 개발은 초고속 광전송 기술의 기반이 되고있다.

또한 GaAs MESFET, HBT, HEMT등의 초고속 전자 소자의 출현으로 10Gbps 이상의 데이터를 처리할 수 있는 초고속 디지털 전자회로가 개발되고 일부는 상용소자로 구매도 가능케되고 있다. 이러한 초고속 전자 소자는 디지털 회로 뿐만 아니라 광수신기의 선형 채널에 필요한 초광대역 저잡음 증폭기, AGC증폭기등의 제작도 가능케하였다.

이러한 초고속 광전송기술 및 전자소자 기술은 이제 10Gbps 광전송 장치의 실용화를 가능케 하고 있을 뿐만 아니라 좋은 특성을 가지는 레이저 다이오드의 개발과 주파수 안정화 기술, 광주파수 다중화 기술과 이에 필요한 소자들의 개발은 초고속 전자소자로 구현 가능한 한계로 생각되는 수십 Gbps의 전송 속도를 한단계 뛰어넘는 100Gbps급 이상의 초고속 광전송 장치의 실현을 가능케할 것이고 향후 정보량의 폭주가 예상되는 2000년대 이후의 정보화 사회의 통신망에 유용하게 사용될 것으로 예측된다.

전자통신 연구소에서는 '80년대초 45Mbps 단파장 광통신 시스템 개발 이후 여러가지 광통신 시스템을 개발하였고 현재 2.5Gbps 광전송 시스템 개발도 거의 완료단계에 있다.

이런 광전송 시스템의 개발은 국내 기업체에 그 기술이 이전되어 국내 기업의 기술력 향상에 기여 하였고 국내 기간 통신망 구축에 이바지한 바 크다. 아울러 10Gbps 광전송 장치와 100Gbps급 광전송 시스템의 개발도 HAN/B-ISDN 계획중 전송 분야의 과제로 개발 착수되고 있으며, 통신시장개방의 어려운 점들을 타개하기 위하여 시스템 개발 초기부터 국내 기업체들과 공동연구의 형태로 개발함으로써 기술이전

시간을 단축하여 단기간에 개발완료하여 상용화할 수 있도록 노력하고 있다.

본 기술해설에서는 현재개발 초기단계인 10Gbps 광전송 시스템에서 개발되어야 할 시스템 기술, 광소자 및 광 기술, 전자소자 기술 및 100Gbps급 광전송 시스템에 필요한 기술들에 대해서 소개하고 각국의 초고속 광전송 기술의 동향을 소개하고자 한다.

II. 10Gbps 광전송 기술

1. 개요

그림 1 은 10Gbps 광링크의 간단한 블럭도이다.

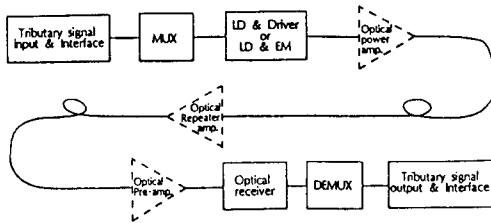


그림 1. 10Gbps 광링크의 블럭도

그림 1 에서 알 수 있는 바와 같이 광링크 블럭도는 지금까지 개발해온 광전송 시스템의 중계기와 다름없다. 따라서 광송신기의 레이저 다이오드 온도 제어, 자동 광출력 제어, 광수신기의 APD온도 보상회로 등은 2.5Gbps 등과 같은 낮은 전송 속도에서 사용되는 기술을 그대로 활용 가능하다. 시스템 운용, 감시 제어, 유지보수 등과 같이 시스템에 수반되는 S/W 와 H/W 등의 상당 부분도 지금까지 쌓아온 낮은 전송 속도의 시스템에서 사용되는 기술을 사용 가능하다.

그러나 10Gbps 광전송 시스템에서 특별히 중점을 두어 개발해야 하는 부분은 초고속부로서, 155Mbps, 620Mbps, 및 2.5Gbps등의 낮은 속도의 종속신호를 10Gbps 전송속도에 동기화된 10Gbps신호로 다중화/역다중화하는 기술, 레이저를 10Gbps로 구동하는 구동회로 또는 외부 변조기를 사용하는 경우 외부 변조기 제작 기술 및 구동회로, 10Gbps 광신호를 전기신호로 변환하는 전치 증폭기, AGC증폭기 및 클럭 재생 등을 포함하는 광수신기등이다. 따라서 본 장에

서는 시스템을 포함하여 이들 초고속 기능들이 가져야 할 대체적인 요구사항들과 구현방법들에 대해 간단히 기술하도록 한다.

2. 10Gbps 시스템 요구사항

10Gbps 광전송 시스템은 초대용량 장거리 전송장치로서 시스템 인터페이스 신호로 STM-1(155Mbps) STM-4(620Mbps), STM-16(2.5Gbps)의 광신호를 수용하여야 한다. 시스템의 요구사항을 간단히 요약하면 다음과 같다.

1) 시스템 용량

고속부 광신호는 전송속도 9953.280Mbps를 갖는 STM-64신호를 전송할 수 있어야 한다.

또, 종속신호는 64 x STM-1, 16 x STM-4, 4 x STM-16 신호 및 이들 신호를 혼재할 수 있어야 한다.

2) 시스템 운용방식

10Gbps 광전송 시스템은 단국, 중계기, 선형/환류 ADM의 기능을 갖어야 한다.

3) 클럭동기 기능 및 적용

CCITT G.703 규격을 만족하는 외부 동기 수용 가능해야하고 STM-N으로 부터 직접 클럭 타이밍을 추출할 수 있어야 하며, 전송되는 신호는 이 클럭에 동기화 되어야한다. 또한 STM-N에서 타이밍 기준에 부적합하면 기준에 적합한 라인 타이밍으로 자동 절체 가능해야 한다. 또, 운용자에 의해 임의의 클럭을 동기 클럭으로 선택할 수 있어야 하고 우선위를 정하여 장애시 자동절체되게 해야 한다.

