

主題

테라비트급 DWDM 광전송 기술

주 무 정, 김 승 관, 한 진 수, 정 회 상, 장 순 혁, 이 종 현
(한국전자통신연구원 네트워크연구소)

차 례

- I. 서 론
- II. 대용량 WDM용 광선로
- III. WDM용 광대역 광증폭 기술
- IV. WDM 링링크 기술
- V. 결 론

I. 서 론

인터넷의 보급과 확산에 따른 급격한 트래픽 증가는 수백 Gb/s 이상의 대용량 기간 전송망 구축을 요구하고 있으며, xDSL 및 cable modem 등을 사용한 가입자 환경의 고속화를 뒷받침하기 위한 기간 전송로의 용량 증대는 테라비트급의 광통신 기술을 요구하고 있다. 일반적으로 대용량 시스템을 설치하는 것이 광선로를 추가 포설하고 시스템을 증설하는 것보다 경제적이므로, 하나의 광섬유에 대량의 정보를 전송하기 위한 다양한 기술이 개발되고 있다.

광통신 기술은 아직까지 intensity modulation/direct detection 기술에 기반을 두고 있으며, 전송 용량의 증대는 시분할 다중화(time division multiplexing : TDM) 기술을 사용한 전송 속도의 고속화 및 서로 다른 여러 파장을 사용한 파장분할 다중화(wavelength division multiplexing : WDM) 기술을 사용한 다채널화에 의존하고 있다. 현재 TDM 방식에서는 10Gb/s의 전송

속도가 상용화 되어있고 40Gb/s 전송 속도는 2~3년 내에 실용화 될 것으로 예상된다. WDM 방식에서는 채널당 10Gb/s의 전송 속도와 채널 간격 100GHz의 80채널급 시스템이 상용화 되었으며, 50GHz 채널 간격 및 160채널급 시스템 등 테라비트급 광전송 시스템도 실용화 단계에 있다.[1]

광섬유를 전송 매질로 사용하는 경우 대두되는 문제는 광섬유의 전송 손실과 신호 펄스의 분산 및 잡음의 누적이며, 각각 적절한 방법 및 기술을 사용하여 이러한 현상을 보상하거나 극복해야 한다. 전송 손실에 대한 대응책으로는 광증폭 및 저손실 광섬유가 개발되어 상용화 되었으며, 색분산의 경우 광대역 색분산 보상이 가능한 분산 보상 광섬유(dispersion compensating fiber : DCF)가 상용화 되었고, 고속 광전송에서의 편광분산 문제를 해결하기 위한 연구가 진행중이다. 증폭기의 잡음 누적에 대한 해결책으로는 저잡음의 광섬유 라만 증폭 기술(fiber Raman amplification : FRA)과 순방향 오류 정정 기술(forward error correction : FEC)이

사용되기 시작하였다. 비선형 광학 현상에 의한 누화(cross talk) 및 잡음 문제는 채널 수가 늘어나고 전송 출력이 증가함에 따라 문제가 되기 시작하고 있으며, 현상에 대한 분석과 해결 방안 연구가 진행중이다.

전송 속도의 증가는 사용하는 전자소자의 속도 한계를 극복해야 하고, 전송로에서의 색분산 및 편광 분산에 의한 페널티 증가, 수신기의 대역폭 확대에 따른 광학적 신호 대 잡음비(optical signal-to-noise ratio : OSNR) 증가 등으로 인한 전송 거리 단축 문제를 해결해야 한다. 다채널화를 위해서는 채널 간격을 줄이는 고밀도 파장분할 다중화(Dense-WDM : DWDM)와 전송 대역폭을 넓히는 광대역화 방법이 있으며, 각각 나름대로의 장단점과 해결해야 할 문제점들을 가지고 있다.

본 논문에서는 WDM 방식의 테라비트급 광전송에서의 문제점과 이를 해결하기 위한 연구 및 기술개발 동향을 소개한다.

현재 포설되어있는 대부분의 광섬유는 규소 유리(silica glass) 계열의 단일모드 광섬유(single-mode fiber : SMF)이다. 규소 유리 SMF의 특징으로는 투과대역이 1,310nm와 1,550nm에 존재하며 이 사이의 1,400nm 대역에서는 OH기의 흡수에 의한 손실이 크게 나타난다는 것과, 색분산이 1,310nm에서 영이 되고 이보다 장파장으로 갈수록 증가하는 양의 분산 값을 갖는다는 것이다. 1,550nm 대역을 적극적으로 사용하기 위하여 영분산 파장을 1,550nm 대역으로 이동시킨 분산전이 광섬유(dispersion shifted fiber : DSF) 및 비영분산 DSF(non-zero DSF : NZDSF) 등이 개발된 바 있으며, WDM 기술의 도입에 따라 다채널화에 따른 고출력 신호의 전송을 위해 광섬유 core의 직경(정확하게는 mode field diameter)을 키운 Truwave 및 LEAF 등의 광섬유가 개발되었고, 실리카 광섬유에서의 OH기 흡수를 제거함으로써 1,400nm 대역도 사용할 수 있도록 한 Allwave Fiber(Lucent)도 최근 소개되었다. 이러한 광섬유의 종류별 특징을 <표 1>에 비교 정리하였다.

II. 대용량 WDM용 광선로

표 1. 광섬유 종류별 특징

	SMF	TrueWave RS	LEAF
제조회사		Lucent	Corning
Aeff(um ²)	80	55	72
분산(ps/nm/km)	17 @1550	2.6~6.0 (1530~1565) 4.0~8.9 (1565~1625)	2.0~6.0 (1530~1565) 4.5~11.2 (1565~1625)
분산 기울기 (ps/nm ² /km)	0.08	0.05	0.057 (1530~1565) 0.1117 (1565~1625)
감쇄율 (dB/km)	< 0.23	< 0.25	< 0.25
PMD(ps/√km)	< 0.1	< 0.1	< 0.1

