

차세대 광통신을 위한 광증폭기 기술

鄭 允 喆

韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

I. 서 론

광섬유는 현재 해저 케이블을 비롯한 장거리 전송부분부터 각 가입자에게 정보를 제공하는 분배망에 이르기까지 특별한 경우를 제외한 통신의 모든 분야에서 최상의 전송매체로서 널리 사용되고 있다. 이는 물론 광섬유가 타의 추종을 불허하는 전송용량과 경제성을 갖고 있기 때문이다. 따라서, 현재 세계 각국에서는 보다 많은 광섬유를 포설하여 21세기 정보화시대를 구현하기 위한 각종 계획들을 추진하고 있다.

1975년 미국 AT&T사에서 세계 최초의 광섬유를 이용한 45Mb/s급 전송 시스템이 개발된 이래 지난 20년 동안 광통신 기술은 실로 엄청난 발전을 거듭하여 현재 10Gb/s급의 전송 시스템이 상용화 되기 직전에 있다. 따라서, 광통신 기술의 전송용량은 매해 10배 이상씩 증가하여 왔다고 하겠다. 이렇게 급속히 발전하여 온 광통신 기술은 최근 광증폭기의 실용화와 함께 또 다시 커다란 변화를 맞이하게 되었다. 광증폭기는 광전변환 없이 광신호를 증폭함으로써 광섬유의 전송손실(fiber loss)이나 분배망의 분할손실(splitting loss)을 쉽게 보상할 수 있다. 이는 광증폭기를 사용하여 기존의 복잡한 광전 재생중계기(opto-electronic repeater)를 대체할 수 있음을 뜻한다. 광전 재생중계기는 광신호의 검파, 전기신호의 증폭 및 신호처리, 송신 레이저의 구동 등을 위하여 여러 종류의 광소자 및 전자소자들로 구성되어 있다. 따라서, 선로가 고속화 함에 따라 각종 고속 광소자 및 전자소자들이 필요하게 되어 제작의 어려움이 증가한다. 반면, 광증폭기를 사용하여 구성된 광선로는 광섬유의 전송손실이 없는 것과 같으므로 투명하다(optically transparent)고 할 수 있다. 이러한 광선로는 송수신기의 전송속도와 무관하여 전송속도가 증가하더라도 중계기들을 교체할 필요가 없다. 또한, 파장분할다중화(WDM : Wavelength-Division-Multiplexed)된 여러 개의 광신호를 간단히 수용할 수 있으므로 광섬유당 전송용량을 크게 증가시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 광증폭기는 통

신망의 기능과 신뢰도를 향상시키고, 보다 유연한 운영을 가능하게 할 것이다.

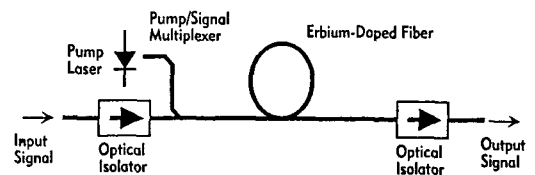
광증폭기는 크게 나누어 반도체 증폭기(semiconductor amplifier)와 광섬유 증폭기(fiber amplifier)로 분류할 수 있다. 반도체를 이용한 광증폭기는 크기가 작으며, 다른 광전회로들과 함께 집적될 수 있고, 간단히 전류를 인가하여 구동(direct injection pumping)할 수 있다는 장점이 있으나, 삽입손실(coupling loss)과 편광감도(polarization sensitivity)가 크고, 이득포화(gain saturation)나 비선형 효과로 인하여 신호누화(crosstalk)가 발생하는 등의 어려움이 있어 최근에는 주로 파장변환(wavelength conversion)과 같은 연구에 국한되어 사용되고 있다. 광섬유 증폭기는 광섬유의 비선형 효과를 이용한 증폭기(nonlinear fiber amplifier)와 희토류 금속이 첨가된 광섬유를 이용한 증폭기(rare-earth doped fiber amplifier)로 분류된다. 비선형 광섬유 증폭기는 유도 라만 산란 효과(stimulated Raman scattering), 유도 브릴루인 산란 효과(stimulated Brillouin scattering), 또는 매개 증폭 효과(parameteric amplification)를 이용하는 것이 있다. 비선형 광섬유 증폭기는 어느 파장의 신호도 증폭할 수 있다는 장점이 있으나, 편광감도가 매우 크며, 증폭을 위하여 필요한 펌프 레이저의 출력이 너무 높거나, 대역폭이 너무 좁거나, 파장분할다중화된 광신호를 증폭할 경우 신호누화가 발생하는 등의 문제점이 있어 아직 실용화의 단계에 이르지 못하였다. 희토류 첨가 광섬유 증폭기는 어비움(Er : erbium)이나 니오디미움(Nd : neodymium), 또는 프레시오디미움(Pr : praseodymium)과 같은 희토류 금속을 약간 첨가한 광섬유를 이용하여 구성한다. 이러한 증폭기들은 간단한 구조에도 불구하고 이득, 포화출력(saturated output power), 대역폭, 신호누화, 잡음지수, 편광감도, 삽입손실 등 여러가지 측면에서 바람직한 특성을 갖고 있다.