4) 보호 절체기능

저속다중화부는 양방향 복귀성, 고속다중화부는 단방향 비복귀성을 절체 기능을 갖아야 한다.

5) 종속신호의 및 전기적 광학적 특성

STM-1, STM-4 및 STM-16의 접속신호는 표 1, 2, 3의 조건으로 만족하여야 한다.

표 1. STM-1 (155.520Mbps) 접속조건

항 목	규 격		
	국 사 내	장 거 리	
신 호 속 도	155.520Mb/s ± 20ppm	최 동	
신 호 부 호	Scrambled NRZ	최 동	
송 신 부	광 원 파 장	1310nm OR 1550nm(공칭)	최 동
	광 원 형 태	MLM 또는 LED	SLM
수 신 부	출 력 레 벨	-8 ~ -15dBm	0 ~ -3dBm
	수 신 감 도	-23dBm	-37dBm
수 신 부	최 대 입 력 레 벨	-8dBm	10dBm
	광 경 로 왜 널 티	1dBm	1dBm

표 2. STM - 4(622.080 Mb/s)접속조건

항 목	규 격		
	국 사 내	장 거 리	
선도속도	622.080Mb/s + 20ppm	좌 동	
선도부호	Scrambled NRZ	좌 동	
송신부	광원파장	1310nm OR 1550nm(공칭)	좌 동
	광원형태	MLM 또는 LED	SLM
수신부	출력레벨	-8 ~ -15dBm	+2 ~ -3dBm
	수신감도	-23dBm	-33dBm
신신부	최대입력레벨	-8dBm	8dBm
	광경로피널티	1dBm	1dBm

표 3. STM - 16(2.488,320 Mb/s) 접속조건

항 목	규 격		
	국 사 내	장 거 리	
선도속도	2488.320Mb/s + 20ppm	좌 동	
선도부호	Scrambled NRZ	좌 동	
송신부	광원파장	1310nm OR 1550nm(공칭)	좌 동
	광원형태	MLM 또는 LED	SLM
수신부	출력레벨	-3 ~ -10dBm	+1 ~ -1dBm
	수신감도	-18dBm	-30dBm
신신부	최대입력레벨	-3dBm	-9dBm
	광경로피널티	1dBm	1dBm

- * 수신감도는 시스템 개발시 광송신기와 광수신기를 직접 연결하여 시험한것임.
- * 기타 명시하지 않은 것은 CCITT G.957을 만족하여야 한다.

10Gbps 광전송 시스템은 위에 언급한 주요 특성 외 | 라인지터, 허용입력지터, 지터전달특성 등을 시스템은 만족해야하고 시스템 유지보수관리에 관한 사항도 만족하도록 설계 제작해야 한다.

3. 광송신기 구현방법

10Gbps 광송신기는 크게 두가지로 분류할 수 있다. 고속 다중화기로 부터온 10Gbps 데이터 신호는 | 류원 신호로 변환하여 레이저 다이오드를 직접 구하는 직접 변조 방식과 레이저 다이오드를 CW상태로 바이어스 시키고 대전력 증폭기를 사용하여 큰 전력의 10Gbps데이터를 생성하여 외부 변조기를 구하는 방식이다. 그림 2 는 직접변조 및 외부 변조식의 광송신기 블록도이다. 이러한 송신기를 구현기 위해 고려할 사항들은 전자소자의 스위칭 속도, 반도체레이저 및 외부 변조기의 변조 대역폭과 변조 | 에 유기되는 처핑의 양이다. 광송신기의 대표적인 | 자로는 그림 2 에서 알 수 있는 바와 같이 반도체 | 이저 드라이브, 외부 변조기 드라이브, 처핑이 적 | 레이저 다이오드 등이다. 10Gbps용 레이저 다이 | 드의 특성은 많이 연구되고 있으며 |, 상용으로 구 | 가능한 단계에 있다. 그러나 광송신기에서 무엇보다

다 중요한 것은 반도체 레이저/구동회로에 의한 변조 시 유기되는 광주파수의 처핑 현상이다. 특히 10Gbps 이상의 광통신에서는 처핑의 양과 광섬유의 분산 특성이 전송거리를 결정하므로 처핑이 적게 발생하는 외부 변조기형의 광송신기를 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 이 경우 외부 변조기에 의한 삽입 손실이 발생하므로 장거리 광전송 시스템에서는 광증폭기를 사용하여 출력전력의 손실을 보상해 주어야 하므로 송신기가 복잡해져서 신뢰성에 문제가 생길 수 있다. 10Gbps 광송신기의 구현에 있어서 현재는 상용으로 구매 가능한 레이저 드라이브나 외부 변조기 드라이브가 없어서 직접 이런 드라이브들을 개별소자를 이용하여 제작하거나 MMIC를 개발하여 사용해야한다. 10Gbps광통신에 사용하기 위해서는 꽤 캐징된 상태에서 변조 대역폭이 10GHz이상이고, 부모드역압비가 30dB 이상이며, 변조시에 -20dB 발진 선평이 0.4 nm이며, 평균 광출력은 -2dBm이상인 반도체 레이저가 요구된다. 이러한 특성은 데이터로 변조하여 소광비가 10일 때 남고하여야 한다. 또, 변조시에 유기되는 timing jitter도 25 ps이하가 되어야 한다.

