

## 양방향 고정이득 L-band EDFA의 응답 특성

김익상

배재대학교 정보통신공학과

### 요 약

WDM(Wavelength Division Multiplexing) 광통신망의 노드에서 신호채널들이 분기 결합될 때 잔류채널들의 이득을 일정하게 제어해 주기 위해 고정이득 EDFA를 사용한다. 본 논문에서는 양방향 펌프에 의해 고이득을 가지는 L-band EDFA에서 발진광에 의해 입력변화를 보상해주는 방식으로 고정이득 EDFA를 구현하였다. 여기서 발진방향 및 파장에 따른 잔류채널의 과도 응답 특성에 있어서 단파장 후방발진의 경우가 최적임을 확인할 수 있었다.

Kim, Ik Sang, Dynamic Characteristics of Gain-Clamped L-band EDFA with Bi-directional Pumps

ABSTRACT : The gain-clamped EDFA has been developed to eliminate the output power change of WDM surviving channels to occur with added or dropped channels, which degrades the performance of WDM optical network. It maintains the constant gain of surviving channels when WDM channels are added or dropped in a network amplifying node. In this paper, the bi-directionally pumped gain-clamped EDFA is implemented to compensate the change of the input power by a lasing. The results show that the lasing of a short wavelength and backward propagation is the optimal condition to minimize the transient response of surviving channels in terms of the overshoot and gain saturation due to the inhomogeneous broadening effect.

### I. 서 론

광선로상에 신호광의 손실을 보상해 주기 위해 Er 희토류 원소가 첨가된 특수광섬유를 여기시켜 신호광을 전광적으로 증폭시키는 EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)가 개발되어 왔다. 초기에는 1530nm~1550nm의 파장영역(C-band)에서

WDM(Wavelength Division Multiplexing) 신호채널들을 증폭시킨 반면 최근 들어 1570nm~1610nm의 장파장 영역(L-band)까지 가용 WDM채널들을 확장함으로써 전송 속도를 급상승시켰다. 특히 WDM 광통신망의 한 노드에 위치한 EDFA의 입력단에서 WDM 채널들이 분기 또는 결합될 때,

이득 특성이 달라져 통과되는 잔류채널들의 출력변화가 나타난다. 이러한 잔류채널들의 출력변화는 수신단에서 통신성능의 저하를 초래하기 때문에 이를 억제할 필요가 있다. 이를 위해 이득을 일정하게 제어해 주는 고정이득 EDFA를 고안하게 되었는데 여기에는 WDM 신호채널들의 분기 및 결합에 따른 입력광의 변화를 보상해 주도록 개회로 EDFA에 공진기를 부착하여 발생하는 발진광을 사용하는 방식과 펌프 광을 제어해 주는 방식들이 있다. 이와 같이 고정이득 EDFA에 의해 잔류채널들의 출력변화는 억제되지만 순간적으로 미소한 출력 요동(과도 응답)이 나타나 통신 성능을 떨어뜨려 이를 억제하기 위한 연구가 이루어져 왔다.[1]~[3] 또한 EDF(Erbium Doped Fiber)의 비균일 특성(inhomogeneous)으로 인해 특정 파장의 빛이 우세할 경우 전반적인 이득스펙트럼의 변화를 야기시킨다. 가령 발진광을 사용하는 고정이득 EDFA에서 8채널에서 7채널이 분기될 경우 7채널의 광파위에 상당한 발진광이 EDFA

에 인입되는데 이로 인해 1개의 잔류채널의 출력변화가 야기되어 역시 통신 성능에 저하를 초래하게 된다.[4]~[6]

본 논문에서는 양방향 펌프 고이득 구조의 고정이득 L-band EDFA에서 이러한 과도응답 특성에 관한 연구 결과를 보여 주고자 한다. 먼저 이득을 일정하게 유지하도록 하기 위해서 채널들의 분기 및 결합에 따른 입력광의 변화가 없도록 자동적으로 보상광을 EDFA에 인입하는 기법을 사용하는데, 이는 고리형 공진기를 개회로 EDFA에 부착함으로써 발진광에 의해 입력광의 변화분을 자동적으로 보상해 주는 방식이다. 본 논문의 논점은 양방향 펌프 고이득 구조의 고정이득 L-band EDFA에서 고리형 공진기 내를 순환하는 발진광의 파장 및 전파방향에 따라 잔류채널들의 가장 작은 요동이 일어나는지에 대한 연구이다. 또한 EDF의 비균일 특성에 의한 이득 특성의 변화에 있어서 발진광의 파장 및 전파방향에 따른 잔류채널들의 출력변화에 대한 결과를 보여 주고자 한다.