	SMF	TrueWave RS	LEAF
분산 보상 및 잔여분산 문제	<p>*일반적으로 80km 구간마다 DCF를 사용하여 보상함.</p> <p>*SMF와 DCF의 분산 기술기 차이에 의한 채널별 잔여분산 값이 달라 전체 대역을 몇 개로 나누어 보상하던가 채널마다 보상해야 하는 복잡함이 있음</p> <p>*증폭기마다 삽입되는 DCF의 손실에 의하여 잡음지수가 크다.</p>	<p>*분산값이 작아 3~4 구간에 하나 정도의 DCF를 이용하여 보상.</p> <p>*SMF+DCF 구조에 비하여 전체 분산 크기가 작으므로 채널간의 잔여분산 차이는 크지 않음.</p> <p>*몇 개의 증폭기에만 DCF를 사용함으로 잡음지수를 낮출 수 있다.</p>	<p>*분산값이 작아 3~4 구간에 하나 정도의 DCF를 이용하여 보상.</p> <p>*TrueWave에 비하여 L-band에서의 분산 기술기가 커서 채널별 잔여 분산 값의 차이가 SMF보다는 작고 TrueWave 보다는 크다.</p> <p>*몇 개의 증폭기에만 DCF를 사용함으로 잡음지수를 낮출 수 있다.</p>
비선형 현상	<p>*Effective Area가 크므로 광섬유 안에서의 power density가 낮아 비선형 효과가 적게 일어남.</p> <p>*분산의 크기가 커서 phase mismatch로 인하여 FWM이 적게 일어남.</p> <p>*Walk-off length가 짧아 XPM이 적음.</p>	<p>*Effective Area가 작아 power density가 높아지고 따라서 SMF에 비하여 비선형 현상이 잘 일어남.</p> <p>*분산의 크기가 작아서 phase match가 잘되므로 FWM이 SMF에 비해 잘 일어남.</p> <p>*Walk-off length가 길어 XPM이 일어나기 쉬움.</p>	<p>*Effective Area가 True Wave에 비하여 크고 비선형 현상이 적게 발생함.</p> <p>*분산의 크기가 작아서 phase match가 잘되므로 FWM이 SMF에 비해 잘 일어남.</p> <p>*Walk-off length가 길어 XPM이 일어나기 쉬움.</p>
채널당 광섬유 입력 파워 및 OSNR	<p>채널당 파워를 가장 크게 인가할 수 있으므로 전체 OSNR을 높일 수 있음.(DCF 때문에 증폭기의 잡음지수가 커지는 단점이 있음)</p>	<p>채널당 파워가 가장 낮으므로 OSNR 측면에서 불리함.(DCF 수요가 줄어 광증폭기의 잡음지수가 낮아지는 장점이 있음)</p>	<p>TrueWave보다 큰 파워를 인가할 수 있으므로 OSNR 측면에서 TrueWave보다 유리함.(DCF 수요가 줄어 광증폭기 잡음지수가 낮아지는 장점이 있음)</p>
DWMD에서의 차이	<p>다른 광섬유에 비하여 비선형 현상에 강하므로 채널 간격을 좁혀도 채널 파워를 키울 수 있어 링크에서의 OSNR 유지에 유리함.</p>	<p>채널 간격이 줄어들면 비선형 현상 때문에 가능한 채널 파워가 더 줄어들고, 따라서 OSNR 유지에 불리함.</p>	<p>채널 간격이 줄어들면 비선형 현상 때문에 채널파워가 낮아져서 OSNR 유지에 불리하나 TrueWave에 비해 다소 유리함.</p>
40 Gb/s 채널에서의 적용성	<p>40Gb/s는 분산에 민감하므로 정확한 보상이 필요함.</p> <p>장거리 전송의 경우에 잔여 분산 보상 방법이 복잡할 수 있음.</p>	<p>분산 기술기가 가장 낮아서 잔여 분산 보상에 가장 유리함.</p> <p>채널당 파워가 가장 낮으므로 OSNR 측면에서 불리함.</p>	<p>SMF 보다는 분산보상에 유리하지만 TrueWave 보다는 분산이 크고, 특히 L-band영역에서 분산기술기가 크므로 잔여분산 보상에 있어 SMF보다는 유리하고 TrueWave보다는 불리함.</p> <p>TrueWave보다는 채널당 파워가 크므로 OSNR 면에서 TrueWave보다 유리함.</p>

III. WDM용 광대역 광증폭 기술

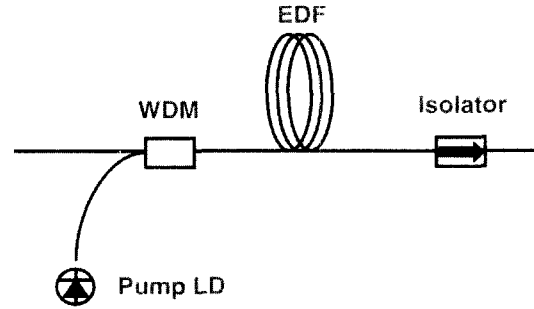
광증폭 기술은 WDM 기술의 실용화를 가능케 한 핵심 기술로서, 채널별 전송 속도 및 변조 방식에 상관없이 여러 개의 광 채널을 동시에 증폭 전송함으로써 실용적인 WDM 시스템을 구현할 수 있게 되었다. 대용량 WDM 광전송을 위한 광증폭 기술에서 주요 관심사항은 넓은 증폭 대역, 고출력, 저잡음 및 평탄이득, 이득 제어 및 안정화이다. 특히 어븀(Erbium)을 첨가한 실리카 유리 광섬유(Erbium-doped fiber)를 이득매질로 사용한 어븀 첨가 광섬유 광증폭기(Erbium-doped fiber amplifier : EDFA)는 증폭 대역이 1,550nm 부근이고 고출력 저잡음 및 낮은 편광 의존성 등으로 인하여 현재 가장 널리 사용되고 있다.

1. 광대역 WDM용 광증폭기

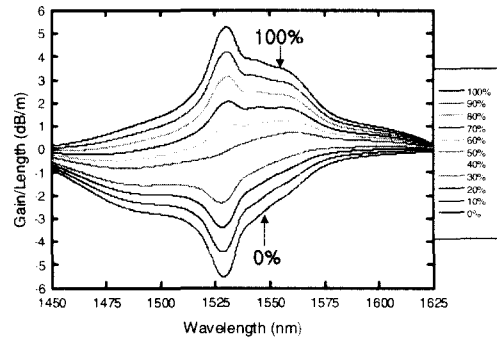
EDFA는 유도방출에 의한 광증폭(light amplification by stimulated emission of radiation : LASER) 현상을 이용한 것으로, 높은 에너지 준위로 여기된 Er^{3+} 이온이 기저상태로 천이하면서 방출하는 에너지로 입사광을 증폭시킨다. 이때, Er^{3+} 이온의 에너지 준위가 넓은 대역에 분포하여 있으므로 증폭 대역도 1,550nm 부근에서 넓게 나타난다. LASER의 원리상 EDFA의 출력에는 증폭된 자연방출광(amplified spontaneous emission : ASE) 성분이 포함되며, 이는 전송하는 신호의 성능을 저하시키는 잡음으로 작용한다.