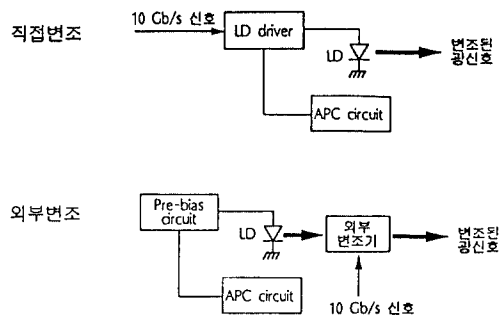


그림 2. (a) 직접변조 방식의 광송신기, (b) 외부변조 방식의 광송신기

4. 광수신기 구현방법

10Gbps용 광수신기는 크게 두가지방식으로 나눌 수 있다. 하나는 저잡음 광증폭기를 전치증폭기로 사용하고 간단한 광검출회로를 사용하는것 이고, 다른 하나는 기존의 방식대로 저잡음의 전치증폭기를 APD-FET 또는 PIN-FET을 이용하여 제작하는 것이다. 첫번째 방식은 현재 많은 연구가 수행되고 있는 광증폭기의 이점을 최대한 살리자는 것이고 또한

수신감도가 좋은 장점이 있다. 그러나 저잡음 광증폭기의 제작에 필요한 펌핑 레이저다이오드의 신뢰성에 아직도 많은 사람들이 의심을 하고있을 뿐만 아니라 아직 까지 광부품들의 가격이 상당히 비싸므로 전체 광수신기의 제작 가격이 고가가 될 수 있다. 이에 반해 두번째 방식은 아직 광대역의 APD가 상용화되지 않았지만 APD나 PIN을 사용하여 기존의 방식대로 수신기를 제작하는 것이다. 이방법은 가격이 저렴하게 드는 장점이 있으나 저잡음의 증폭기를 설계 제작하기 힘든 단점이 있다. 첫번째 방식으로 보고된 수신감도중 제일좋은 것은 -38.8dBm 정도^[1] 이고 보통은 -30dBm 정도의 수신감도를 얻을 수 있다. 두번째 방식중 APD를 사용하는 경우 보고된것중 가장 좋은 수신감도는 -27.6dBm ^[2] 이고, PIN을 사용하는 경우는 -21dBm 정도가 보고되고 있다.

광수신기를 제작하는데 있어서 전치증폭기뿐 아니라 AGC 증폭기, 클럭/데이터 재생기등이 필요한데, 이런 부품이 현재로서는 전무한 상태이므로 시스템용 광수신기를 제작하는데 많은 어려움이 따를 것으로 생각된다. APD는 일부 외국의 기업체에서 10Gbps 용을 상용화하기 위해 노력하고 있는 것으로 알려져 있고, 전치증폭기나, AGC 증폭기 및 클럭/데이터 재생기는 MMIC화하여 개발하거나 개별소자를 이용하여 구현하여야 한다. 이런소자를 개발하는데 있어서 어려운점은 이런소자들이 초광대역의 주파수 특성을 가져야하는데 있다. 광수신기의 선형채널은 이득이 평탄해야할 뿐만 아니라 군지연 특성도 상당히 좋아야 수신감도의 열화를 방지할 수 있다. 클럭 추출은 유전체 공진기를 사용하거나 PLL을 사용하여 가능하다. 또 한가지의 H/W를 구현하는데 있어 어려운점은 10Gbps의 1 UI(unit interval)이 100ps 밖에 되지 않으므로 재생한 클럭으로 입력된 신호를 판별 회로로 재생할 때 데이터의 중심에 클럭을 위치하도록 하기가 쉽지 않다는 것이다. 또한 판별회로는 위상마진 및 입력진폭에 대한 ambiguity가 적은 소자가 필요한데 이것이 만족되지 못할 경우 수신감도에 영향을 미칠 수 있다.

광수신기 H/W의 요구사항으로 선형채널은 8GHz 정도의 대역폭과 $1\text{dB}_{1\text{dB}}$ 미만의 이득 평탄 특성을 가져야하고, 전치증폭기의 등가입력잡음전류밀도는 대략 $10\text{pA}/\text{Hz}$ ^[3] 이어야 한다. 또한 다이내믹레인지는 -10dBm 정도 까지의 광입력을 받을 수있도록 설계 제작해야한다. 라인지터도 0.01UI 이하 이어야 한다.

5. 광섬유 색분산 보상방안

광섬유의 손실은 최근에 개발된 광증폭기를 사용하여 보상할 수 있으므로, 1.550nm대에서 광통신을 하는 경우 가장 큰 문제는 광섬유의 색분산이다. 단일모드 광섬유의 색분산계수는 약 $18\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ 이고 직접변조된 2.5Gbps 광신호의 전송거리를 50km 정도로 제한한다. 만약 이 광섬유를 이용하여 직접변조 방식으로 10Gbps 광통신을 한다면 전송거리가 10km이하로 단축된다. 그래서 전송거리를 늘리기 방법으로 분산천이 광섬유를 사용한다. 분산천이 광섬유의 색분산계수는 약 $\pm 2\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ 로 단일모드 광섬유를 사용하는 경우보다 10배 정도 전송거리가 길게할 수 있다. 분산천이 광섬유를 사용하더라도 전송거리가 긴 경우나 단일모드 광섬유를 사용하기 위해서는 광섬유에서의 색분산을 보상해 주어야 한다.

광섬유의 색분산을 보상하는 방법으로는 다음과 같은 방법들이 있다. 자세한 색분산보상법에 대해서는 참고문헌 [4] 을 참조하기 바라며 여기서는 간략히 그 내용을 요약 한다. 먼저 단일모드 광섬유와 분산천이 광섬유를 조합하여 색분산을 보상하는 방법과 전송구간의 분산천이 광섬유에서의 색분산량에 해당하는 거리의 단일모드 광섬유를 사용하여 분산을 보상시키는 방법이다. 또, 단일모드 광섬유의 색분산을 보상을 위해서 색분산이 매우 크고 손실이 적은 광섬유를 연구하고 있다. 다음 방법인 광학적인 방법과 수신기쪽에서 광신호를 한쪽 거울의 반사율이 100%인 Fabry-Perot 간섭계에 입사시키서 반사되는 빛을 검출하여 색분산을 보상하는 방법으로, 간섭계를 도입하기 때문에 생길 수 있는 손실을 제거하고, 간섭계에서의 dispersion을 이용하여 색분산을 보상한다. 또 하나의 색분산 보상 방법은 광섬유에서의 비선형 효과에 의한 펄스의 압축을 이용하는 방법이다. 이 방법을 사용하기 위해서는 전송과장이 광섬유의 이득 분산영역이어야 한다. 즉, 광섬유에 대출력의 data 펄스를 보내서 광섬유에서의 비선형효과에 의한 자기위상변조(self-phase modulation)와 색분산효과와 상호작용에 의한 펄스의 압축을 이용하여 색분산에 의한 펄스폭의 확산을 보상하는 방법이다.