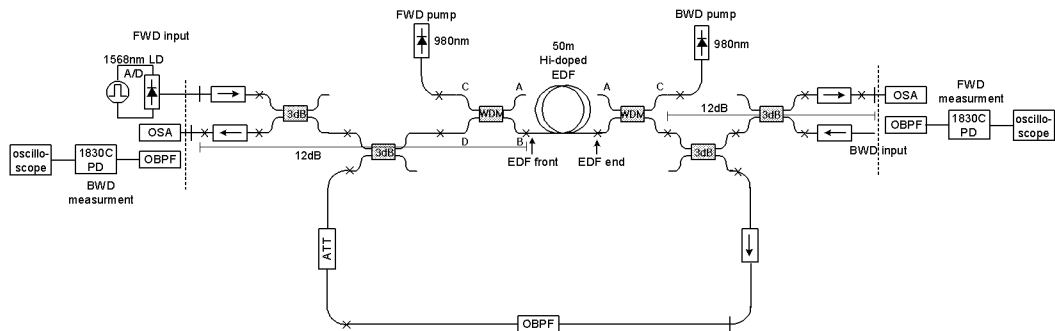


그림 1. 양방향 펌프 고정이득 L-band EDFA 실험 셋업

## II. 과도응답 특성

### 1. 실험 환경

이득평화도가 좋은 38%의 평균밀도반전을 위해서 이득을 크게 하기 위해서 그림 1. 과 같이 50m 길이의 고밀도 EDF, 두 개의 양방향 WDM coupler, 두 개의 980nm 펌프 LD에 의한 양방향 펌핑을 사용하였다. 나중에 종종 참조할 전방 및 후방의 방향 기준, 초단 및 종단의 위치 기준이 그림 1.에 명시되어 있다. 따라서 그림 1.에서 왼편의 펌프 LD가 전방펌프, 오른편의 펌프 LD가 후방펌프가 된다. 전방펌프에는 480mA 주입시 약 190mW의 펌프광이 주입되고 후방 펌프에는 180mA 주입시 약 110mW의 펌프 광을 주입한다. 1582.4nm의 cooled DFB-LD를 변조함으로써 전방으로 입력된 분기결합(ADM) 채널로서 활용한다. 그림 1.의 고리형 공진기에는 발진광의 방향성을 주기 위해 광고립기, 발진광 파장을 튜닝할 수 있도록 광여파기(OBPF), 공진기의 손실을 조정함으로써 고정이득을 조정할 수 있도록 광감쇠기(ATT)를 두었다. 또한 전후방 광출력 스펙트럼을 보기 위해 OSA를 사용하고 ADM채널 또는 발진광, 잔류채널들의 과도응답 파형을 관측하기 위한 전후방관측단이 그림 1.에 표시되어 있다.

1. 고정이득 L-band EDFA에서 입력광파장에 따른 전후방 자연방출광 특성 발진광에 의해 자동적으로 이득을 일정

하게 유지하는 고정이득의 원리는 다음과 같다. 가령 EDFA의 신호입력광파위가 줄어들면 순간적으로 평균밀도반전율이 커져서 이득이 커진다. 이득과 손실이 동일한 상태에서 생성된 기존의 발진광은 순간 커진 이득에 의해서 발진광 파워가 늘어나게 되며 늘어난 발진광은 다시 평균밀도반전율을 줄이는 방향으로 포화시킴으로써 궁극적으로는 공진기 손실과 동일한 이득을 유지하게 된다. 이러한 동작은 신호채널의 분기시에 나타나는 과도현상을 의미한다. 그림 2.는 1568nm에서 18dB, 장파장 영역에서는 22dB 정도의 이득으로 고정된 상태