희토류 첨가 광섬유 증폭기는 1964년 Koester와 Snitzer가 니오디미움(Nd)을 첨가한 광섬유 증폭기를 제작함으로써 시작되었고, 1974년 Stone과 Burrus는 이러한 광섬유를 GaAs 레이저

로 펌프하여 소형 레이저를 제작한 바 있다^[1-2]. 그 후, 1984년에는 Payne 등이 각종 희토류 금속이 첨가된 저손실 광섬유를 현대식 방법(vapor-phase technique)으로 제작하여 많은 관심의 대상이 되었으며, 1986년과 1987년에는 Mears 등이 어비움(Er)이 첨가된 광섬유 레이저와 광섬유 증폭기를 각각 발표하였다^[3-6]. 어비움 첨가 광섬유 증폭기(EDFA : erbium-doped fiber amplifier)는 광섬유의 최저손실 파장인 1.55 μ m 부근에서 동작하므로 광통신을 위하여 특히 중요하다. 이러한 EDFA가 실용화될 수 있는 가능성을 보여준 것은 1988년 Snitzer 등이 1.49 μ m에서 동작하는 광원(tunable color center laser)으로 펌프된 EDFA를 발표하여 반도체 레이저가 효율적인 EDFA의 펌프광원(pump laser)으로 사용될 수 있다는 가능성을 제시한 것이다^[7]. 그 후 수년간 많은 연구를 통하여 EDFA의 성능이 크게 향상되었으며 지금은 EDFA를 사용한 광전송장치들이 상용화되기에 이르렀다. 본 논문에서는 이러한 EDFA에 관하여 중점적으로 살펴 보고자 한다.

II. EDFA의 기본 원리

EDFA의 기본 구조는 (그림 1)과 같다. EDFA는 소량의 어비움이 첨가되어 있는 광섬유(EDF : erbium-doped fiber)와 펌프 레이저, 그리고 입력된 광신호를 펌프 레이저와 결합하는 2색 커플러(dichroic coupler)와 같은 파장분할다중화기(wavelength-division-multiplexer)로 구성되어 있다. 많은 경우 광궤환(optical feedback)이나 발



〈그림 1〉 EDFA의 기본 구조

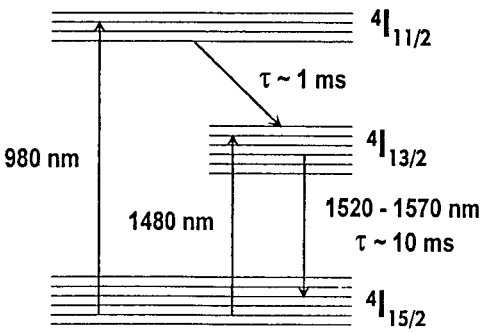
진(laser oscillation)을 방지하기 위하여 단향관(optical isolator)이 사용되기도 한다.

어비움은 단일모드 광섬유의 코어 부분에 소량(10-1000ppm) 첨가되었을 때 광섬유 유리를 구성하고 있는 산소와 결합하여 Er^{+3} 이온 상태로 존재한다. 이러한 상태의 Er^{+3} 이온들은 4f 전자들이 바깥쪽에 있는 5s와 5p 전자들에 의해 광섬유의 이온들로부터 차폐되어 있으므로 비교적 광섬유 유리(host glass)에 의한 영향을 받지 않고 어비움 자체의 원자적 특성을 그대로 유지할 수 있다. 이것은 희토류 금속들의 일반적인 특징이기도 하다. (그림 2)는 Er^{+3} 이온의 에너지 준위를 일부 나타낸 그림이다. ${}^4I_{13/2}$ 준위 ${}^4I_{15/2}$ 준위 사이의 전이는 광섬유의 최저 손실 영역인 $1.55\mu m$ 부근에 자리 하고 있으므로 광통신용 증폭기로 사용하기에 적합하다. 펌프 레이저를 이용하여 광학적으로 상준위(excited state : ${}^4I_{13/2}$ 준위)보다 높은 곳으로 에너지를 넣어 주면 안정상태(metastable state)인 상준위(${}^4I_{13/2}$)까지 빠른 속도로 비광학적 발산(nonradiative decay)한 뒤 하준위(ground state : ${}^4I_{15/2}$)로 유도방출(stimulated emission) 또는 자연방출(spontaneous emission)함으로써 $1.55\mu m$ 대역에서 광신호를 증폭할 수 있다. 따라서, EDFA는 3단 시스템(three-level system)으로 간주할 수 있다. 이것은 비교적 높은 펌프 임계값(pump threshold)이 필요하다는 것을 의미한다. 하지만, EDFA의 효율이 매우 높고, 단일모드 광섬유에서는 높은 빛의 강도(intensity)를 유지할 수 있으므로 크게 문제가 되지 않는다. $1.55\mu m$ 대역에서 광신호를 증폭하기 위해서는 어비움 이온이 흡수할 수 있는 514nm, 532nm, 667nm, 800nm, 980nm, 또는

