

에르븀 첨가 광섬유 증폭기의 이득 동특성과 과도 현상의 억제*

박서연 · 김항균 · 신상영*

한국전자통신연구원 광파통신연구실

*한국과학기술원 전기및전자공학과

(1997년 9월 10일 받음)

본 논문에서는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기를 이용하여 단일 채널을 증폭할 때의 이득 동특성(gain dynamics)과 다채널을 증폭할 때의 이득 동특성에 대해 논의하였다. 여러 개의 에르븀 첨가 광섬유 증폭기가 연결된 증폭기 체인에서 채널 수의 변화에 의해 입력 광파위가 변할 때의 출력 광파위의 과도 현상(power transients)을 측정하고, 이를 μs 이하의 응답 시간을 갖는 펌프 광파위 조절 회로를 이용하여 억제하였다.

I. 서 론

에르븀 첨가 광섬유 증폭기(erbium-doped fiber amplifier: EDFA)의 동작영역은 입력 광파위에 관계없이 이득이 일정한 비포화 영역(unsaturated gain region)과 입력 광파위에 따라 이득이 변하는 포화 영역(saturated gain region)으로 구분되며, 이 두 영역에서의 이득 특성이 크게 다르다. 비포화 영역에서는 에르븀 이온의 밀도 반전이 일정하므로 입력 광신호가 파형의 왜곡 없이 증폭된다. 그러나 포화 영역에서 밀도 반전은 입력 광파위에 따라 변한다. 입력 광파위의 시간적인 변화가 빠른 경우에는 에르븀 이온이 평균 입력 광파위에만 영향을 받으므로 밀도 반전이 일정하여 파형의 왜곡없이 광신호가 증폭된다. 그러나 시간적인 변화가 느린 경우에는 에르븀 이온이 입력 광파위의 변화에 순시적으로 반응하므로 포화 이득 특성에 의한 왜곡이 발생한다.^[1,2] 캐리어 변화의 시상수(time constant)는 입력 광신호가 있을 때는 유도 방출에 영향을 받지만, 입력 광신호가 없을 때는 캐리어 완화 시간(relaxation time)에 의해 결정되므로 입력 광신호의 rising/falling 부분에서 각각 다르다. 또한 입력 광파위의 크기 및 펌프 광파위의 크기에 따라 시상수가 변하므로 여러 개의 EDFA를 지난 후의 출력 광파위의 과도 현상은 매우 빨라진다.^[3,4]

본 논문에서는 입력 광파위가 수 kHz 이하로 느리게 변조되는 경우의 과도 현상들에 대해 살펴보고, 입력 광파위의 변화에 따라 펌프 광파위를 μs 이하의 빠른 속도로 변화 시킴으로써 과도 현상을 억제한 결과에 대해 보고한다.

II. 과도 이득 특성

3 준위계(3 level system)를 갖는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기의 각 준위에서의 원자 밀도(atomic populations)에 대한 시간의존성 비율 방정식(time-dependent rate equations)은

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} N_1(z, t) \\ N_2(z, t) \\ N_3(z, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -W_{12} - R & W_{21} + A_{21} & R \\ W_{12} & -W_{21} - A_{21} & A_{32} \\ R & 0 & -A_{32} - R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

이다.^[2] 여기서 $N_{1,2,3}$ 는 각 준위의 밀도, $W_{12,21}$ 은 유도 방출 비율(stimulated emission rate), R 은 펌핑 비율(pumping rate), A_{21} 은 발광성의 자연 감소 비율(radiative spontaneous decay rate)로써 형광 수명 시간(fluorescence lifetime: τ_{21})의 역수, A_{32} 는 비발광성의 자연 감소 비율(nonradiative spontaneous decay rate: τ_{32})로써 준위 3과 준위 2간의 특성 수명 시간(characteristic lifetime)의 역수이다.