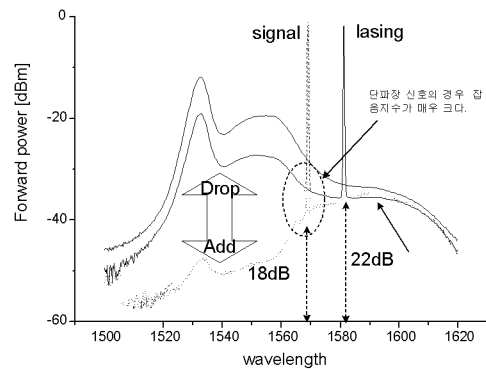


그림 2. 단파장 신호, 장파장 발진의 고정이득 상황에서 전방 자연방출광의 변화

(36% 정도의 낮은 평균밀도반전율)에서 분기 결합하는 1568nm 신호광과 1582nm 발진광의 전방광출력 스펙트럼을 보여 준다.

그림 3.는 앞서의 펌프조건에서 그림 1.의 실험 셋업의 고리형 공진기를 제거한 개회로 EDFA에서 전방으로 가해진 1582nm 신호광의 이득특성을 보여 준다.

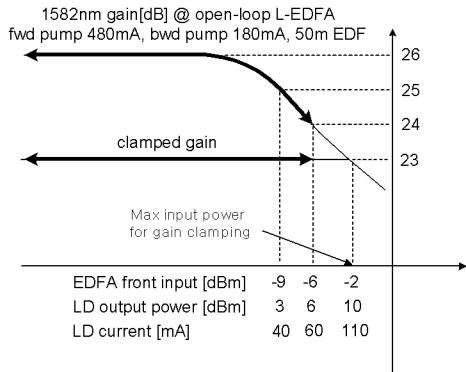
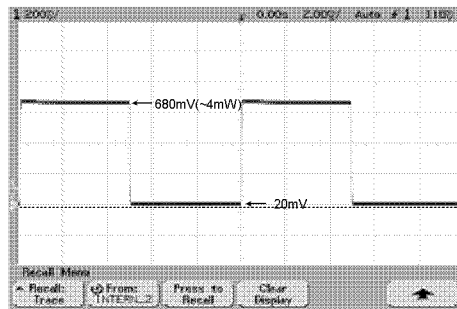


그림 3. 1582nm 신호광의 이득특성

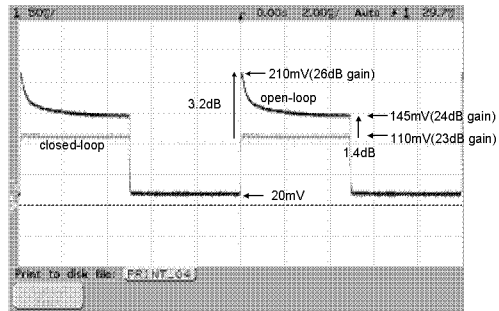
2. 전방 발진과장에 따른 과도응답 특성

ADM채널을 만들기 위해 LD driver에 100Hz 0~1.2V의 구형파를 가하여 0mA~60mA의 변조 전류를 1582.4nm LD에 주입함으로써 0~4mW의 변조된 광출력을 낸다.(그림 3. 참조) 그림 4.(a)는 1582.4nm 변조 파형을 1830C PD로 수광하여 oscilloscope로 본 것이다. 그림 1.의 실험 셋업에서 이러한 1582nm ADM채널을 개회로 및 폐회로(고정 이득) EDFA의 전방 입력으로 가했을 때 전방관측단의 oscilloscope에서 측정된 1582nm ADM채널의 각각의 출력파형은 그림 4.(b)와 같다. 공진기가 제거된 개회로 EDFA에서 ADM채널 광파워레벨이 큰 경우(즉 신호광이 결합되는 경우) 소신호 이득 26dB를 순간적으로 경험하게 되고 이후에는 점차적으로 포화되어 24dB 정도의 이득을 갖게 된다.(그림 3. 참조) 이것은 ADM채널의 입력광파워 변화에 의해 이득이 변화함을 의미한다. 반면에 1582nm ADM채널이 23dB의 고정이득을