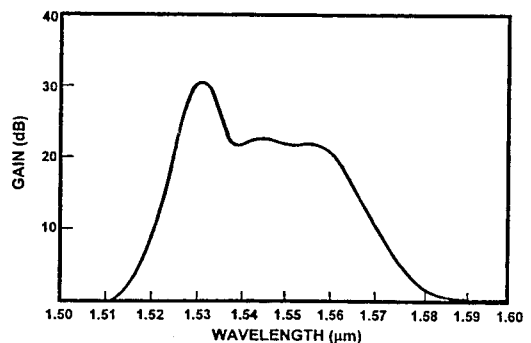
$1.48\mu m$ 대역에서 레이저를 사용하여 펌프하여야 한다. 하지만, 이 중에서 반도체 레이저를 사용할 수 있는 980nm 대역, 또는 $1.48\mu m$ 대역이 주로 사용되고 있다. 하지만, 어느 대역을 사용하는가에 따라 펌프의 효율이나 잡음지수와 같은 특성이 달라지며, 980nm 대역을 사용하는 경우 가장 특성이 우수하다^[8-9]. 800nm 대역에서는 AlGaAs 레이저와 같은 가격이 저렴하고 고출력인 반도체 레이저를 사용할 수 있지만 여기상태흡수효과(ESA : excited state absorption)로 인하여 효율이 많이 저하된다^[10].

III. EDFA의 특성

EDFA의 이득은 펌프 레이저를 사용하여 어비움 이온의 상준위(${}^4I_{13/2}$)와 하준위(${}^4I_{15/2}$)사이의 밀도 반전(population inversion)을 발생시킴으로써 얻어진다. 최대 이득은 어비움이 첨가된 광섬유의 길이나 펌프 레이저의 출력과 같은 동작조건이나 광섬유 유리의 종류에 따라 다를 수 있지만 주로 1530nm 부근에서 관측된다. (그림 3)은 전형적인 EDFA의 이득곡선(gain spectrum)을 보여 준다. 이 이득곡선은 1480nm에서 동작하고 출력이 70mW인 펌프 레이저와 50ppm의 어비움이 첨가되어 있는 40미터의 광섬유를 이용하여 측정되었다. 이 그림은 광신호의 파장이 1531nm일 때 최



〈그림 2〉 Er^{+3} 이온의 에너지 준위



〈그림 3〉 EDFA의 이득곡선

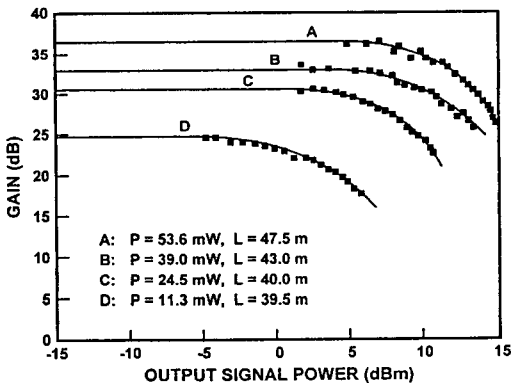
대 이득(38dB)을 얻을 수 있으며, 대역폭(이득이 3dB 감소하는 곳)은 7.5nm 가량 된다는 것을 보여 준다. 하지만, 20dB 이상의 이득을 얻을 수 있는 부분은 35nm(1525 nm부터 1560nm 사이) 이상이다. 특히, 1540nm부터 1560nm 사이의 상대적으로 평탄한 이득을 사용하면 파장분할다중화된 여러개의 신호가 같은 이득을 얻도록 할 수 있다.