에르븀 첨가 광섬유의 경우 τ_{21} 은 약 10 ms이고, τ_{32} 는 수 μs 이므로 $A_{21}/A_{32} \ll 1$ 이다. 균질 확대된 레이저 천이(homogeneously broadened laser transition)를 가정하면 유도 방출 비율과 펌핑 비율은 포화 신호 광파위(P_s^{in})와 문턱 펌프 광파위(P_p^{th})를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$W_{12} \tau_2 + W_{21} \tau_{21} = \frac{P_s^{in}}{P_s^{sat}} \equiv p, \quad R \tau_{21} = \frac{P_p^{in}}{P_p^{th}} = q \quad (2)$$

광섬유 증폭기의 일반적인 경우로서 펌프 광파위가 일정하게 공급되고, 구형파 변조된 광신호가 신호 광파위로 입력된다면 해석적 방법으로 광섬유 증폭기의 광섬유 입력 단에서 식 (1)을 풀 수 있다. 이 방법으로부터 얻어진 결과는 실험적으로 얻어지는 출력 광파위의 과도 현상과 직접적인 비교는 어려우나 광섬유 증폭기의 이득 동특성의 기본적인 이해를 제공하고 시상수의 크기를 평가할 수 있다. 해석적 방법으로 얻은 광섬유 입력단에서의 원자 밀도는

$$N_2(t) = \left(\frac{1 + W_{21} \tau_{21}}{1 + p + q} - \frac{1}{1 + q} \right) e^{-t/\tau_{sat}} + \frac{W_{21} \tau_{21} + q}{1 + p + q}, \quad 0 < t < T$$

*본 연구는 HAN/B-ISDN 과제의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구에 도움을 주신 이동호 씨와 이종현 실장께 감사드립니다.

$$N_2(t) = \left(\frac{1+W_{21}\tau_{21}}{1+p+q} - \frac{1}{1+q} \right) (1 - e^{-(t-T)/t_{rec}}) + \frac{W_{21}\tau_{21}+q}{1+p+q}, T < t < 2T \quad (3)$$

이고 $N_1(t)=1-N_2(t)$ 이다. 여기서 $t_{sat}=\tau_{21}(1+p+q)$ 은 포화 시간이고, $t_{rec}=\tau_{21}(1+q)$ 은 회복 시간이다.

그림 1은 q의 펌프 광파워가 공급되는 EDFA에 p의 입력 광파워를 갖고 주기 2T로 변조되는 구형파(그림 1a)가 입력 될 때의 준위 2의 시간에 따른 원자 밀도 N_2 의 변화를 식(3)으로부터 계산한 결과이다. 그림 1b는 펌프 광파워가 일정할 때 입력 광파워의 크기에 따른 N_2 의 변화이다. 일정한 q값에 대해 p값이 클수록 정상 상태에서 밀도 반전율은 낮아진다. 식(3)에서 알 수 있듯이 p값이 증가하면 포화 시간은 짧아지나 회복 시간은 p값의 크기에 무관하다. 그림 1c는 입력 광파워가 일정할 때 펌프 파워의 크기에 따른 N_2 의 변화이다. 일정