EDFA의 기본적인 구성과 이득 특성은 (그림 1)과 같다. 이득매질 내의 Er^{3+} 이온을 높은 에너지 준위로 여기 시키기 위한 여기 광원으로는 980nm 혹은 1,480nm 파장의 반도체 레이저다이오드(Laser Diode : LD)가 사용된다. 광고립기(optical isolator)는 증폭되어 나온 빛이 반사되어 EDF로 다시 입사함으로써 증폭기의 성능이 저하되는 것을 방지하

기 위해서 필요하다. 실제 EDFA의 구조는 요구되는 출력이나 분산보상 및 출력 제어 등의 필요에 따라 여기광원의 수와 여기 방향 및 광 감쇄기 또는 분산보상 광섬유를 내장하는 등의 차이가 있다.



(a)



(b)

그림 1. EDFA의 기본 구성도(a) 및 EDF 내에서의 평균 밀도반전에 따른 파장별 단위 길이 당 이득(b)

일반적인 EDFA의 증폭 대역은 1,530nm~1,562nm(C-band)이며, 증폭 대역을 이보다 장파장 쪽으로 천이시킨 L-band EDFA의 경우 1,570nm~1,604nm에서 동작한다. L-band용 EDFA는 낮은 밀도반전 상태에서의 장파장 대역 이득을 이용한 것으로, 단위 길이당 이득이 C-band에 비해 낮으므로 긴 길이의 EDF를 필요로 한다.

EDFA의 출력은 WDM 광전송용의 경우 각 band 별로 23dBm 정도가 상용화 되어있으며,

CATV용 분배증폭기 등 고출력을 요하는 경우 25 dBm 이상도 가능하다. 이러한 고출력을 내기 위해서는 고출력의 여기광원을 필요로 하며, 980nm LD는 250mW 이상이 상용화 되어있고 1,480nm LD는 220mW 이상이 상용화 되어있다. 광원의 가격 및 소비 전력 면에서는 980nm LD가 유리한 반면, 양자 효율 및 고출력 면에서는 1,480nm LD가 유리하다. L-band EDFA의 경우 여기광의 파장이 장파장인 경우 효율이 더 높아지며, 1,540nm의 여기광을 사용한 경우[2] 및 C-band의 ASE를 적극적으로 이용한 구조의 EDFA[3]가 소개된 바 있다.

C-band 및 L-band EDFA를 사용하는 경우 1,560nm~1,570nm 사이의 transition band가 존재한다. Lucent Technologies사에서는 C/L-band 사이의 transition band를 0.5nm로 줄인 구성을 채택하여 실리카 EDFA 만으로 84.3nm의 증폭 대역을 갖는 광 증폭기를 개발하였고, 이를 사용하여 400km 전송 가능한 10Gb/s x 100채널 (C-band 50GHz 간격 60채널, L-band 100GHz 간격 40채널) WDM 시스템[4]을 발표한 바 있으며, transition band 없이 하나의 EDFA로 C/L-band 전대역을 증폭시킬 수 있도록 한 제품도 출시되고 있으나 상대적으로 출력이 낮다. 일본의 NTT 등에서는 tellurite-based EDF를 개발하여 C/L-band를 분리하지 않고 대역폭 확장을 꾀하기도 하였다[5].

더 넓은 파장대역을 확보하기 위하여 다른 파장 대역에서 동작하는 광증폭기에 대한 연구도 활발하다. 실리카 유리 이외의 다른 소재를 사용한 광섬유, 예를 들어 fluoride 광섬유나 tellurite 광섬유에 어븀을 첨가하여 기존의 EDF 보다 넓은 대역폭을 얻고자 하는 노력들도 진행되고 있다. Tellurite-based EDF에 대한 연구는 1996년 이후로 일본을 중심으로 활발해지기 시작하였다. 호스트 물질의 굴절률이 높으면 상대적으로 낮은 굴절률을 갖는 호스트에서보다 더 넓은 이득 대역을 얻을 가능성이 있으

며, 굴절률이 2가 넘는 tellurite 유리가 관심을 끌게 된 것은 바로 이러한 이유 때문이다. 소신호 이득 20dB 이상의 대역폭이 80nm 정도이고, 입력 신호의 증가에 의한 이득의 포화 현상에 의해 1,535nm~1,610nm 사이에서 이득 편차 1.5dB 이하의 평탄 이득을 갖는 tellurite-based EDFA가 NTT의 Mori 등에 의해 발표된 바 있다.[6]

현재 tellurite-based EDF는 일부 실험용 수준으로 상용화되어 판매되고 있기는 하지만, 실리카 EDF에 비하여 10배 이상 고가이며, 코어의 굴절률이 높아 일반 통신용 광섬유와의 접속시 저손실, 저반사를 위해 NA가 큰 광섬유를 버퍼로 사용하고 TEC (Thermally-diffused Expanded Core) 방법, tilted V-groove connection 방법 등을 사용하여야 하는 단점이 있다[7, 8].

어븀 이외의 다른 희토류 이온을 광섬유에 첨가함으로써 1,550nm 이외의 다른 대역용 광증폭기 개발 연구도 진행되고 있는 가운데, 현재 가장 유력시 되고 있는 두가지 물질이 Pr(praseodymium)과 Tm (thulium)이다. PDFA(Pr-doped fiber amplifier)는 1,310nm, T DFA(Tm-doped fiber amplifier)는 1,460nm와 1,650nm 대역의 광신호를 증폭시킬 수 있다.

PDFA는 1990년대 초부터 일본의 NTT에서 연구되기 시작하였다. PDFA의 경우 효율적인 동작 및 1,310nm 대역 동작을 위해서는 광섬유의 호스트 물질로서 phonon 에너지가 낮은 것을 사용해야 하며, 현재 가장 적합한 것은 InF₃-based fluoride 광섬유인 것으로 알려져 있다[9, 10]. PDFA 여기용 1,020nm 대역 고출력 LD 광원도 NTT의 Sugo, Tommyo 등에 의하여 개발되었다[11, 12]. PDFA의 소신호 이득 대역폭은 약 26nm (1,290nm~1,316nm)이며 이득 포화가 일어나는 경우 대역폭이 증가하여 -3dBm 입력시 약 33nm 이다.