광신호를 증폭하게 되면, 상준위의 밀도가 유도 방출에 의하여 낮아지게 되므로 이득도 따라서 낮아지게 된다. 이러한 현상을 이득포화(gain saturation)라고 부르며, 광증폭기로부터 얻을 수 있는 최대출력을 제한한다. (그림 4)는 1531nm에서 동작하는 광신호의 출력을 변화시키면서 EDFA의 이득을 측정한 것이다. 예상되는 바와 같이, 펌프 레이저의 출력이 고정되어 있다면, 광신호의 출력이 증가함에 따라 이득이 감소한다. 광증폭기의 이득이 3dB 감소했을 때의 출력을 포화출력(output saturation power)라고 한다. EDFA는 3단 시스템이므로 포화출력은 기본적으로 펌프 레이저의 출력에 비례한다. (그림 4)는 펌프 레이저의 출력이 증가함에 따라 EDFA의 이득과 포화출력이 함께 증가함을 보여 준다. 여기서, 어비움 첨가 광섬유의 길이는 펌프 레이저의 출력에 따라 최대 이득을 얻을 수 있도록 39.5미터에서 47.5미터까지 변화되었다. 이 그림은 펌프 레이저의 출력이 53.6mW 일 때 37dB의 이득을 얻을 수 있으며, 포화출력은 11dBm 이상이라는 것을 보여 준다. 이것은, 보통 광송신기의 출력은 0dBm 이하라는

점을 고려하면, EDFA를 후치증폭기(power amplifier or booster)로 사용하여 시스템 여유(system margin)를 10dB 이상 향상시킬 수 있음을 의미한다.

일반적으로 포화된 증폭기를 사용하면 신호의 왜곡(distortion)이나 부호간 간섭현상(intersymbol interference)이 발생하여 수신감도가 악화되고, 파장분할다중화된 신호의 경우 신호 누화가 발생할 수 있다. 이것은 포화된 증폭기의 동적특성(dynamic response) 때문이다. 반도체 증폭기의 경우 이득이 1ns 이내에 포화되고 회복되기 때문에 Gb/s 이상의 고속신호를 증폭할 경우 많은 왜곡이 발생한다. 반면, EDFA는 안정상태에 있는 상준위($^4I_{13/2}$)의 수명(lifetime)이 10ms 이상 이어서 이득이 포화되거나 회복되기 까지 수백 ms가 필요하다. 광통신이 주로 초고속 전송을 위하여 사용되고 있는 점을 고려하면 이러한 시간은 펄스 주기보다 매우 긴 시간이므로 왜곡이나 신호누화가 발생하지 않는다.

광증폭기를 사용하여 신호를 증폭하면 자연적으로 자연방출에 의한 잡음이 발생한다. 이것은 어비움 이온의 상준위($^4I_{13/2}$)로 부터 자연방출된 광자의 일부가 증폭기 내부에서 신호와 마찬가지로 증폭되기 때문이다. 이렇게 증폭된 자연방출을 ASE(amplified spontaneous emission)라고 부른다. 따라서, 증폭된 광신호를 수신하면, 기본적인 산탄잡음(shot noise)이나 수신기의 잡음(receiver noise) 뿐 아니라 ASE에 의한 산탄잡음, 신호와 자연방출의 비트 잡음(signal-spontaneous beat noise), 자연방출 사이의 비트 잡음(spontaneous-spontaneous beat noise)이 발생한다. 이 중에서 신호와 자연방출의 비트 잡음에 의한 영향이 가장 크다. 이러한 잡음들은 신호 대 잡음비(SNR : signal-to-noise ratio)를 악화시키며 그 정도를 잡음지수(noise figure)로서 표시한다. EDFA의 잡음지수는 밀도반전을 나타내는 자연방출지수(spontaneous factor)에 비례한다. 980nm에서 동작하는 펌프 레이저를 사용하는 경우 거의 완전한 밀도반전을 이룩할 수 있기 때문에 이상적인 3dB의 잡음지수를 얻을 수 있다. 1480nm에서 동작하



(그림 4) EDFA의 포화이득 특성

는 펌프 레이저를 사용하는 경우 얻을수 있는 최소 잡음지수는 약 5dB 이다.

위에서 살펴본 바와 같이 광증폭기의 중요한 특성은 이득, 대역폭, 포화출력, 그리고 잡음을 들 수 있다. 이러한 특성들의 중요도는 EDFA 사용 목적에 따라 각기 다르므로 용도에 적합하도록 설계하여야 한다. 그밖에 중요한 EDFA의 특성으로는 낮은 삽입손실과 편광감도를 들 수 있다.