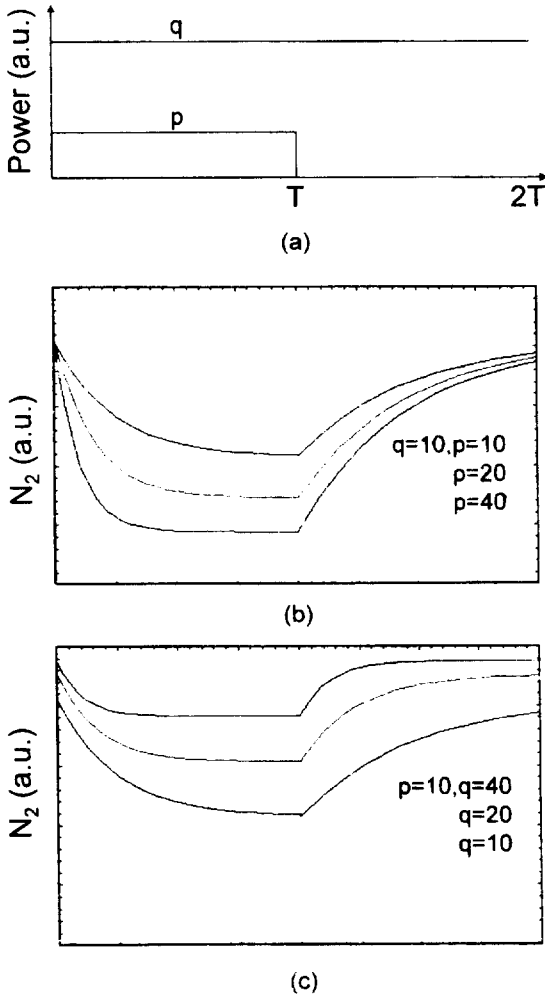


그림 1. 단일 채널 증폭시의 EDFA의 원자 밀도 N_2 의 시간에 따른 변화. (a) 펌프 광파워 q와 주기 2T의 구형파 변조되는 입력 광파워 p, (b) q가 일정할 때 p의 변화에 따른 N_2 의 변화, (c) p가 일정할 때 q의 변화에 따른 N_2 의 변화

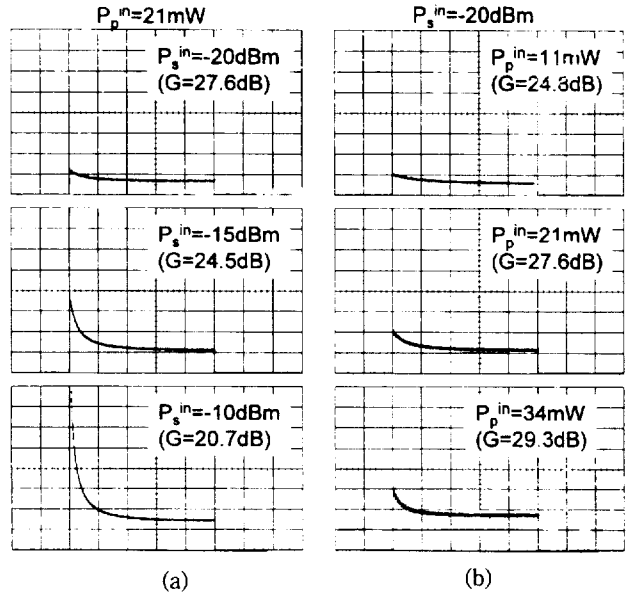


그림 2. EDFA의 이득 동특성. (a) 펌프 광파워가 일정할 때 입력 광파워의 변화에 따른 이득 동특성의 변화, (b) 입력 광파워가 일정할 때 펌프 광파워의 변화에 따른 이득 동특성의 변화

한 p값에 대해 q값이 클수록 밀도 반전율은 높아지며 포화 시간과 회복 시간 모두 짧아진다.

그림 2는 실험적으로 얻은 EDFA의 이득 동특성이다. 그림 2a와 같이 일정한 펌프 광파워가 공급되는 EDFA에 입력 광파워가 커지면 출력 광파워의 파형 왜곡이 커진다. 그림 2b는 입력 광파워가 일정하고 펌프 광파워가 커질 경우에도 출력 광파워의 파형 왜곡이 커진다. 이와 같이 입력 광파워가 커지거나 펌프 광파워가 커질수록 N_2 의 포화 시간이 빨라져 광신호의 왜곡이 커진다.

III. 다채널 증폭 특성

광증폭기를 이용하여 다채널을 동시에 증폭할 경우에는 이득 포화에 의한 누화(saturation-induced crosstalk : SIC)와 변조 왜곡(intermodulation distortion : IMD)과 같은 채널간 간섭을 받는다.^[2] SIC는 광증폭기의 캐리어 밀도 감소에 의한 영향으로 진폭 변조된 신호가 겪는 이득의 과도 현상이다. IMD는 캐리어 수명 시간의 역수보다 채널 간격이 좁을 때 축퇴 4광파 혼합에 의해 발생하며 맥놀이 주파수(beat frequency)에서 이득이 변조되는 특성으로 채널 간격이 100 GHz 이상인 광전송 시스템에서 이 현상은 무시할 수 있다.