한편, T DFA는 1,460nm 대역의 S+-band를

목표로 개발되어 왔으며, 이 또한 실리카 유리 광섬유에서보다는 fluoride 계열의 광섬유에서 효과적인 것으로 알려져 있다. Tm^{3+} 이온의 에너지 준위는 (그림 2)와 같다. 여기서의 문제점은 증폭 대역 천이의 위 준위인 3H_4 준위의 lifetime이 $1.7\mu s$ 정도로, 아래 준위인 3F_4 준위의 lifetime $11ms$ 보다 짧아 밀도 반전이 이루어지기 어렵다는 점이다[13]. 따라서 아래 준위의 전자들을 효과적으로 없앨 수 있는 방법이 요구된다. 또 다른 문제점은 펌핑 대역인 3H_4 와 3H_6 사이의 천이에 의한 $800nm$ 대역의 ASE가 효율을 감소시킨다는 사실이다. 이 가운데 첫번째 문제점은 광섬유에 다른 이온을 첨가시켜 각 에너지 준위의 lifetime을 변화시켜 주거나 (그림 2)에서와 같이 $1,040nm \sim 1,060nm$ 파장 대역의 upconversion 펌핑(또는 2-stage 펌핑)으로 해결할 수 있다.

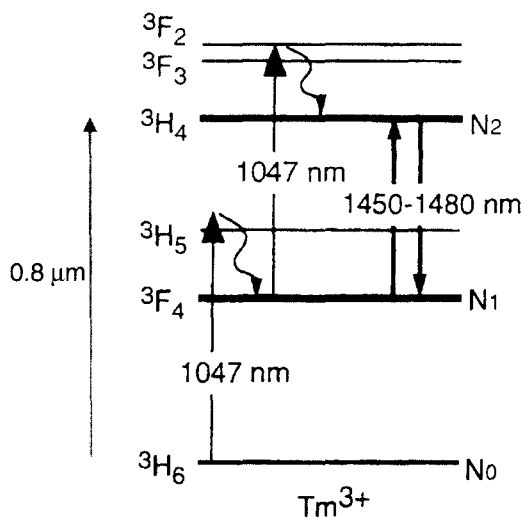


그림 2. Tm 이온의 에너지 준위도[14]

TDFFA는 $1,460nm$ 대역 뿐 아니라 $1,200nm$ 대역($^3H_6 \rightarrow ^3H_5$)의 여기에 의해 $1,600 \sim 2,000nm$ 대역($^3F_4 \rightarrow ^3H_6$) 신호 또한 증폭시킬 수 있다. 이 대역 역시 ASE의 증가로 말미암아 효율적인 증폭을 얻기 위해서는 Tb (terbium)과 같은 이온을 첨가해

주어야 한다[15].

광섬유 라만 증폭기(FRA)는 과거 1970년대 초에 연구가 시작되어 1980년대에 이르러 광통신에 증폭기의 필요성이 대두되면서 활발한 연구가 진행되었으나 1980년대 중반 이후 EDFA의 출현으로 잠시 광증폭기 연구의 중심에서 밀려났었다. 당시 가장 큰 단점으로 지적된 것은 고출력 여기광원의 필요성이었다. 그러나 1990년대 초반 고출력 광섬유 라만 레이저가 등장하면서 보다 실용적인 FRA가 가능하게 되었고, EDFA의 한계가 가시화 됨에 따라 다시금 FRA에 대한 관심이 증가하게 되었다[16]. FRA의 가장 큰 장점은 적당한 파장의 고출력 여기 광원만 있으면 기존의 전송용 광섬유를 사용하여 어느 대역에서나 광 증폭이 가능하다는 것이다. 이러한 특징은 기 포설된 광선로를 증폭 매질로 사용하는 distributed amplifier를 가능하게 하여 EDFA 출력에 여유 분을 제공함으로써 광 링크의 설계를 용이하게 하거나 증폭기 사이의 간격을 크게 하여 증폭기의 개수를 줄임으로써 그 비용을 절감시킬 수 있게 한다[17].

Distributed FRA의 경우 여기광원이 동작하지 않을 경우에도 부가적인 손실이 없으며, 분포형 이득이 가능하고 잡음이 작다는 등의 장점이 있다. 다채널 WDM 전송에서 전송로를 distributed FRA로 이용하는 경우 $4 \sim 5dB$ 의 OSNR 향상이 있으며[18], 이로 인해 스패 거리의 증가가 가능하게 되어 장거리 전송 또는 같은 전송 거리 내의 증폭기 수의 감소 효과를 기대할 수 있다. 반면, 충분한 이득을 얻기 위해 필요한 광섬유의 길이가 EDF에 비하여 100배 이상 되고, 고출력 여기 광원이 필요하며, 여기광과 신호광 사이의 cross talk, double Rayleigh 산란에 의한 잡음 등이 발생하는 단점이 있다.

일반적으로 FRA에서는 펌프광과 신호광 사이의 cross talk을 줄이기 위해 역방향 펌핑을 사용하는 것이 유리한 것으로 알려져 있으며, [19] 실리카 광섬

유에서의 라만 광증폭은 여기광원의 파장에 대하여 13.5THz만큼 이동된 주파수에서 40THz에 이르는 매우 넓은 범위의 이득을 나타낸다. 이득 매질로 실리콘 광섬유를 사용하면 기존 광섬유와의 접합성이 매우 뛰어나므로 TDFA나 PDFA에서와 같은 문제가 없어서, 적절한 여기광원이 확보될 경우 1,400nm~1,500 nm 대역의 S-band용 광증폭기로의 사용도 고려할 수 있다.

FRA용 여기광원으로는 고출력 LD로 펌핑한 double cladding Yb 첨가 광섬유 레이저를 사용하여 펌핑시킨 cascade 광섬유 라만 레이저[20], 또는 EDFA 여기용 고출력 LD로부터 발전한 1,450nm 대역 LD를 파장별로 여러 개 복합한 구조가 사용된다.

FRA는 단독으로 사용되기도 하지만 EDFA와 병행하여 사용함으로써 보다 넓은 대역폭을 갖는 혼합형 광증폭기 구조[21], 또는 분산 보상용 DCF의 삽입 손실을 보상하기 위한 역할에도 사용되고 있다.[22-24]

2. 광증폭기 제어

EDFA를 포함한 다채널 WDM 광증폭기의 파장별 이득 특성은 평탄하지 않으므로 적절한 방법을 사용하여 각 채널별 이득을 동일한 수준으로 맞춰주어야 한다. 대개는 이득 특성과 반대되는 투과 특성을 갖는 필터를 사용하여 채널별 이득을 동일하게 조절하며, 최근 필터의 특성을 가변시킬 수 있는 능동형 이득동화 필터가 개발되고 있다. 이는 장거리 다단 증폭 전송 광링크에서 광증폭기의 이득 불균일에 의한 채널별 이득 편차 누적에 따른 채널별 출력 및 OSNR의 불균형으로 인한 전송 거리 제한을 해결하기 위한 정밀 이득 동화에 필요한 기술이다.