IV. EDFA의 응용

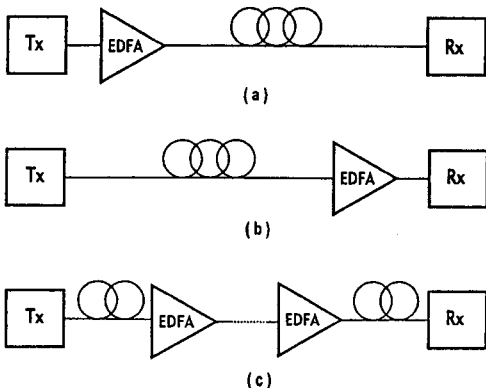
EDFA는 (그림 5)에 나타난 바와 같이 광통신의 성능을 향상시키기 위하여 여러가지 목적으로 사용될 수 있다. EDFA를 후치 증폭기(power amplifier)로 사용하면 송신용 레이저의 출력을 크게 증가시킬 수 있으므로 전송거리를 늘리거나 분배망에서 더 많은 분리(splitting)가 가능하다. 이를 위하여는 광증폭기의 높은 포화출력이 필요하다. EDFA를 사용하면 27dBm 이상의 포화출력을 얻을 수 있으므로 레이저 송신기의 출력을 100배 이상 증가시키는 것이 가능하다^[11].

EDFA는 잡음지수가 매우 낮으므로 전치 증폭기(preamplifier)로 사용하여 수신기의 수신감도를 높이는데 적합하다. 이론적으로는, 가장 이상적인 광증폭기를 사용한다면, 펄스 당 단지 45개의

광자(photon)를 수신하여 에러가 발생할 확률을 1×10^{-9} 보다 적도록 할 수 있다^[12]. 지금까지의 가장 좋은 실험결과는 980nm에서 펌프 된 EDFA를 전치 증폭기로 사용하여 10Gb/s의 신호를 수신할 때 -38.8dBm 의 수신감도를 얻은 것이다^[13]. 이것은 EDFA를 전치 증폭기로 사용하면 펄스 당 102개의 광자만 수신하여도 에러 없는 전송이 가능함을 뜻한다. 비교하여 설명하면, APD를 사용하는 2.5Gb/s급 상용 전송장비들의 수신감도는 약 -33dBm 정도이므로 에러 없이 전송하려면 1500개 이상의 광자가 필요하다.

EDFA를 선로 증폭기(line amplifier)로 사용하면 손실이 없는 “투명한” 선로를 구축하여 전송속도에 상관없이 사용할 수 있다. 이를 위하여는 광증폭기의 이득이 광섬유에 의한 손실을 보상할 수 있을 만큼 충분히 커야만 한다. 광섬유의 손실은 $1.55\mu\text{m}$ 에서 0.2dB/km 이하이며, 증계기 간의 거리는 보통 30-50km 정도이므로 증계기 간 광섬유에 의한 손실은 약 10dB 정도이다. 현재 EDFA를 사용하여 50dB 이상의 이득을 얻을 수 있으므로 이러한 손실을 쉽게 보상할 수 있다^[14]. 뿐만 아니라, EDFA의 높은 이득과 포화출력으로 인하여 증계기 간 거리를 지금보다 크게 증가(100km 이상으로)시키는 것도 가능하다. 증계기 간 거리를 증가시키면 광선로를 설치하고 유지하는 비용을 줄일 수 있다.

현재 전세계에는 8천만 km 이상의 광섬유가 포설되어 있으며 그 중 대부분은 1310nm 부근에서 색분산효과(chromatic dispersion)가 제일 작은 단일모드 광섬유이다. 이러한 광섬유는 최저손실 대역인 $1.55\mu\text{m}$ 부근에서 약 17ps/km/nm 의 색분산효과를 나타내기 때문에 전송속도를 10Gb/s 이상으로 증가시키려면 분산전이 광섬유(dispersion-shifted fiber)를 새로이 포설하여야만 한다. 그대신 EDFA를 사용함으로써 이미 엄청난 투자를 통하여 구축되어 있는 기존 광섬유망의 전송용량을 크게 증가시킬 수 있다. 이는 EDFA가, 광전 재생증계기와는 달리, 과장분할다중화된 신호들을 쉽게 수용할 수 있기 때문이다. 따라서, 기존의 광섬유망에서 사용하고 있는 2.5Gb/s급 신호를 여러 개 다중화 하여 전송하면 새로이 분산전이 광섬유를



(그림 5) EDFA의 응용

(a) 후치증폭기, (b) 전치증폭기, (c) 선로증폭기

설치하지 않더라도 경제적으로 광섬유당 전송용량을 수십 Gb/s 이상으로 크게 증가시킬 수 있다. 이러한 가능성을 증명하기 위하여 수많은 실험이 수행되었으며, 16개의 파장분할다중화된 2.5Gb/s급 신호들(광섬유당 전송용량: 40 Gb/s)을 EDFA를 사용하여 1420km 전송한 바 있다^[15].