펌프 광파워가 일정하게 공급되는 EDFA에 파장 분할 다중된 두 채널이 입력되고, 이 중에서 한 채널은 변조되지 않으나 다른 채널은 구형파 변조되는 경우의 N_2 는 그림 3과 같다. 이때 구간(T, 2T)에서의 회복 시간이 그 구간에서의 잔여 입력 광파워에 영향을 받으므로 그림 1(b)의 경우처럼 단일 채널이 변조될 때 보다 짧아짐을 알 수 있다.

그림 4는 일정한 펌프 광파워가 공급되는 EDFA에 입력

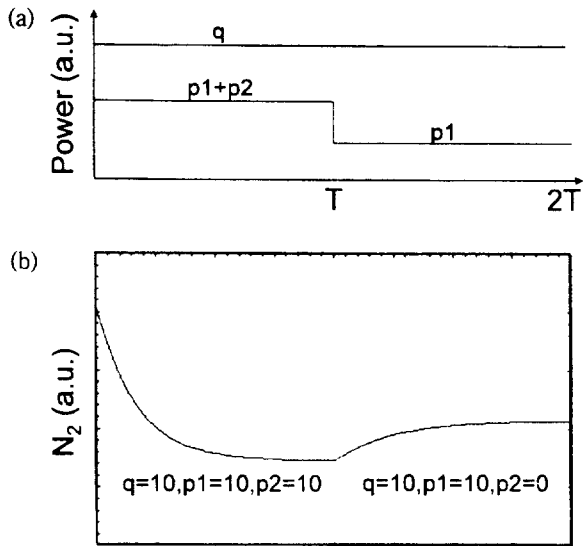


그림 3. 다채널 증폭시의 EDFA의 원자 밀도 N_2 의 시간에 따른 변화. (a) 펌프 광파워 q , 입력 광파워 p_1 , 주기 $2T$ 의 구형파 변조되는 입력 광파워 p_2 , (b) p, q 값의 변화에 따른 N_2 의 변화

저 포화 시간에 근접함을 알 수 있다. 그러나 그림 4b,c와 같이 변조 주파수가 높아지면 출력 파형의 왜곡이 줄어들다가 변조 주파수가 수십 kHz 이상에서는 원자 밀도가 평균 입력 광파워에만 영향을 받으므로 파형의 왜곡없이 광신호가 증폭된다.

따라서 수십 kHz 이상의 높은 비트율과 채널 간격이 100 GHz 이상인 파장 분할 다중 전송시스템/전송망에서 EDFA는 ms 정도의 느린 이득 동특성 때문에 SIC와 IMD를 효과적으로 억제한다.

IV. 출력 광파워의 과도 현상

파장 분할 다중 전송망/가입자망에서는 망의 재구성, 광선로 단락, 몇 개의 채널 차단 등과 같은 이유로 EDFA에 입력되는 채널의 수가 변하거나 여러 채널이 불규칙하게 on/off 될 수 있다.^[3,4] 이 경우 앞에서 설명한 이득의 상호 포화에 의한 누화의 영향으로 생존 채널의 이득이 순간적으로 변하므로 출력 광신호에 과도 현상이 발생하여 순간적으로 전송 오류가 높아진다. 한 개의 EDFA를 지난 후의 생존 채널의 광파워는 펌프 광파워와 입력 광파워의 크기에 의해 결정되는 포화 시간과 회복 시간을 가지고 감소되고 증가된다. 이 광신호가 두 번째 EDFA에 입력되면 변조된 광신호의 off 영역에서 입력 광파워의 증가 때문에 두 번째 EDFA의 포화 시간과 회복 시간은 첫 번째 EDFA의 포화 시간과 회복 시간보다 짧아지며, 출력 광파워의 변화량은 커진다. 이 현상은 EDFA를 지날 때마다 누적되므로 여러 개의 EDFA를 지난 후의 생존 채널의 포화 시간과 회복 시간은 매우 빨라지며 출력 광파워의 변화량은 펌프 광파워와 생존 광파워의 비율에 따라 포화된다. 결국 여러 개의 EDFA를 지난 후의 생존 채널의 광파워는 매우 빠른 속도로 증가하다가 줄어드는 빠른 과도 현상을 갖는다