다채널 WDM 광링크에서 채널 add/drop 등 구성 변화에 따른 채널 수 변동과 선로의 손실 변동은 광증폭기 입력 신호의 세기 변동을 초래하며, 이 경

우 광증폭기는 이득 및 출력이 변할 뿐 아니라 과도 현상에 의한 출력 변동을 겪게 된다. 이는 증폭기를 거치면서 더욱 증폭되어 여러 구간을 지난 후에는 정상적인 서비스가 불가능하게 될 수 있으므로 적절한 수준 이하로 제어되어야 하며, 이러한 현상에 대한 다양한 분석이 이루어지고 있다.[25] 일반적으로 다채널 전송용 광증폭기는 이러한 제어기능을 수행하기 위하여 2단 이상의 구조로 되어있으며, 입출력 광신호 감시 및 이에 따른 여기광 제어기능과 입력 신호 세기 조절을 위한 가변 광감쇄기 및 이득 등화 필터, 분산보상용 DCF 등을 포함하고 있다.

IV. WDM 광링크 기술

광링크 기술의 목적은 대용량의 광신호를 장거리 전송하는 것이며, 이러한 목적을 이루기 위해서는 광원부터 변조기, 다중화기, 광증폭기, 광선로, 역다중화기, 수신기에 이르는 시스템 전반과 변조 방식 및 오류 정정 기술까지 광통신 전반에 걸친 최적화가 요구된다.

현재 테라비트급 WDM 광전송 시스템에 사용되는 광원은 DFB-LD이며, 파장 안정화를 위한 wavelength-locker나 전류 및 온도 안정화 기능이 사용된다. 변조기는 장거리 전송용으로 13dB 정도의 소광비를 갖는 Mach-Zehender형 LiNbO₃ 변조기가 사용되며, 단거리 metro용으로는 크기가 작고 저렴한 integrated type의 electro-absorbtion 변조기가 사용된다. 다채널 다중/역다중용 소자는 40채널 급의 격자형 도파로(arrayed waveguide grating : AWG)소자가 주종을 이루고 있다.

광증폭 전송에서 가장 큰 영향을 미치는 잡음 요소는 EDFA의 ASE이다. EDFA를 거쳐 증폭되는 광신호는 ASE의 누적으로 인해 OSNR이 열화되는데 이를 잡음지수(Noise Figure : NF)로 표시한다.

일반적인 EDFA의 NF는 5~8dB 정도이며, (그림 3)과 같이 증폭기의 NF 및 증폭기 수에 따른 OSNR의 열화로 인하여 전송거리가 제한된다.

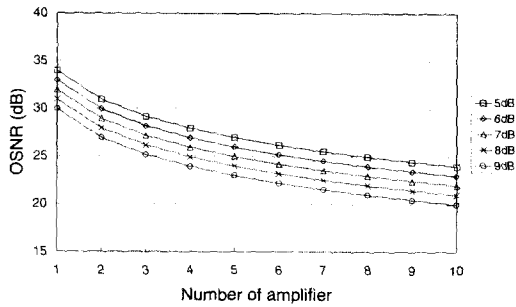


그림 3. 증폭기의 잡음지수 및 증폭기 갯수에 따른 OSNR의 변화 예.

WDM 광링크에서 다채널화에 따른 또 한가지 문제는 전송 광신호의 출력 증가이다. 채널 수가 증가함에 따라 전송로의 광파워는 채널당 광 파워 x 채널 수가 되며, 테라비트급 WDM 광전송에서는 광증폭기 출력단에서의 광세기가 200 ~ 400mW (23~26dBm)을 넘게 되고 광섬유 core 부분에서의 광 세기 밀도(power density)는 250~500kW/cm²에 달한다.

이러한 고출력을 내는 EDFA의 제작은 비실용적 일뿐더러 비선형 광학 현상에 의한 문제가 일어날 수 있으므로 라만 광증폭에 의한 선로 손실 저감을 고려할 필요가 있다.

Distributed FRA와 NF가 7dB인 EDFA를 사용한 hybrid 광증폭 전송에서, 전송 선로의 라만 이득에 따른 OSNR의 변화는 그림 4와 같다. 그림

3과 비교하여 OSNR이 개선됨을 볼 수 있다.

따라서, 장거리 대용량 WDM 광전송의 경우 distributed FRA의 사용은 거의 표준 방식으로 자리잡고 있다.

광선로에서의 분산은 모드 분산과 색분산(chromatic dispersion), 편광모드 분산(polarization mode dispersion : PMD)으로 나눌 수 있으며, 이들 중 모드 분산은 SMF에서는 하나의 모드만 허용되므로 나타나지 않는다.

색분산은 그림 5와 같이 파장별로 분산 값이 다르기 때문에 전송되는 광 펄스가 퍼지는 현상으로, 분산 값이 반대가 되는 DCF를 사용하여 보상할 수 있으나, 다채널 WDM 전송의 경우 전 채널을 동일하게 보상할 수 없음으로 인하여 나타나는 채널별 잔여 분산(그림 6)이 전송 성능에 나쁜 영향을 주게 되므로 이를 보상하기 위한 잔여 분산 보상 기술 및 넓은 파장 대역에 걸쳐 정밀한 분산 보상을 할 수 있는 DCF의 개발이 진행되고 있다.

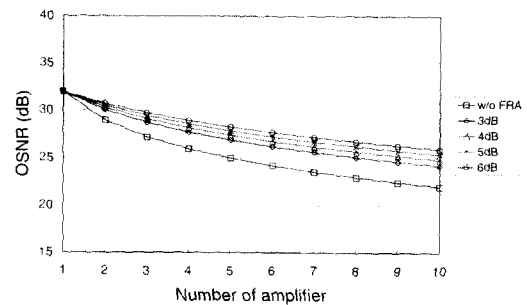


그림 4. 전송로의 라만 증폭 이득에 따른 OSNR의 변화 (EDFA의 NF는 7dB인 경우).