갖도록 고리형 공진기의 광감쇠기를 조정하여



(a)



(b)

그림 4. (a) 1582.4nm ADM채널 파형(20mV bias, 0.16V/mW 1830C PD 감도)

(b) 개회로 및 폐회로(고정이득)에서 1582.4nm ADM채널 출력의 과도응답(20mV bias, 0.16V.mW 1830C PD 감도)

특정 파장에서 발진시켰을 경우 개회로에서 보여지는 overshoot는 사라짐을 볼 수 있으며, 이것은 이득이 고정되어 이득의 변화가 없음을 의미한다.

그림 1.에서 두 발진 파장(1570.08nm, 1594.8nm)에 대해서 각각 동일한 이득 스펙트럼(평균밀도반전을 36%, 1582nm에서 23dB 이득)을 갖도록 하기 위해 공진기의 광감쇠기를 조정하여(1570nm 발진의 경우 약 21dB 공진

기 손실, 1595nm 발진의 경우 약 23dB 공진기 손실) L-band 영역의 스펙트럼을 최대한 일치하게 하였다.(이것은 후방펌프가 약한 양방향 펌프 구조 EDFA의 L-band에서의 전방자연방출광출력 스펙트럼이 이득 스펙트럼과 거의 같다는데 근거한 것이다.) 그림 5.(a)는 1582nm ADM채널의 고정이득 23dB의 평균밀도반전을 유지하도록 1570nm, 1595nm 파장에서 전방발진시켰을 경우, 1582nm 파장에서 고정이득이 붕괴되기 직전의 최대 허용 입력 광파워 경우(LD에 110mA, 9.7mW 주입하였을 경우)의 전방광출력 스펙트럼이다. 이러한 세가지의 경우에 대해 L-band에서의 전방광출력 스펙트럼이 일치함을 볼 수 있고 이것은 각각 동일한 평균밀도반전을 형성하였음을 의미한다. 또한 그림 5.(b)는 후방광출력 스펙트럼을 나타낸다.

여기서 특기할 만한 것은 장파장 발진에 비해 단파장 발진의 경우에 C-band에서의 전후방 자연방출광이 많이 줄어든다는 점이다. 이것은 단파장의 이득이 장파장에 비해 작기 때문에 큰 입력광파워가(또 다른 측면으로 고리형 공진기 손실이 단파장 발진이 장파장 발진에 비해 작게 되어 있어 최초로 발생된 자연방출광이 작은 손실을 경험하여 큰 입력광이 되고 좀 더 큰 발진 출력광으로 포화된다.) EDF 종단의 여기밀도를 크게 낮춤으로써 흡수율이 큰 C-band 파장의 전후방 자연방출광이 매우 크게 줄어들기 때문이다. 동일한 고정이득 조건하에서 단파장 발진출력광이 장파장 발진출력광보다 크고 분기 결합시에 발진출력광 차이 역시 큰 경향을 띤다.

그림 6.(a), (b)는 각각 1570nm, 1595nm 전방 발진출력광과 1582nm ADM채널출력광의 과도응답을 보여준다. 먼저 두 발진파장에서 동일한 평균밀도반전을로서 이득이 고정되었음을 1582nm ADM채널출력광 파형이 동일하다는 것으로부터 확증할 수 있다.