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 처핑된 펄스는 진행하면서 압축되려고 할 것이다. 한편 파이버의 색분산은 펄스폭을 증가시키면서 자기위상변조에서와는 반대방향으로 처핑을 유기한다. 이와같이 펄스를 압축하려는 힘과 펄스폭을 늘리려는 힘이 서로 상쇄되면서 펄스가 광섬유를 왜곡없이 진행하는 솔리톤을 이용하여 색분산을 이상적으로 보상한다.

6. 광증폭기

미약한 광신호를 광/전, 전/광 변환없이 빛의 상태로 증폭하는 광증폭기는 광섬유 손실에 의해서 감쇄된 광신호를 복원해 주므로 장거리 무중계 광통신을 가능하게 한다. 이를 위해서 반도체 레이저 광증폭기가 오래전부터 연구되었다. 그러나 증폭기를 거치고 나면 신호가 왜곡되는 단점이 있었다. 최근에 개발된 에르븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA)는 왜곡없이 광신호를 증폭시켜 주므로 광통신의 발전에 커다란 기여를 하고 있다. 특히 EDFA의 전송속도에 무관한 특성은 10Gbps급 이상의 초고속 광통신에서 그 장점이 두드러진다.

EDFA는 편광에 무관한 높은 이득(30dB 이상), 이론적 한계치에 가까운 낮은 잡음지수(약3dB), 높은 포화출력(10dBm이상), 전송속도 및 변조방식에 무관한 증폭특성, 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 에르븀이 소량 첨가된 에르븀 광섬유, 신호광과 여기광을 동시에 에르븀 광섬유로 혼합시켜주는 WDM, EDFA 내에서의 반사광 제환으로 인한 레이저발진을 막아주는 광 isolator, ASE(Amplified Spontaneous Emission) 잡음성분을 제거하기 위한 필터 및 에르븀 이온들을 여기시키기 위한 여기용 LD 등으로 구성된다.

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. 또한 영국의 Southampton 대학과 미국의 AT&T에서는 erbium 광섬유의 중간에 isolator를 삽입하는 새로운 방식의 "Composite EDFA"를 구현하여 소신호이득 46dB와 3.1dB의 잡음지수를 동

시에 얻었으며, 이를 이용하여 10Gbps 광신호를 45Km 전송하여 -37.6dBm의 수신감도를 얻었다. 중계기용 광증폭기로는 원격제어 및 상태감시에 관한 방법이 정립되지 못하여 그 발전속도가 상대적으로 더딘 중계기 분야에서는 일본의 NTT에서 태평양 해저 케이블용으로 9,000km의 광전송로를 274개의 EDFA를 이용하여 10Gbps의 광신호를 전송하는데 성공하였다. 이때 광전송로는 분산 천이된 광섬유가 사용되었으며 EDFA 중계기의 간격은 50km였다.

10Gbps 시스템에서의 광증폭기는 전치증폭기와 광전력증폭기가 사용될 것이다. 광전력 증폭기는 대신호이득이 12 dB 이상이며(0dBm 입력시), 출력이 12 dBm이상이고 잡음지수가 8dB이하인 것이 사용될 것이다. EDFA에 대한 자세한 review는 본호의 논문인 "희토류첨가 광섬유 증폭기의 광통신 응용"을 참고하기 바랍니다.

7. 초고속 다중화/역다중화

시스템 요구사항에 있는 바와 같이 STM-1, STM-4, STM-16 및 이들 신호의 혼재를 종속신호로 받아서 동기식 계위의 전송속도를 가지는 초고속 다중화기를 제작하거나 광수신기로 부터 오는 신호를 이들 종속신호로 풀어주는 역다중화 회로가 필요한데, 이들 기능의 실현은 실험적으로 30Gbps정도 까지 HBT나 HEMT 등과 같은 초고속 소자를 사용하여 구현하고 있다.¹⁶⁾ 실제 시스템 제작을 위해서는 5Gbps 정도 까지는 HBT를 이용한 게이트어레이, 1Gbps 정도 까지는 GaAs MESFET 또는 Si BJT를 이용한 게이트 어레이 상용 소자를 이용하여 구현가능할 것이며 그 이상의 간단한 10Gbps 다중화/역다중화는 개별소자를 이용하여 구현가능할 것으로 사료된다. 따라서 시스템 개발 초기에는 외국의 초기 상용화 소자를 이용하여 초고속 다중화기를 개발하고, 궁극적으로는 HBT등과 같은 초고속 소자를 이용한 주문형 IC를 개발해 사용하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다. 이렇게 하므로써, 시스템의 성능향상, 저가격화를 이루어 경쟁력이 높은 시스템을 개발 할 수 있을 것이다.

III. 100Gbps 광통신 기술

1. 개요

지금까지 설명한 광전송시스템은 시간을 분할하여

다중화하는 방식이다. 그러나, 100Gbps 이상으로 전송속도를 높이기 위한 다중화 방법에는 기존의 초고주파 통신에서처럼 주파수를 분할하여 다중화하는 방법도 있다. 이 방법은 약 2000GHz 정도되는 광섬유의 전송대역폭(분산이 최소인 영역에서의 산출한 값임)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)부른다. 이러한 광링크들은 이미 오래전에 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 채널당의 전송속도가 채널의 수만큼 감소되므로 변조된 레이저의 발진선폭도 감소되어 광섬유의 색분산에 의한 전송거리의 감소를 완화시킬 수 있는 장점도 있다. 그래서 10Gbps 이상의 광통신을 분산선이 광섬유를 사용하지 않고 기존의 단일 모드 광섬유를 사용하여 구현할 수 있는 방법으로 이러한 방법들이 연구되고 있다.