그림 5는 채널당 -17 dBm의 광파워를 갖는 파장 분할 다중된 8 채널중에서 7 채널이 주파수 500 Hz로 구형파 변조되고 있을 때 변조되지 않는 채널이 광섬유 증폭기를 지난 후의 과

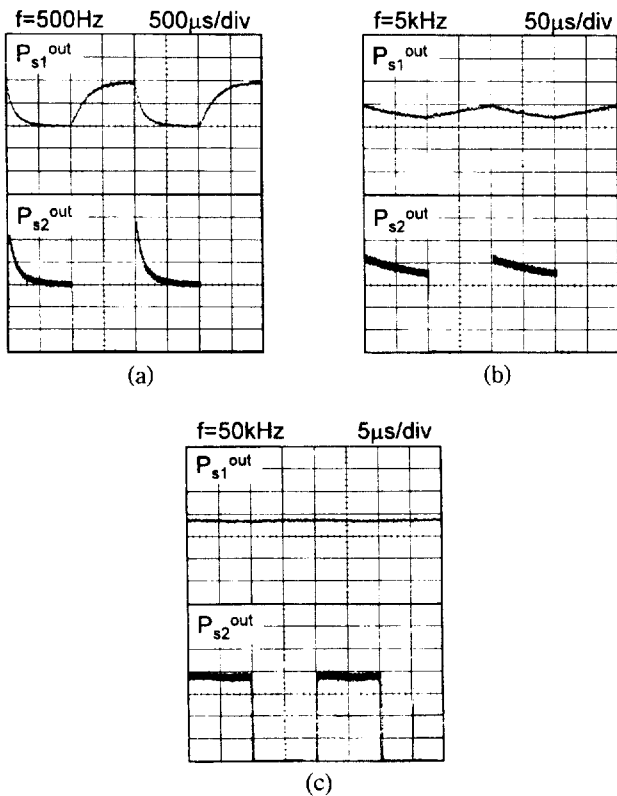


그림 4. 채널당 입력 광파워가 -14 dBm이고 펌프 광파워가 21 mW인 EDFA의 한 채널이 변조 될 때의 이득 동특성의 변화. (a) 변조 주파수가 500 Hz 일때, (b) 변조 주파수가 5 kHz 일때, (c) 변조 주파수가 50 kHz 일때

광신호 P_{s1} 은 변조하지 않고 P_{s2} 만을 구형파 변조할 경우의 각각의 출력 광신호의 파형이다. 변조되지 않은 광신호의 출력 파형 왜곡은 그림 3에서의 N_2 에 의존하고, 회복 시간이 빨라

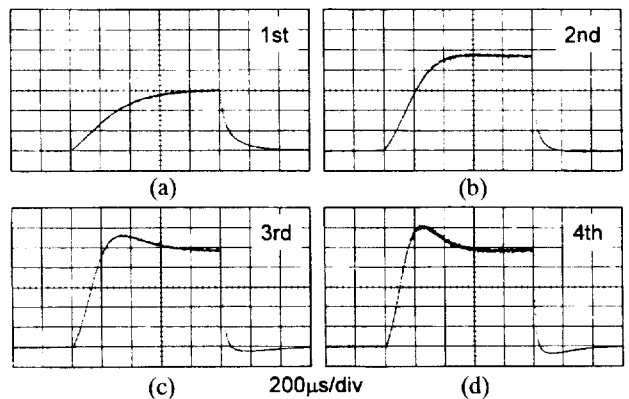


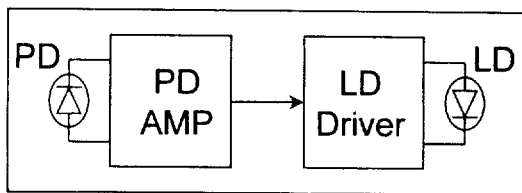
그림 5. 채널당 입력 광파워가 -17 dBm인 8개의 채널중에서 7채널이 500 Hz로 변조될 때 변조되지 않은 채널에 대한 출력 광파워의 과도 응답. (a) 첫 번째 EDFA 후, (b) 두 번째 EDFA 후, (c) 세 번째 EDFA 후, (d) 네 번째 EDFA 후