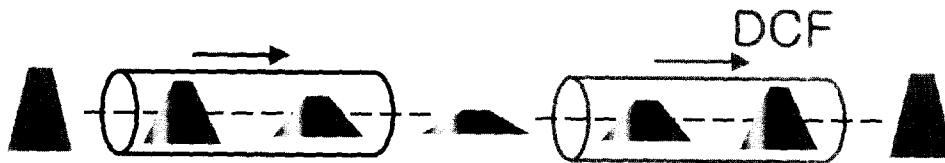


그림 5. 색분산에 의한 펄스의 퍼짐 및 DCF를 이용한 분산 보상

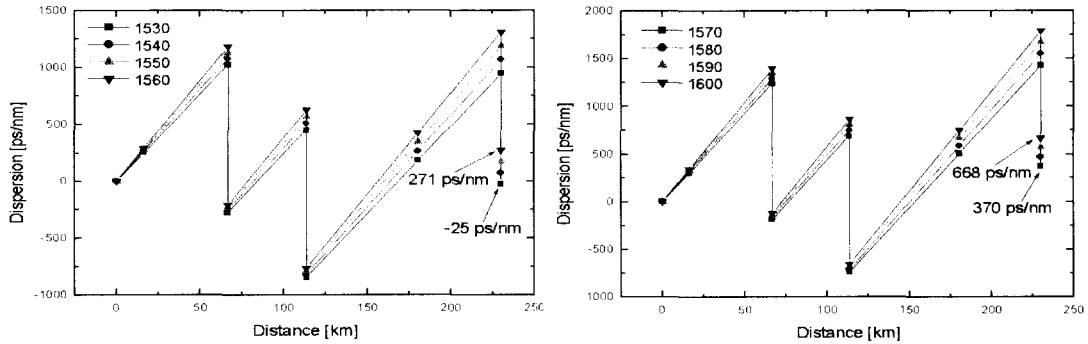


그림 6. 분산 보상된 다채널 WDM 전송에서의 채널별 잔여분산 발생 예 [26]

PMD는 불완전한 광섬유의 대칭성(타원형 단면) 및 광섬유에 가해지는 응력과 굽힘(bending) 등에 의해 유기되는 복굴절에 의한 편광모드별 분산의 차이에 의해 유도되는 것으로, 환경 변화에 따라 예측이 불가능하게 변화하는 특성을 가지며 40Gb/s 이상의 속도를 갖는 광채널 수용시 문제가 되고 있다. 이에 대한 내용은 본지의 “40Gb/s ETDM 광전송 기술”에서 자세히 언급하였다.

다채널 WDM 광링크에서 나타나는 비선형 현상으로는 4광파 혼합(four-wave mixing : FWM) 및 자기위상변조(self phase modulation : SPM), 상호위상변조(cross phase modulation : XPM), stimulated Raman scattering (SRS) 등이 있다.

FWM은 그림 7에서와 같이 인접한 2개 채널 주파수의 합과 차에 해당하는 새로운 주파수의 신호가 만들어지는 현상으로, 대부분의 WDM 시스템에서는 ITU-T 권고안 G.692dp 따른 등간격 채널을 사용하고 있으므로, FWM이 발생할 경우 인접 채널에 누화를 발생시킨다. 따라서, 각 채널의 광 세기는 FWM이 발생하지 않는 수준 이하로 억제되어야 한다.

SPM과 XPM은 각각 그림 8 및 그림 9에서와 같이 매질 내를 진행하는 광펄스의 상승부(rising edge)와 하강부(falling edge)의 세기 변화가 일

키는 매질의 굴절율 변화에 의해 자기 자신 또는 다른 광펄스의 광경로 변동에 의한 위상(또는 주파수)변동을 일으키는 것으로, 이는 색분산과 연계되어 펄스의 왜곡을 초래한다.

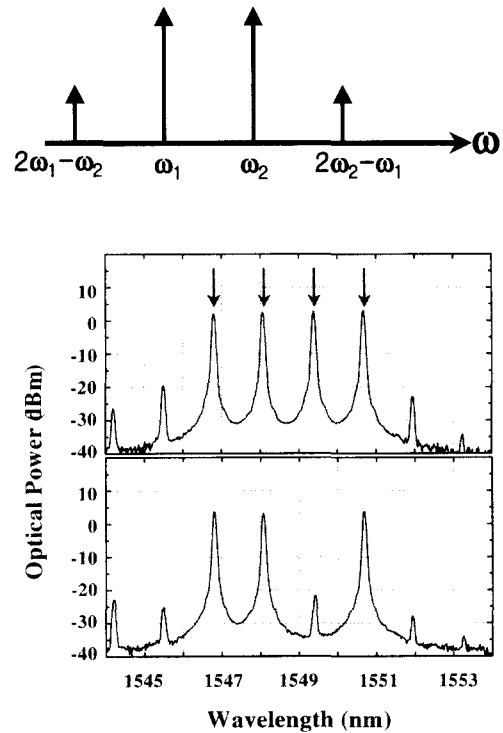


그림 7. 4광파 혼합에 의한 잡음 생성과 등간격 채널 설정에서 인접 채널에 미치는 영향

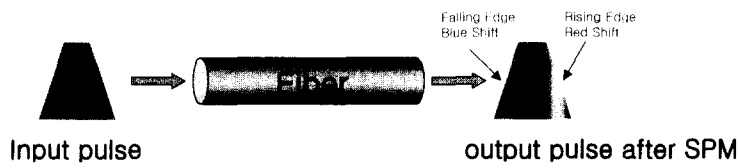


그림 8. 자기 위상 변조(self phase modulation)

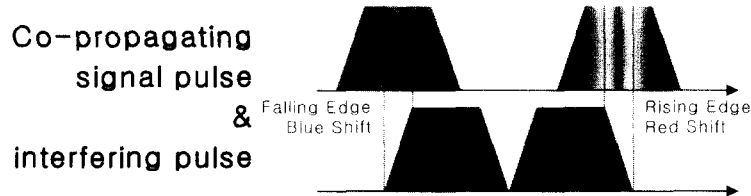


그림 9. 상호 위상 변조(cross phase modulation)

SRS는 Raman 광증폭과 마찬가지로 매질 내의 optical phonon과 photon의 interaction에 의해 일어나며, 그림 10 및 그림 11과 같이 단파장의 에너지가 장파장쪽으로 전이됨에 따른 채널간 출력의 불균형 및 누화가 발생하는 원인이 된다. 이는 특히

에 Rayleigh scattering된 빛 또한 증폭되게 되어 그림 12에서와 같이 선로 전 범위에 걸쳐 발생하는 double Rayleigh scattering은 전송 특성을 악화시킬 수 있다.

기 운용되고 있는 링크의 용량 확장을 위해 다른 대역의 채널을 증설하는 경우 기존 대역에서의 채널별 균일성을 저하시키는 원인이 되기 때문에 유의해야 한다.