EDFA를 전치 증폭기와 후치 증폭기로 사용하면 중계기 간 전송거리를 크게 증가시킬 수 있어 해저에 복잡한 광전 재생중계기를 설치하지 않더라도 도서간을 연결할 수 있다. 이러한 해저 케이블은 설치 및 유지 비용이 저렴하고, 단순히 해변의 기지국에 있는 송,수신기를 교체함으로써 성능을 개선할 수 있으므로 매우 유리하다. EDFA를 전치 증폭기와 후치 증폭기로 사용하여 2.5Gb/s급 신호의 무중계 전송거리를 318km 까지, 10Gb/s급 신호의 무중계 전송거리를 215km 까지 증가시킬 수 있다^[16-17]. 육상에서 펌프(remotely pump)할 수 있는 EDFA를 해저에 추가하면 무중계 전송거리는 2.5Gb/s와 10Gb/s에서 각각 423km와 252km로 더욱 증가된다^[18-19]. EDFA는 대서양이나 태평양을 건너는 초장거리 해저 케이블의 전송용량도 크게 증가시킬 것이다. TPC-4나 TAT-10과 같은 기존의 초장거리 해저 케이블들은 560Mb/s급 신호를 120km 마다 광전 중계기를 이용하여 재생하여 전송한다. 하지만, 1995년 말 설치될 예정인 새로운 초장거리 해저 케이블들은 EDFA를 사용하여 중계기 없이 5Gb/s급의 신호를 전송하게 될 것이다^[20]. 이것은 초장거리 해저 케이블의 전송용량이 10배 가까이 증가하게 되었음을 뜻한다. 이러한 가능성을 확인하기 위하여, EDFA를 사용하여 5Gb/s급 신호를 20,000km, 10Gb/s급 신호는 9,000km 까지 무중계 전송한 바 있다^[21]. 이 실험은 530km의 광섬유와 17개의 EDFA로 구성된 루프(fiber loop)를 이용하여 수행되었다. 그 후, 이 결과들은 5Gb/s와 10Gb/s급 신호들을 각각 274개의 EDFA를 이용하여 9,000km 까지 무중계 전송함으로써 확인되었다^[22-24].

EDFA의 가격이 보다 저렴해 진다면 분배망이나 광 CATV 망에서도 유용하게 사용될 수 있다. 분배망을 위하여는, EDFA를 이용하여 16개의 파

장분할다중화된 2.5Gb/s급 신호들을 반경 527km 이내의 4380만 가입자에게 보낼 수 있는 가능성이 확인된 바 있다^[24]. EDFA는 파장분할다중화된 분배망의 광원으로 사용될 수도 있다^[25-26]. 광 CATV 망에서 EDFA를 적용하는 연구도 매우 활발히 진행되고 있다. 이미 EDFA를 이용하여 아날로그 방식이나 디지털 방식의 영상정보들을 전송하는 실험이 성공적으로 수행된 바 있다^[27-29].

V. 결 론

EDFA는 광증폭기로서 거의 이상적인 특성을 갖고 있다. EDFA는 구조가 매우 간단함에도 불구하고 높은 이득(40-50dB)과 포화출력(> 20dBm)을 제공하며, 대역폭(>4THz)이 크고, 잡음지수(-3.5dB)가 낮으며, 이득의 동적특성(~ms)이 느려서 신호의 왜곡이나 누화가 발생하지 않는다. 뿐만 아니라, 광섬유 구조를 갖고 있으므로 삽입손실(-0.1dB)이 적고 이득이 신호의 편광에 무관하다. 이러한 EDFA가 최근 실용화됨에 따라 광통신의 커다란 변화가 시작되었으며 이를 제5세대 광통신이라고 까지 부른다.

EDFA를 사용한 광선로는 광섬유의 손실을 쉽게 보상할 수 있어 "투명하다"고 할 수 있다. 또한, 파장분할다중화된 여러개 신호를 쉽게 수용할 수 있어 경제적으로 전송거리와 전송용량을 크게 증가시킬 수 있다. 이러한 광선로의 전송용량은 단지 광섬유 자체의 비선형 효과에 의해서만 제한된다. 뿐만 아니라, EDFA를 사용하면 중계기 간의 거리를 크게 확대할 수 있으므로 광선로의 설치 및 운용 비용을 절감할 수 있고, 광선로가 투명하므로 단지 전화국에 송수신기를 추가함으로써 쉽게 용량을 증가시킬 수 있으며, 파장분할다중화된 여러개의 채널을 운영할 수 있으므로 선로의 복구를 위한 여분(redundancy)을 경제적으로 유지할 수 있고, 보다 새로운 망 운영 방식을 통하여 망 운영 비용을 절감할 수도 있을 것이다. 이러한 이유로 인하여, EDFA를 사용한 초장거리 무중계 해저

케이블을 비롯하여 장거리 육상 전송 시스템, 그리고 CATV 망 등은 이미 상용화되었거나 조만간 상용화 될 것으로 예상되고 있다.