도 응답 특성이다. 지나 온 EDFA의 수가 많아 질수록 회복 시간이 빨라져 과도 현상이 빨라짐을 알 수 있다. 이러한 과도 응답 특성은 광선로에서 비선형 효과를 유발하거나 광신호대 잡음비의 저하를 가져와 전송 오율을 높인다. 그러므로 과장 분할 다중 전송망/가입자망에서는 과도 응답 특성을 억제하기 위한 장치가 필요하다.

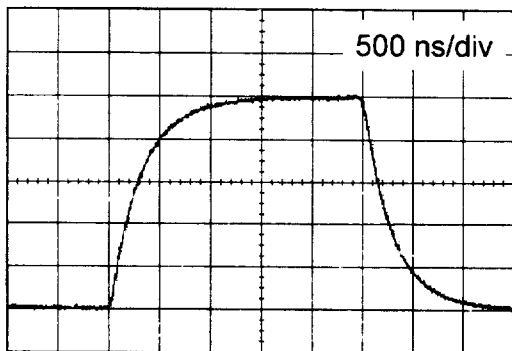
V. 과도 현상의 억제

채널 수의 변화에 따른 생존 채널의 출력 과도 현상을 억제하기 위하여 WDM 광링크의 송신부 바로 뒤에 링크 조절 채널(link control channel)을 두어 EDFA에 입력되는 광파워의 양을 일정하게 유지함으로써 과도 현상을 억제하는 방법이 제안되었다.^{14,17} 그러나 이 방법은 WDM 광링크에 이용되는 채널 수가 커지고 그에 따라 drop되는 채널수가 많아질수록 링크 조절 채널의 광파워가 커진다. 따라서 조절 채널을 광신호 대역 내에서 이용할 경우에는 비선형 현상의 영향을 크게 받으며, 광신호 대역 밖에서 이용할 경우에는 EDFA의 평탄 이득 대역폭이 넓어져야 한다. 또한 광학적인 방법에 의한 링크 조절은 완화 진동(relaxation oscillation)의 영향을 받고¹⁷, 전기적인 방법에 의한 링크 조절은 EDFA 이득 대역 내에서 레이저 다이오드가 추가로 필요하다.¹⁴

이 장에서는 효율적으로 펌프 광파워를 조절하여 과도 현상을 억제하는 방법에 대해 논의한다. EDFA는 평탄 이득을 갖는 밀도 반전율에서 입력 광파워와 펌프 광파워간에 선형 관계가 존재한다.¹⁸ 이 선형 관계로부터 입력 광파워의 일부를 탭하여 그 변화에 따라 EDFA의 펌프 광파워를 조절하면 입력되는 채널 수에 상관없이 평탄 이득을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 채널당 이득값도 항상 일정하게 유지할 수 있다.



(a)



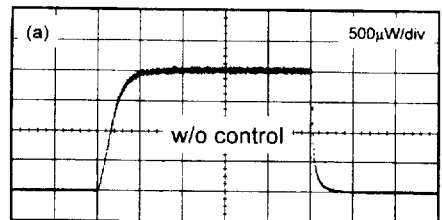
(b)

그림 6. 펌프 구동 회로의 구성도 (a), 펌프 광원의 응답 특성 (b)

또한 펌프 광파워의 구동회로를 빠르게 구성함으로써 링크 조절 채널 없이도 EDFA 자체 내에서 과도 현상을 억제할 수 있다.