Raman 광증폭기를 사용하는 광링크에서 발생하는 잡음으로는 double Rayleigh scattering이 있다. Rayleigh scattering은 어디서나 발생하는 것이지만, Raman 광증폭기의 길이가 매우 길고 이득이 있기 때문

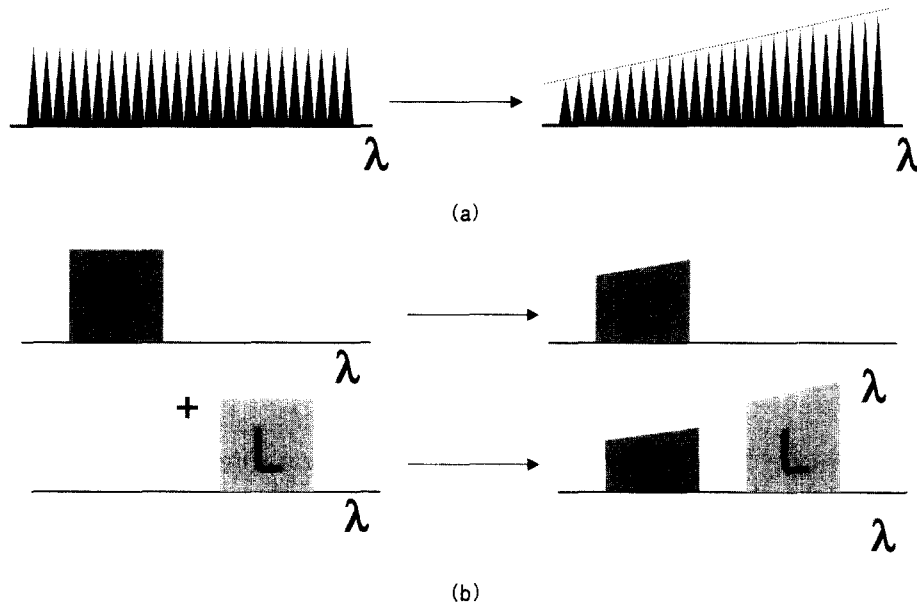


그림 10. SRS에 의한 다채널 WDM 광링크에서의 채널간 출력 변동
(a) 동일 band 내에서의 SRS 효과, (b) C/L-band 간 SRS에 의한 출력 변동 효과

WDM 광전송에서 채널 수가 증가하고 채널 간격이 좁아짐에 따라 발생하는 이러한 영향을 줄이기 위해 인접 채널간 편광 방향을 수직으로 배열하는 방법이나 양방향 광전송 및 새로운 변조 방식 등이 실험되고 있으나, 이에 필요한 부품 및 기술의 미성숙과 이로 인해 새로이 나타나는 문제점 등 해결해야 할 것이 많아, 아직 실용화 단계에는 이르지 못하고 있다.

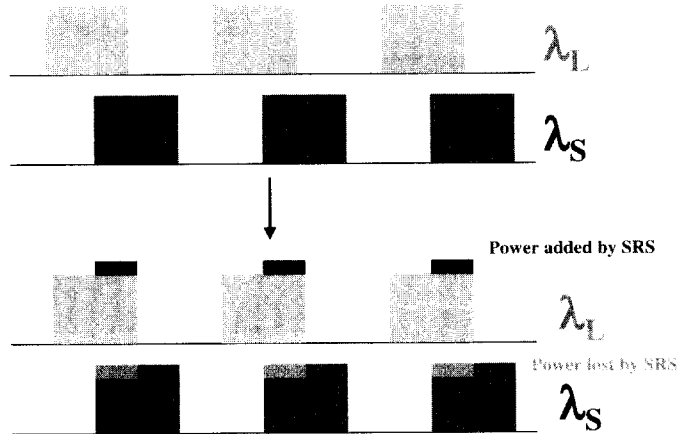


그림 11. SRS에 의한 채널간 누화, λ_L : 장파장 채널, λ_S : 단파장 채널

V. 결론

테라비트 이상의 전송 용량을 갖는 WDM 광전송 시스템 구현에 필요한 기술 중 물리적 광링크 구성에 필요한 기술을 대상으로 연구 동향 및 문제점들을 검토하였다. 테라비트급 WDM 광전송 시스템의 구현은 현 수준의 기술로 가능하며, 사용자의 요구사항에 맞추어 얼마나 경제적으로 신뢰성 있게 구축할 수 있는가 하는 것이 기술력을 가름하는 기준이 되고 있다. 이 이상의 10테라비트급 WDM 광전송 시스템 구현을 위해서는 여러 가지 물리적 한계에 도전하는 연구 개발이 필요하며, 새로운 소재와 방법에 대한 폭 넓은 접근이 필요하다.

※참고문헌

[1] K. Nakagawa, "Progress in Optical Amplifiers and the Future of Optical Communications Systems," Technical Digest of 10th Optical Amplifiers and Their Applications (Nara, Japan, 1999), p.2 - 5 (paper WA1).

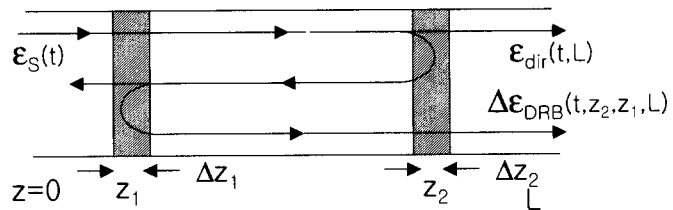


그림 12. Double Rayleigh scattering의 발생

[2] Bo-Hun Choi, Moo-Jung Chu, Hyo-Hoon Park, and Jong-Hyun Lee, "Performances of Erbium-Doped Fiber Amplifier Using 1530nm-Band Pump for Long Wavelength Multichannel Amplification," ETRI Journal, 23 (1), 1 - 8 (2001).

[3] 오정미, 최현범, 이동한, 이상배, 안성준, 박병석, "간단한 구조의 저가형 L-band EDFA," Technical Digest of Photonic Conference 2001(설악 한화리조트, 대한민국, 2001), p.83 - 84 (T2B6).

[4] A. K. Srivastava, et. al., "1Tb/s Transmission of 100 WDM 10Gb/s Channels Over 400 km of TrueWave™ Fiber,"