2. 파장분할 다중화

그림 3에 파장분할 방식의 광 링크의 구성도를 나타내었다. 파장분할방식의 단일 파장만을 생각하면 광링크는 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, 수신단에는 송신단에서 보낸 단일 파장의 신호만을 선택할 수 있는 광 필터가 필요하다. 이러한 광링크를 구현하기 위해서는 다음과 같은 해결해야 될 기술적인 문제점이 있다.

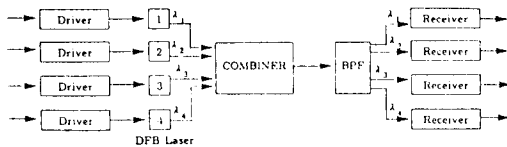


그림 3. 파장분할 방식의 광링크 구성도

파장분할 다중화 시스템의 상용화를 위해서 해결해야 될 문제점으로는 제일 먼저 광원인 DFB레이저의 수율 및 파장의 재현성이다. 시간분할 방식과 달리 송신 파장이 결정되어 있는 파장분할 방식 송신기의 송신용 레이저는 선택의 자유도가 없고 결정된 전송 파장에 맞는 레이저를 선택해야 한다. 이는 필요한 DFB레이저의 수율을 급격히 저하시키고 상대적으로 레이저의 가격을 수 배 상승시킨다. 여기서 또 한가지 문제점은 사용하는 레이저가 죽었을 때의 레이저의 교환이다. 이 때도 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 레이저⁵⁾, tunable DBR 레이저⁶⁾, 그리고 tunable 파이버 레이저⁸⁾ 등을 연구하고 있으나, 그 가변폭이 충분히 넓지 못하다(8 개의 channel을 약 1nm의 channel 폭으로 다중화 하는 경우 각 레이저의 중심파장이 동일하다면 최소한 8nm 이상 파장이 연속적으로 가변되는 레이저가 필요하다). 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 통과파장 가변(tunable) 필터가 필요하다. Grating filter를 사용하는 경우 grating의 회절효율이 입사광의 polarization에 의존하기 때문에 시스템의 성능을 저하되고, PZT를 사용하는 파이버 Fabry-Perot filter는 아직 수명이 보장되지 않고 있다. 저가의 신뢰도가 높은 tunable filter를 개발하기 위해서 ZnS-based temperature tuning filter가 연구되고 있다.⁹⁾

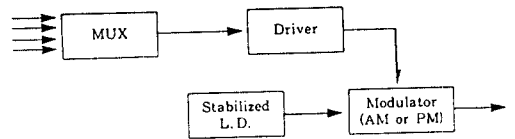
파장분할 다중화 광링크에서 중요한 변수 중에 하나는 채널간의 파장 간격이다. 파장간격이 너무 좁으면 수신단에서 필터를 구현하기가 힘들어질 뿐만 아니라, 근본적인 문제인 광섬유에서의 비선형성에 의한 four wave mixing, stimulated Raman scattering, stimulated Brillouin scattering 등이 영향을 미치기 시작하여 광 링크의 성능을 저하시킨다. 일반적으로 광학적 비선형 현상은 광섬유 코어의 직경이 가는 분산선이 광섬유에서 보통의 단일 모드 광섬유보다 훨씬 크게 나타난다. 이는 파장분할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

단일모드 광섬유를 사용하는 또 다른 이유이다. 한, 채널폭을 넓게하는 것은 장거리 전송을 위해서 용해야하는 EDFA의 대역폭에 의해서 제한된다. 이러한 영향을 고려해서 2.5Gbps신호를 파장분할로 중화하는 경우 채널폭은 약 1nm정도가 적당할 것으로 예측하고 있다.

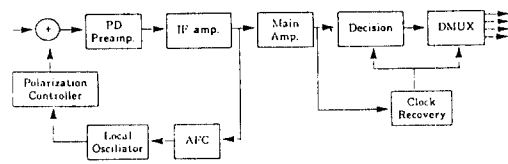
3. 주파수분할 다중화

주파수분할 다중화에는 앞에서 설명한 파장분할 다중화의 경우에서 채널간의 주파수폭을 감소시키고 직접검출방식을 이용하는 경우와 광파통신을 이용하는 경우가 있다. 직접검출방식을 이용하는 광 링크에서 기술적인 문제는 앞의 파장분할 방식에서의 송신의 파장가변 반도체 레이저 구현문제와 수신단에서 대역폭이 좁은 광필터를 구현하는 문제가 있다. 특히, 광섬유의 광학적 비선형성에 기인하는 광 링크의 성능저하를 막기 위한 연구가 필요하다. 지금까지 설명한 광통신 방식은 광의 가간섭성을 이용하지 않으므로 빛을 사용하는 경우 반송주파수가 높아서 신호속도를 매우 높일 수 있는 장점을 충분히 사용하지 못하고 있다. 광파통신은 빛의 파형적인 특성 충분히 살려서 통신속도를 높이면서 동시에 수신기의 수신감도를 높이는 것에 그 목적이 있다. 그림 (a)와 (b)는 광파통신을 이용한 송신기와 수신기의 성도를 나타낸 것이다. 송신측에서는 가간섭성이 우수한 빛을 사용하여, 빛의 전계 성분의 진폭, 주파수, 또는 위상을 변조하고, 변조시의 변조된 빛 대역폭을 최소화함으로써 매우 많은 채널을 주파수 다중화할 수 있도록하여 광섬유의 전송대역폭을 최대한 이용할 수 있도록 한다. 수신단에서는 기존의 라디오 수신기에서처럼 국부발진기를 사용하여 입력 신호와 국부발진기의 광을 혼합한 다음 그 비트 주파수를 검출하여 주파수 분할 역다중화를 한다. 이 때 비선형 신호는 입력광신호와 국부발진기의 출력의 곱에 비례하므로 국부발진기의 출력을 높여서 수신기의 수신감도를 높인다. 광파통신에서의 수신감도는 양자역학적 한계인 산탄잡음에 의해서 결정되므로 직접검출 방식보다 20 dB 정도 개선된다. 여기서 한가지 언급할 것은 광파통신에 의한 이러한 수신감도의 개선은 직접검출 방식을 사용하고 EDFA를 pre-amp.를 사용하여 개선되는 수신감도와 유사하다. 광파통신의 경우도 광섬유의 색분산의 영향은 앞의 강도변조의 경우와 동일하나, 색분산의 영향을 수신기의 IF단에