EDFA는 이미 대양을 횡단하는 초장거리 해저 케이블의 전송용량을 10배 가까이 증가시켰으며, 육상 장거리 전송시스템의 용량도 수십배 이상 증가시킬 수 있을 것으로 예측된다. EDFA의 가격이 보다 저렴해 진다면 단거리 전송이나 분배망에서도 널리 사용될 것이 분명하다. 결론적으로, EDFA는 광섬유의 무한한 대역폭(bandwidth)를 더욱 효과적으로 사용 가능하게 한다. 이러한 결과는 가입자들이 새로운 광대역 서비스들을 경제적으로 제공 받을 수 있도록 함으로써 정보화시대를 이룩하는 데에 크게 기여할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] C. J. Koester and E. Snitzer, "Amplification in a fiber laser," *Appl. Opt.*, vol. 3, no. 10, pp. 1182-1186, Oct. 1964.
- [2] J. Stone and C. A. Burrus, "Neodymium-doped fiber lasers : room temperature cw operation with an injection laser pump," *Appl. Opt.*, vol. 13, no. 6, pp. 1256-1258, June 1974.
- [3] S. B. Poole, D. N. Payne, R. J. Mears, M. E. Fermann, and R. I. Laming, "Fabrication and characterization of low-loss optical fibers containing rare-earth ions," *IEEE J. Light. Tech.*, vol. LT-4, pp. 870-876, July 1986.
- [4] L. Reekie, R. J. Mears, S. B. Poole, and D. N. Payne, "Tunable single-mode fiber laser", *IEEE J. Light Technol.*, vol. LT-4, pp. 956-960, July 1986.
- [5] R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole, and D. N. Payne, "Low-threshold tunable cw and Q-switched fiber laser operating at 1.55 μm ", *Electron. Lett.*, vol. 22, no. 3, pp. 159-160, Jan. 1986.
- [6] R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, and D. N. Payne, Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm , *Electron. Lett.*, vol. 23, no. 19, pp. 1026-1028, Sept. 1987.
- [7] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B. C. McCollum, Erbium fiber laser amplifier at 1.55 μm with pump at 1.49 μm and Yb sensitized Er oscillator, *Optical Fiber Communication Conference, paper PD2*, Jan. 1988.
- [8] S. Uehara, Pump sources for erbium-doped fiber amplifiers, *Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications, paper WA1*, 1990.
- [9] M. Yamada, M. Shimizu, M. Okayasu, T. Takeshita, M. Horiguchi, Y. Tachikawa, and E. Sugita, Noise characteristics of Er +3-doped fiber amplifiers pumped by 0.98 and 1.48 μm laser diodes, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no.3, pp. 205-207, 1990.
- [10] S. Zemon, B. Pedersen, G. Lambert, W. J. Miniscalco, L. J. Andrews, R. W. Davis, and T. Wei, Excited-state absorption cross sections in the 800-nm band for Er-doped, Al/P-silica fibers : measurements and amplifier modeling, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 7, pp. 621-624, 1991.
- [11] J. F. Massicott et al, Efficient, high power, high gain Er-doped silica fiber amplifier, *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 1038-1039, 1990.
- [12] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, New York, 1992.
- [13] R. I. Laming, A. H. Gnauck, C. R. Giles, M. N. Zervas, and D. N. Payne, High-sen-