- Technical Digest of OFC'98 (San Jose, California, USA, 1998), paper PD10.
- [5] M. Yamada, et. al., "Gain-flattened tellurite-based EDFA with a flat amplification bandwidth of 76 nm," Technical Digest of OFC'98 (San Jose, California, USA, 1998), paper PD7.
- [6] A. Mori, et. al., "1.5 mm broadband amplification by tellurite-based EDFAs," OFC'97 (Dallas, Texas, USA, 1997), paper PD1.
- [7] M. Yamada, et. al., "Low-noise gain-flattened Er³⁺-doped tellurite fiber amplifier," OSA Trends in Optics and Photonics series, vol. 25 (OAA'98 in Vail, Colorado, USA, 1998), p. 86 - 89.
- [8] Company catalogues of Thorlabs and NEL (1999).
- [9] A. Mori, et. al., "Ultra-broadband amplification for DWDM systems," ECOC'99 (Nice, France, 1999), I-260 - I-263.
- [10] Y. Nishida, et. al., "Development of an efficient praseodymium-doped fiber amplifier," IEEE J. of Quantum Electron. 34 (8), 1332 - 1339 (1998).
- [11] M. Sugo, et. al., "Development of 1.02 mm pump laser diodes," OSA Trends in Optics and Photonics Series on OAA'96 (Monterey, CA, USA, 1996), vol. 5, p. 101 - 104.
- [12] J. Temmyo, et. al., "A 310-mW fiber coupled, wavelength-stabilized 1.016 μ m InGaAs quantum well laser using a fiber Bragg grating," CLEO'96 (Anaheim, CA, USA, 1996), paper CTuT6.
- [13] T. Sakamoto, et. al., "Thulium-doped fluoride fiber amplifiers for 1.4 μ m and 1.6 μ m operation," OSA Trends in Optics and Photonics Series on OAA'96 (Monterey, CA, USA, 1996), vol. 5, p. 105 - 115.
- [14] T. Sakamoto, et. al., "Gain-equalized thulium-doped fiber amplifiers for 1460 nm-band WDM signals," Technical Digest of OAA'99 (Nara, Japan, 1999), paper WD2.
- [15] T. Sakamoto, et. al., "Thulium-doped fluoride fiber amplifiers for 1.4 μ m and 1.6 μ m operation," OSA Trends in Optics and Photonics Series on OAA'96 (Monterey, CA, USA, 1996), vol. 5, p. 105 - 115.
- [16] E. M. Dianov, "Raman fiber amplifiers," Technical Digest of 10th Optical Amplifiers and Their Applications (Nara, Japan, 1999), p. 68 - 71 (paper ThA1).
- [17] A. K. Srivastava, et. al., "System Margin Enhancement with Raman Gain in Multi-Span WDM Transmission," Technical Digest of OFC'99 (San Diego, California, USA, 1999), p. 53 - 55 (paper FC2).
- [18] A. K. Srivastava, et. al., "System Margin Enhancement with Raman Gain in Multi-Span WDM Transmission," Technical Digest of OFC'99 (San Diego, California, USA, 1999), p. 53 - 55 (paper FC2).
- [19] F. Forghieri, et. al., "Bandwidth of

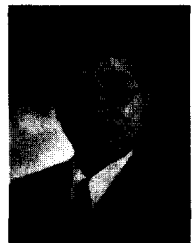
- cross talk in Raman amplifiers." Technical Digest of OFC'94, paper FC6, 294 - 295.
- [20] K. Rottwitt and H. D. Kidorf, "A 92nm Bandwidth Raman Amplifier," Technical Digest of OFC'98 (San Jose, California, USA, 1998), paper PD6.
- [21] H. Masuda, "Review of wideband hybrid amplifiers," OFC2000(Baltimore, Maryland, USA, 2000), paper TuA1.
- [22] Y. Emori, et. al., "Broadband lossless DCF using Raman amplification pumped by multichannel WDM laser diodes," Electron. Lett. 34 (22), 2145 - 2146 (1998).
- [23] P. B. Hansen, et. al., "Raman amplification for loss compensation in dispersion compensating fibre modules," Electron. Lett. 34 (11), 1136 - 1137 (1998).
- [24] S. A. E. Lewis, et. al., "Low-noise high gain dispersion compensating broadband Raman amplifier," OFC2000(Baltimore, Maryland, USA, 2000), paper TuA2.
- [25] 이정찬, 정희상, 주무정, "Wavelength dependent transient effects of L-band EDFA for multi-channel add and drop" Technical Digest of Photonics Conference 2001(설악 한화리조트, 대한민국, 2001), p.75 - 76 (T2B2).
- [26] 한진수, 이정찬, 정희상, 주무정, 박 혁, 김봉규, 김광준, 이종현, 윤경모, 이용기, "광대역 C/L-band EDFA를 이용한 640Gb/s

WDM 시스템 개발 및 현장시험," SK Telecomm Rev., v. 11, no. 2, 187-201 (2001).



주 무 정

1976년-1980년 연세대학교 이과대학 물리학과(이학사), 1980년-1982년 한국과학기술원 물리학과(이학석사), 1982년-1985년 한국과학기술원 물리학과(이학박사), 1989년 독일 Heinrich-Hertz-Institut 방문연구원, 1992년-1994년 전북대학교 물리학과 겸임교수(연구교수), 1985년-1994년 : 한국전자통신연구원 선임연구원, 1994년-현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원, 1997년-1998년 : 한국전자통신연구원 광통신연구실장, 2000년-현재 : 한국전자통신연구원 WDM광링크기술팀장, <주관심분야> 광증폭 기술, 파장분할 다중화 광통신 기술, 비선형 광학



김 승 관

1987년-1991년 서울대학교 자연과학대학 물리학과(이학사), 1991년-1992년 한국과학기술원 물리학과(이학석사), 1992년-1997년 한국과학기술원 물리학과(이학박사), 1997년-1999년 한국과학기술원 자연과학연구소 선임연구원, 1997년-1998년 University of Strathclyde (Glasgow, Scotland, UK), Electronic & Electrical Eng. Dept., Optoelectronics Division, 객원연구원, 1999년-현재 한국전자통신연구원 선임연구원, <주관심분야> 광섬유 증폭기, 광섬유 레이저, 광섬유 센서, 광섬유 소자 등



한진수

1991년-1998년 연세대학교 전자공학과(공학사), 1998년-2000년 한국과학기술원 전자공학과(공학석사), 2000년- 현재 한국전자통신연구원, 연구원, <주관심분야> 광통신 시스템, 파장분할다중화 광전송 기술, 광네트

워크



장순혁

1990년-1994년 한국과학기술원 물리학과(이학사), 1994년-1996년 한국과학기술원 물리학과(이학석사), 1996년-2000년 한국과학기술원 물리학과(이학박사), 2000년-현재 한국전자통신연구원 선임연구원, <주관심분야> WDM 광통신

시스템, 광섬유 리만 증폭기, EDFA



정희상

1987년-1993년 한국과학기술원 물리학과 (이학사), 1993년-1995년 충남대학교 물리학과(이학석사), 1995년-1999년 충남대학교 물리학과(이학박사), 1999년-현재 한국전자통신연구원 선임연구원, <주관심분야> 광증폭기, 파장

분할 다중화 광전송 기술



이종현

1977년-1981년 성균관대학교 전자공학과(공학사), 1981년-1983년 성균관대학교 전자공학과(공학석사), 1989년-1992년 성균관대학교 전자공학과(공학박사), 1983년-현재 : 한국전자통신연구원 광통신연구 부장, 1991년 : 전기통신 기술사, <주관심분야> 광인터넷 기술, 광통신기술, 광전달망 기술