서 전기적인 delay line을 이용하여 보상해 줄 수 있다. 광파통신을 구현하기 위한 핵심기술로는 송신기 쪽에서는 협대역 파장가변 반도체 레이저(전송하고자 하는 bit rate의 1/100 정도의 발진선폭)가 요구된다. 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 연구되고있다. ¹⁰⁾ 수신단에는 고효율 협대역 반도체



(a) 송신기



(b) 수신기

그림 4. 광파통신을 위한 광링크의 구성도

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 직접검출방식의 주파수분할 광링크에서처럼 매우 중요하다.

IV. 10Gbps/100Gbps 초고속 광전송 기술현황

1. 직접변조방식의 광링크 구현

광통신 시스템의 핵심인 광 링크는 송신기, 전송로

인 광섬유, 그리고 수신기로 구성된다. 그림 2(a)는 반도체 레이저를 원하는 전송속도의 전기신호로 직접 변조하여 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 Gbps이상의 전송실험도 실험실 레벨에서 성공되고 있으며, 표 4에 지금까지의 결과를 나타내었다. ¹¹⁾ 가장 괄목할만한 결과는 Bellcore에서 수행한 실험으로 광증폭기를 사용하지 않고 11 Gbps 광신호를 81 km 전송에 성공한 것이다. ¹²⁾

표 4. 반도체 레이저 직접변조방식을 이용한 광링크 실험결과

전송속도	전송거리	Chirping	광증폭기	기관	비 고
10 Gbps	140 Km	0.4 ns at -20 dB	a booster and a preamp. EDFA	Hitachi EDOC '91 H. Nakano	Sensitivity -26.5 dBm
10 Gbps	20 Km	0.52 ns at -20 dB	no EDFA	Toshiba EDOC '91 H. Yamakawa	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 ns at -20 dB	no amplifier	NTT EL '91 Y. Miyamoto	Sensitivity -23 dBm (APD) EGF: 1.3 us
16 Gbps	64.5 Km	35 dB SNR	SL preamp.	AT&T EL '89 A.H. Gnauck	pin-FET receive 1.3 um with normal fiber

2. 외부변조기 이용방식의 광링크 구현

그림 2(b)는 반도체 레이저의 직접변조시에 생기는 처핑과 광섬유의 색분산에 의해서 제한되는 전송용량 및 전송거리를 증가시키기 위해서 초고속 반도체 레이저를 상대적으로 속도가 느리고 발진 선평이 좁은 반도체 레이저와 변조시 처핑이 적은 외부변조기로 대체한 것이다. 여기서 변조신호는 외부변조기에 가해지고 반도체 레이저에는 바이어스 전류만 가하고 발진선평을 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 광증

폭기가 필요로 하는 경우가 많으며, 아직 외부변조의 신뢰성이 확인되지 않았으며, 시스템이 복잡해지는 단점이 있다.

표 5은 간섭계형 외부변조기와 흡수형 외부변조를 이용한 대표적인 전송실험결과를 종합하였다. ¹³⁾ 모든 실험에서 외부변조기의 삽입 손실을 보상하기 위해서 booster 광증폭기를 사용하였으며, 장거리 전송을 위해서 앞에서 열거한 여러가지 색분산 보상도 도입되었다. 또, EDFA를 pre-amp.로 사용하여 수신기에 입사되는 빛의 세기를 증가시켜서 색분산에 의한 power penalty 및 광섬유의 손실을 보상하기 위한 장거리 전송에 성공하였다. 특기할 만한 결과는 일본의 KDD 연구소에서 얻은 10 Gbps 신호의 9.00 km 전송에 성공한 결과로 매 33 km 마다 EDFA를

표 5. 외부변조기를 이용한 광링크 실험결과

전송속도	전송거리	변조/복조	광증폭기	기관	비 고
20 Gbps	100 Km	EW/DD 100Gbps * 2	고출력 EDFA for receiver	NTT OFC '92 K. Hagimoto	3 dBm signal is coupled to PIN
10 Gbps	220 Km	EW/DD	a booster (2um) a pre-EDFA (20 GHz)	AT&T PTL '92 A.H. Gnauck	lunched power -12 dBm Sensitivity -36 dBm
17 Gbps	150 Km	EW/DD	a booster and a pre-EDFA	NTT Opt. App. and their Appl. '90 H. Hagimoto	Dis. compen. with normal SMF Sensitivity -24.8 dBm
10 Gbps	140 Km	Electroabs. modulation Tx and Rx mod. EW/DD	a booster and a preamp. EDFA	NEC OFC '92 T. Suzuki	Sensitivity -12.4 dBm with 24db EDFA -28.5 dBm
20 Gbps	100 Km	Electroabsorp. Modulation/DD	a booster and a pre-EDFA	NTT EL '92 T. Katsuka	No modulator driver
10 Gbps	9000 Km	Electroabsorp. modulation/DD Extinction ration 20 dB	274 EDFA 33km span DSF a booster and a pre-EDFA	KDD R&D Lab. H. Taga DSF OFC '93	Sensitivity -29.5 dBm

사용하였다. ²¹⁾ 이는 전송거리가 동일한 분산천이 광섬유의 색분산에 의한 제한(1 dB power penalty를 주는 전송거리 600 km)을 넘어선 것으로, 신호광의 파장을 전체 광섬유의 평균분산이 최소인 파장으로 선택했다. 또, EDFA를 이용하여 여분의 색분산에 의한 power penalty(약 5 dB)를 보상해 준 것이다. 또, 일본의 NTT에서는 동경에서 하마마슈까지의 360 km 구간에 10Gbps시스템의 현장시험을 하고 있다.