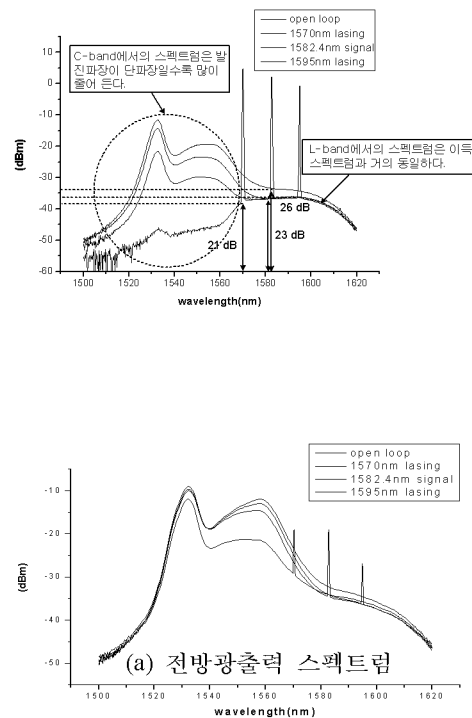
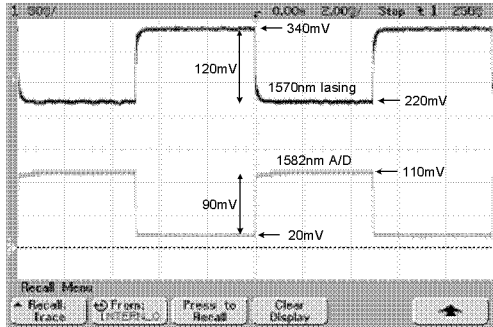
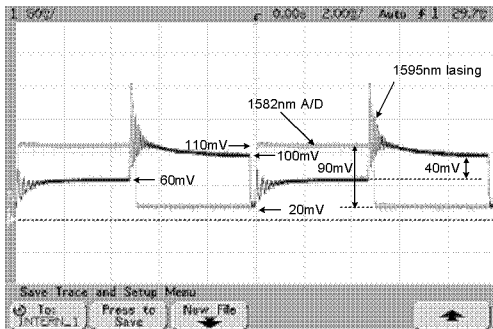


그림 5. 전방발진 고정이득 L-band EDFA의 전, 후방광출력 스펙트럼

(b) 후방광출력 스펙트럼



(a) 1570nm 발진

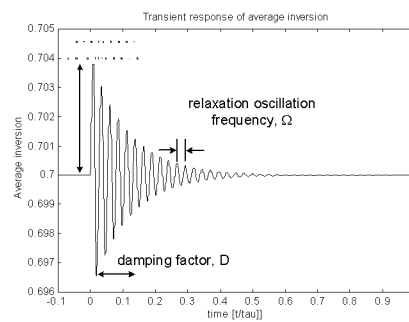


(b) 1595nm 발진

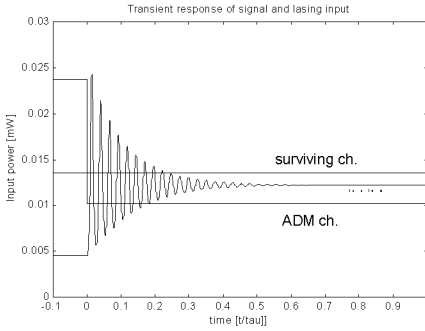
그림 6. 전방 발진출력광과 1582nm ADM채널출력광의 과도응답(20mV bias, 0.16V/mW 1830C PD 감도)

논점은 ADM채널들에 의해서 발생하는 잔류채널들의 과도현상이 얼마나 심하게 나타나는가 하는 것인데 이를 위해서는 잔류채널의 요동을 명확하게 관측할 수 있어야 한다. 그러나 잔류채널의 과도응답을 명확하게 관측하기는 힘들고 그림 6.에서 보는 것처럼 명확한 과도현상을 나타내는 발진출력광을 통해서 과도현상의 크기를 추정하고자 한다. 그림 7.은 고정이득 EDFA에서 ADM채널의 분기에 따른 과도응답의 모의분석 결과로서, ADM채널, 잔