- sitivity wo-stage erbium-doped fiber pre-amplifier at 10 Gb/s, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 1348-1350, 1992.
- [14] R. I. Laming, M. N. Zervas, and D. N. Payne, Erbium-doped fiber amplifier with 54 dB gain and 3.1 dB noise figure, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 1345-1347, 1992.
- [15] A. R. Chraplyvy, J. M. Delavaux, R. M. Derosier, D. A. Fishman, C. R. Giles, J. A. Nagel, B. M. Nyman, J. W. Sulhoff, R. E. Tench, R. W. Tkach, J. L. Zyskind, 1420-km transmission of sixteen 2.5-Gb/s channels using silica-fiber-based EDFA repeaters, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, pp. 1371-1373, 1994.
- [16] Y. K. Park, S. W. Granlund, T. W. Cline, L. D. Tzeng, J. S. French, J.M. P. Delavaux, R. E. Tench, M. L. Kao, S. K. Korotky, J. J. Veselka, and D. J. DiGiovanni, 318-km repeaterless transmission using erbium-doped fiber amplifier in a 2.5-Gb/s IM/DD system, *Optical Fiber Communication Conference*, paper ThK1, 1992.
- [17] B. L. Patel, E. M. Kimber, N. E. Jolley, and A. Hadjifotiou, Repeaterless transmission at 10 Gb/s over 215 km of dispersion shifted fiber and 180 km of standard fiber, *Optical Fiber Communication Conference*, postdeadline paper PD6, 1993.
- [18] P. B. Hansen, V. L. Da Silva, L. Eskildsen, S. G. Grubb, V. Mizrahi, W. Y. Cheung, T. Erdogan, T. A. Strasser, J. E. J. Alphonsus, G. Nykolak, D. L. Wilson, D. J. DiGiovanni, D. Truxal, A. M. Vengsarkar, S. G. Kosinski, P. F. Wysocki, J. R. Simpson, and J. D. Evankow, 423 km repeaterless transmission at 2.448 Gb/s using remotely pumped post and pre-amplifier, *European Conference on Optical Communication*, postdeadline paper, Sept. 1994, Firenze, Italy.
- [19] O. Gautheron, G. Grandpierre, L. Pierre, J. P. Thiery, and P. Kretzmeyer, 252 km repeaterless 10 Gb/s transmission demonstration, *Optical Fiber Communication Conference*, postdeadline paper PD11, Feb. 1994.
- [20] P. K. Runge, Ultra-long distance optical transmission systems using optical amplifiers, *Optical Fiber Communication Conference*, paper Tu11, Feb. 1993.
- [21] N. S. Bergano, Undersea lightwave transmission systems using erbium-doped fiber amplifiers, *Optics and Photon. News*, vol. 4, pp. 8-14, Jan. 1993.
- [22] N. S. Bergano, C. R. Davidson, G. M. Kalums, P. R. Trischitta, J. Aspell, D. G. Gray, R. L. Maybach, S. Yamamoto, H. Taga, N. Edagawa, Y. Yoshida, Y. Horiuchi, T. Kawazawa, Y. Nimihira, and S. Akiba, 9000 km, 5 Gb/s NRZ transmission experiment using 274 erbium-doped fiber amplifier, *Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications*, postdeadline paper PD11, 1992.
- [23] H. Taga, N. Edagawa, H. Tanaka, M. Suzuki, S. Yamamoto, H. Wakabayashi, N. S. Bergano, C. R. Davidson, G. M. Homsey, D. J. Kalmus, P. R. Trischitta, D. A. Gray, and R. L. Maybach, 10 Gb/s, 9000 km IM/DD transmission experiments using 274 erbium-doped fiber amplifier, *Optical Fiber Communication Conference*, postdeadline paper PD1, Feb. 1993.
- [24] D. S. Forrester, A. M. Hill, R. A. Lobbett, R. Wyatt, and S. F. Carter, 38.91 Gbit/s,

- 43.8 million-way WDM broadcast network with 527 km range, *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 2051-2053, 1991.
- [25] J. S. Lee, Y. C. Chung, and D. J. DiGiovanni, Spectrum-sliced fiber amplifier light source for multichannel WDM applications, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, pp. 1458-1461, 1993.
- [26] Y. C. Chung, J. S. Lee, R. M. Derosier, and D. J. DiGiovanni, 1.7 Gbit/s transmission over 165 km od dispersion-shifted fibre using spectrum-sliced fibre amplifier light source, *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 1427-28, 1994.
- [27] K. Kikushima, E. Yoneda, and K. Aoyama, 6-stage cascade erbium fiber amplifier for analog AM- and FM-FDM video distribution system, *Optical Fiber Communication Conference*, postdeadline paper PD22, Jan. 1990.
- [28] H. Bulow, R.Fritschi, R. Heidemann, B. Junginger, H. G. Krimmel, and J. Otterbach, Analog video distribution system with three cascaded 980 nm single-pumped EDFAs and 73 dB power budget, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 1287- 1289, 1992.
- [29] R. Heidemann, B. Junginger, H. Krimmel, J. Otterbach, D. Schlump, and B. Wedding, Simultaneous Distribution of Analog AM-TV and Multigigabit HDTV with optical amplifier, *Topical meeting on Optical Amplifiers and Their Applications*, paper FB2, 1991.

저자 소개

鄭 允 喆

1956年 4月 30日生

1980年 한양대학교 전자공학과(학사)

1985년 유타주립대학교 전기공학과(석사)

1987년 유타주립대학교 전기공학과(박사)

1985년~1987년 Los Alamos National Laboratory AWU/DOE graduate research fellow

1987년~1994년 AT&T Bell Laboratories Member of Technical Staff

1994년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 부교수

주관심분야 : 광통신