3. 광학적 MUX/DUMX에 의한 광링크

1) 광학적 MUX

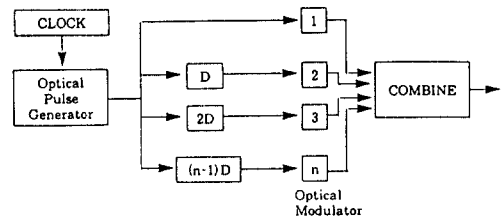
광학적 다중화는 가장 기본적인 방법으로 충분하

짧은 광펄스를 변조신호로 변조한 다음 일정한 시간 지연을 시켜서 광펄스가 없는 시간공간에 끼워넣는 방식으로 그림 5 (a)에 광학적으로 MUX을 행하는 광통신 시스템의 구성도를 나타내었다. 이러한 방법을 이용하여 10 Gbps를 광학적으로 4 channel MUX 하여 40Gbps의 광통신 시스템을 10Gbps용 전자소자를 이용하여 구현할 수 있다. MUX를 위해서 먼저 clock 주파수(= 전송 bit rate 에 해당하는 광펄스열을 생성하고, 이를 다중화하고자 하는 channel 수 만큼 균일하게 광 파워를 분리한다. 이때 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 이득스위칭법, Q-스위칭법, 그리고 여러가지 모드록킹법 등이 연구되고 있다.²² 생성한 극초단 펄스폭은 수 ps 정도이며, 이를 압축하여 0.270 fs를 얻은 결과도 보고되었다.²³ 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, 채널 수 만큼의 반도체 레이저를 사용하여야 한다.

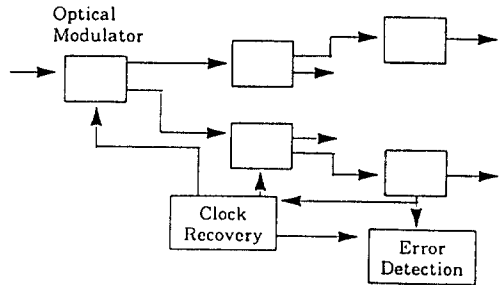
2) 광학적 DMUX

광학적으로 DMUX하는 방법에는 1) 전기광학효과를 이용하는 광스위치를 사용하는 방법과 2) 전기광학 효과를 사용하지 않고 광학적 비선형성을 이용하는 완전광 스위치를 이용하는 방법이 연구되고 있다. 그림 5 (b)에 전기광학적 광스위치를 사용한 DMUX에 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 채널당의 bit rate와 같아질 때까지 계속된다. 광스위치계를 통과하여 얻은 최종 광신호는 직접변조방식에서와 같은 수신기를 이용하여 송신단에서 보낸 정보를 각 channel별로 재생한다. 그러나, 광 스위치계의 삽입 손실로 광검출기에 도달하는 광세기의 감소가 심하므로 광검출기 전단에 pre-amp.를 필요로 하는 단점이 있다. Channel별 정보를 재생하면서 기본 clock도 같이 재생되어 광스위치의 변조신호로 인가되며, 상위레벨의 변조기에는 기본 clock 주파수의 2n(n은 최종단으로부터의 상위 레벨의 수)배에 해당하는 주파수의 신호가 변조신호로 인가된다.



(a) 송신기



(b) 수신기

그림 5. (a) 광학적 MUX을 이용한 송신기. (b) 광학적 DMUX에 의한 수신기

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. 최근에

는 광섬유에서의 비선형현상이 일어나는 시간이 100 fs 이하로 매우 빠른 것을 응용한 광섬유만을 이용하는 DMUX 방식이 활발히 연구되고 있으며 60 Gbps에서의 동작이 보고되었다.³¹⁾ 광비선형 효과를 이용한 DMUX에서는 역다중화가 끝난 최종단에서 광검출기 및 판별회로를 이용하여 전송된 신호를 재생한다. 그러나 이방식을 실제의 시스템에 사용하기 위해서는 DMUX의 소형화, 그리고 이를 구현하는데 필요한 부품의 가격인하이다.

광섬유를 이용한 DMUX방법에는 1) 방향성 결합기를 구현하고 센 조절광으로 결합기의 결합효율을 바꿈으로서 원하는 신호광을 가려내는 방향성 결합기형³²⁾, 2) 편광이 다른 두 soliton이 광섬유를 진행할 때의 soliton trapping에 의한 soliton의 진행속도와 단일 soliton이 진행할 때의 soliton의 진행속도의 차이를 이용하는 soliton 스위치형³³⁾, 3) 광섬유에서 진행하는 신호광의 편광을 센 조절광으로 회전시켜서 원하는 신호광을 편광기로 가려내는 편광스위치형³⁴⁾, 4) 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 간섭계형³⁵⁾, 5) 파장이 다른 조절광과 신호광과의 4 광파 혼합에 의해 새로이 생성되는 주파수 성분을 가려내는 광파 혼합형³⁶⁾ 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 구형파 펄스의 조절광이 필요하다. 이러한 펄스를 구현하기 위해서는 펄스폭이 스위칭하고자 하는 신호의 펄스폭보다 훨씬 좁은 폭을 갖는 펄스와 광펄스 조형기가 필요하다. 구형파 펄스는 광섬유를 진행하는 동안에 색분산에 의해서 쉽게 펄스의 모양이 바뀌므로 시스템에서 사용하기에는 바람직하지 않다.