그림 6a는 실험에 이용된 펌프 구동 회로의 구성도이다. 고속의 OP AMP를 이용하여 광검출기 신호를 전압으로 증폭하였고, 전압을 전류로 변환하는 고속 집적 소자를 펌프 광원의 구동기로 이용하였다. 그림 6b는 펌프 광원의 응답 특성으로 rise/fall 시간이 약 650 ns 이다.

그림 7은 채널당 입력 광파워가 -17 dBm인 8개의 채널중에서 7채널이 200 Hz로 변조될 때 입력 광파워의 변화에 따라 그림 6의 특성을 갖는 조절 회로로 펌프 광파워를 조절했을 때의 과도 응답 특성이 억제된 출력 광신호이다. 조절 회로가 없을 때는 변조되지 않은 입력 광파워에 대한 출력 광파워의 과도 응답이 약 7 dB(그림 7a)이었으나 조절 회로를 구동했을 때는 0.17 dB(그림 7b)로 줄었다. 그림 7c는 빠른 펌프 구동 회로가 동작하고 있는 상태에서 7채널이 add 되었을 때의 EDFA의 출력 스펙트럼이고, 그림 7d는 drop 되었을 때의 출력 스펙트럼이다. 이와 같이 EDFA의 펌프 광원을 입력 광파워의 변화에 따라 빠르게 변화 시킴으로써 EDFA의 평탄 이득 특성이 채널수에 관계없이 유지되었다. 그림 7d의 증폭된 자연 방출 레벨에서 보이는 스파이크들은 7채널의 on/off를 위해 이용된 음향 광학 변조기의 소광비가 약 30 dB로 낮기



7-chs dropped 7-chs added

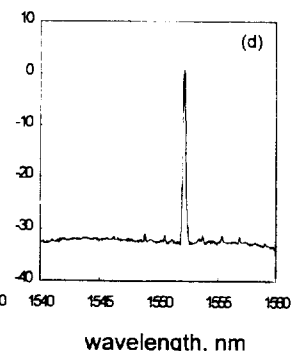
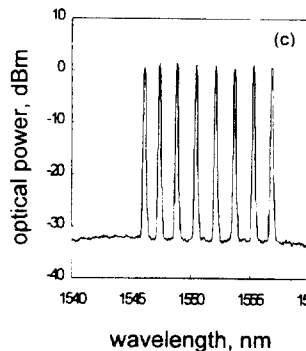
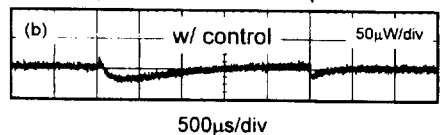


그림 7. 채널당 입력 광파워가 -17 dBm인 8개의 채널중에서 7채널이 200 Hz로 변조될 때 출력 광파워의 과도 응답 특성과 출력 스펙트럼. (a) 펌프 조절 회로 off시, (b) 펌프 조절 회로 on시, (c) 7채널이 add 되었을 때, (d) 7채널이 drop 되었을 때

VI. 결 론

광섬유 증폭기의 이득 동특성에 대해 논의하고, 여러 개의 EDFA가 연결된 증폭기 체인에서 채널 수의 변화에 의해 입력 광파워가 변할 때 출력 광파워의 과도 현상을 살펴보았다. 650 ns의 응답 시간을 갖는 펌프 광파워 조절 회로를 이용하여 8개의 채널중에서 7개의 채널이 200 Hz로 변조될 때의 과도 응답을 7 dB에서 0.17 dB로 억제하였다. 이러한 빠른 응답 시간을 갖는 조절 회로를 이용하여 광섬유 증폭기를 구성할 경우 약 50개의 EDFA를 갖는 증폭기 체인을 지난 후에도 출력 광파워의 과도 응답을 1 dB 이하로 막을 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] E. Desurvire, C. R. Giles, and J. R. Simpson, *J. Lightwave Technol.* **7**, 2095 (1989).
- [2] E. Desurvire, C. R. Giles, and J. R. Simpson, in *Proc. SPIE Conference on Fiber Laser Sources and Amplifiers* **1171**, 103 (1989).
- [3] J. L. Zyskind, Y. Sun, A. K. Srivastava, J. W. Sulhoff, A. J. Lucero, C. Wolf, and R. W. Tkack, in *Proc. OFC96*, Paper PD31 (1996).
- [4] J. L. Zyskind, A. K. Srivastava, Y. Sun, J. C. Ellson, G. W. Newsome, R. W. Tkack, A. R. Chraplyvy, J. W. Sulhoff, T. A. Strasser, J. R. Pedrazzani, and C. Wolf, in *Proc. ECOC'96*, Paper ThC.3.6 (1996).
- [5] M. Zirngibl, *Electron. Lett.* **28**, 560 (1991).
- [6] A. K. Srivastava, Y. Sun, J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, C. Wolf, and R. W. Tkach, in *Proc. OAA'96*, Paper PDP4 (1996).
- [7] S. Y. Kim, J. Chung, and B. Lee, *Electron. Lett.* **33**, 1475 (1997).
- [8] S. Y. Park, H. K. Kim, C. S. Park, and S.-Y. Shin, *Electron. Lett.* **32**, 2161 (1996).

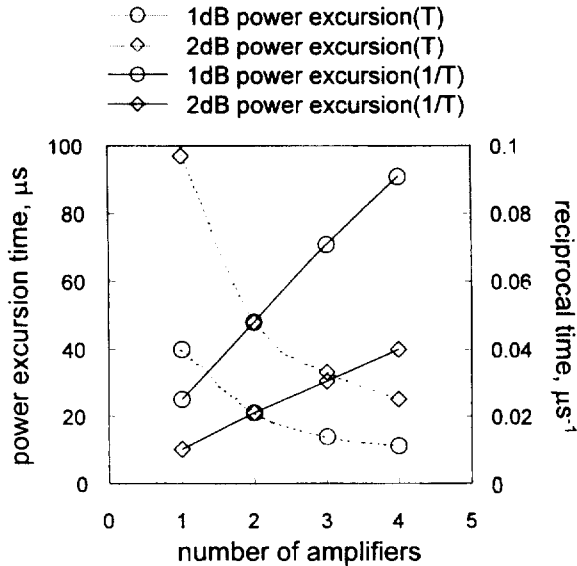


그림 8. EDFA의 개수에 따른 출력 광파워의 과도 응답이 각각 1 dB 및 2 dB가 되는 시간과 그의 역수

때문이다.

그림 6의 펌프 구동 회로를 갖는 EDFA로 WDM 전송망을 구성할 경우에 WDM 광링크가 수용할 수 있는 EDFA의 개수를 알아보기 위해 그림 5로부터 EDFA를 지난 후의 출력 광파워의 과도 응답이 각각 1 dB 및 2 dB가 되는 시간을 그림 8에 나타내었다. 변조되지 않은 광신호가 각각의 EDFA를 지난 후에 겪는 과도 응답이 1 dB가 되는 시간은 41 μs, 21 μs, 14 μs, 10.5 μs이고, 그 역수는 그림 8에서 보는 바와 같이 EDFA의 지나온 수에 비례한다. 따라서 rise/fall 시간이 650 ns인 펌프 구동 회로를 갖는 EDFA로 WDM 전송망을 구성할 경우 EDFA가 약 50 개까지 연결된 WDM 광링크에서 8개의 채널중 7개의 채널이 add/drop 되어도 생존 채널의 과도 응답을 1 dB 이하로 억제할 수 있을 것이다.

Gain dynamics of erbium-doped fiber amplifiers and suppression of power transients

Seo Yeon Park and Hyang Kyun Kim

*Lightwave Communications Section, Electronics and Telecommunications Research Institute
Taejon 305-600, Korea*

Sang-Yung Shin

*Dept. of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology
Taejon 305-701, Korea*

(Received : September 10, 1997)

We investigate the gain dynamics of erbium-doped fiber amplifiers during single- and multi-channel amplification. Power transients due to the changes in the number of channels in the amplifier chain are measured. We successfully suppress power transients by using a fast pump control circuit with μs response time.