V. 결론

광링크의 전송거리를 제한하는 요인은 1) 전자소자


및 광자소자의 스위칭 속도, 2) 광섬유의 색분산, 3) 광섬유의 광학적 비선형성을 들 수 있다. 고속 전자소자는 광통신 이외의 다른 분야에도 널리 응용되므로 활발히 연구되고 있어서 10 Gbps용의 소자의 일부가 상용화되었고 머지않아 많은 회사에서 상용화 제품을 낼 것으로 예측된다. 또, 10Gbps용 광소자도 머지않아 상용화 될 것으로 기대된다. 그러나, 1996년까지 개발을 완료해야 하는 10Gbps 시스템의 경우는 상용소자가 나올 때까지 기다릴 수 없으므로 일부 핵심소자는 자체개발하거나, 외국회사에 용역을 주어 제작하여야 한다.

10 Gbps급 이상의 광전송시스템을 구현하기 위해서는 본 논문에서 검토한 바와 같이 확보 가능한 소자에서 오는 제한, 광섬유의 색분산에서 오는 제한, 광섬유에서의 광비선형성에서 오는 제한, 그리고 광증폭기의 장점 등의 여러가지 영향을 종합적으로 고려하고, 앞으로 개발할 더 큰 용량의 광 링크와의 연계성 등을 예측하여 광링크를 설계하고 이의 성능을 분석하는 시스템 연구와 함께 광링크 및 광전송 시스템을 구성하는 각각의 subsystem에 관한 전문화된 연구가 필요하다. 또, 광링크뿐만아니라 고속 및 저속 다중화기술, 시스템 엔지니어링 기술, 주문형 반도체 설계기술 등을 효율적으로 개발하여야만 개발 시기를 앞당길 수 있을 것이다.

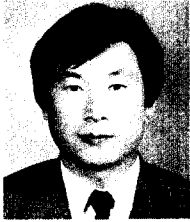
參 考 文 獻

- [1] Y. Suematsu, K. Iga, and S Arai, "Advanced semiconductor lasers," *Proceedings of IEEE*, vol. 80, pp. 383 - 397, 1992.
- [2] R.I. Laming, A.H. Gunack, C.R. Giles, M.N. Zervas, and D.N. Payne, "High-sensitivity two-stage erbium-doped fiber preamplifier at 10 Gbit/s," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 4, pp. 1348-1350, 1992.
- [3] H. Ishikawa, I. Watanabe, T. Suzaki, M. Tsuji, S. Sugou, K. Makita and K. Taguchi, "High-sensitivity 10 Gbit/s optical receiver with superlattice

- APD." *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 1874 - 1876, 1993.
- [4] 이창희, "초고속 장거리 광전송을 위한 색분산 보상법," ETRI TM94-1340-03.
- [5] K. Runge, D. Daniel, J. L. Gimlett, R. B. Nubling, R. L. Pierson, M. F. Chang, K. C. Wang, and D. M. Chen, "A 27Gb/s AlGaAs/GaAs HBT 4:1 multiplexer IC," *GaAs Sym.*, pp. 233 - 236, 1991.
- [6] 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 μ 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.
- [7] T. Takano, T. Morimoto, H. Hasum, T. Nakamura, M. Yamaguchi, T. Sakai, and I. Mito, "1.55 μ 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.
- [8] J.L. Zyskind, J.W. Sulhoff, J. Stone, D.J. Digiovanni, L.W. Stulz, H.M. Presby, A. Piccirilli, and P.E. Praymayon, "Electrically tunable, diode-pumped erbium-doped fiber ring laser with fiber Fabry-Perot etalon," *Electron. Lett.*, 27, pp. 1950-1951, 1991.
- [9] Y.C. Chung, "Temperature-tuned ZnS etalon fillters for WDM systems," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 4, pp. 600-602, 1992.
- [10] Y.C. Chung, R.M. Derosier, H.M. Presby, C.A. Burrus, Y. Akai, N. Masuda, "A 1.5 μ m laser package frequency-locked with a novel miniature discharge lamp," *IEEE Photonic. Tech. Lett.*, 3, pp. 841-844, 1991.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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 Tu3, San Jose, CA, USA, Feb. 2-7, 1992.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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 Tu6, San Jose, CA, USA, Feb. 2-7, 1992.
- [20] T. Kataoka, Y. Miyamoto, K. Hagimoto, K. Wakita, and I. Kotaka. "Ultrahigh-speed driverless MQW intensity modulator, and 20 Gbit/s, 100 km transmission experiments." *Electronic Lett.*, 28, pp. 897-898, 1992.
- [21] H. Taga, N. Edagawa, H. Tanaka, M. Suzuki, S. Yamamoto, H. Wakabayashi. "10Gbit/s, 9.00 km IM-DD transmission experiments using 274 Er-doped fiber amplifiers." *Digest of Optical Fiber Communication Conference*, paper PD1, San Jose, CA, USA, Feb. 21-26, 1993.
- [22] 이 창희, 정 태형. "극초단 펄스의 새로운 생성법과 그 응용." *대한전자공학회지*, 17, pp. 488-500, 1990.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] L.P.K. Wa, et. al., *Electron. Lett.*, 21, 26(1985).
- [26] M.N. Islam, C.E. Socolich, S.T. Ho, R.E. Slusher, W.S. Hobson, and A.F. J. Levi. *Opt. Lett.*, 16, 116(1991).
- [27] P. Ferro, M. Haelterman, S. Trillo, S. Wabnitz, and B. Daino. *Electron. Lett.*, 27, 1407(1991).
- [28] 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).
- [29] 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. 

筆者紹介



沈昌變

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 박사

1975年 2月 ~ 1982年 12月 국방과학연구소 선임연구원

1983年 3月 ~ 현재 한국전자통신연구소 책임연구원(광통신 연구실)

주관심분야 : 광통신 시스템 및 반도체 레이저 개발

- 565 Mbos 광전송 장치 개발

- 2.5 Gbps 광전송 장치 개발

- 10Gbps 광전송 장치 개발