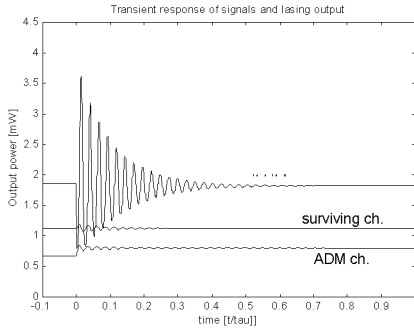
류채널, 발진광 모두의 과도응답은 평균밀도반전율의 과도현상으로 함축된다. 그렇다면 발진출력광의 어떠한 인자가 잔류채널들의 과도응답 특성을 반영하는지 살펴볼 필요가 있다. 먼저 과도응답의 특성을 overshoot 폭(A), 이완주파수(relaxation oscillation frequency,  $\Omega$ ), 감쇠도(damping factor, D)의 세 가지로 인자로서 표현할 수 있다. 평균밀도반전율의 변화분  $\Delta \bar{n}_2(t)$ 는 과도응답과 정상상태(고정이득)에서의 평균밀도반전율의 차이를 나타내며, 위의 과도응답 특성인자(A,  $\Omega$ , D)에 의해 평균밀도반전율의 과도응답을 식(1)과 같이 정의할 수 있다. ADM채널의 분기 또는 결합 전후의 발진출력광의 과도응답은 EDFA 이득의 순시변화와 고정된 공진기 손실의 시간 적분에 의해 식(2)와 같이 표시된다. 적분된 평균밀도반전율 차이는 식(3)과 같이 표시되며, 발진출력광의 변화율은 식(4)와 같이 정상상태 및 초기의 발진출력광의 비율로서



(a) 평균밀도반전율의 과도응답



(b) 입력



(c) 출력

그림 7. 고정이득 EDFA에서 ADM채널의 분기에 따른 과도응답의 모의분석

정의한다. 결국 식(4)에서 보는 것처럼 정상상태에서의 발진출력광  $\tilde{l}_{out}(\infty)$ 은 A, D가 클수록 초기 발진출력  $\tilde{l}_{out}(-0)$ 에 대해 큰 변화율을 보인다. 즉 overshoot가 심할수록 (A가 클수록) 정상상태 돌입시간이 길수록 (D가 클수록) 변화율은 크게 나타난다. 이를 통해 ADM채널의 분기 또는 결합 전후에서 발진출력광의 변화율을 통해 잔류채널들의 과도응답 특성을 추정할 수 있다.

$$\bar{n}_2(t) = \bar{n}_2^{clamp} + \Delta \bar{n}_2(t), \quad \Delta \bar{n}_2(t) = A e^{-t/D} \sin(\Omega t) \quad (1)$$

$$\tilde{l}_{out}(t) = \exp[\alpha_t L \sum_i \Delta \bar{n}_2(t_i)] \tilde{l}_{out}(-0) \quad (2)$$

$$\sum_i \Delta \bar{n}_2(t_i) \approx \pm \frac{A}{\sqrt{(1/D)^2 + \Omega^2}} e^{-t/D} \sin(\Omega t \pm \theta) \pm \frac{A\Omega}{\sqrt{(1/D)^2 + \Omega^2}}, \quad \theta = \Omega D \quad (3)$$

$$\tilde{l}_{out}(\infty) / \tilde{l}_{out}(-0) \propto \exp\left[\pm \frac{A\Omega}{\sqrt{(1/D)^2 + \Omega^2}} \alpha_t L\right] \quad (4)$$

여기서  $\tilde{l}_{out}(-0)$ ,  $\tilde{l}_{out}(t)$ 는 초기 및 시점 t에서의 발진출력광자 flux,  $\alpha_t$ 은 발진광의 이득 및 흡수계수의 합, L은 EDF의 길이,  $\Delta \bar{n}_2(t_i)$ 는 평균밀도반전율의 변화분이다. 식(3), (4)에서 +는 분기될 경우, -는 결합될 경우이다.

그림 6.(a), (b)에서 C-band EDFA의 발진과정에 따른 발진출력광의 과도응답 특성과 매우 동일한 경향을 보여 준다. 즉 단파장의 발진출력광에서 overshoot가 작게 나타나고 이 완주파수가 더 빠른 경향을 볼 수 있다. 또한 발진출력광 변화율의 경우 단파장인 1570nm의 경우가 320mV/200mV= 1.6로서 1595nm의 경우 80mV/40mV=2에 비해 작음을 알 수 있다. 이로부터 신호출력광의 과도응답 특성은 1570nm 전방발진인 경우가 더 나을 것으로 생각된다. 더군다나, 식(4)에서 발진광의 흡수 및 방출계수의 합이 1570nm의 경우가 1595nm 보다 더 크다는 것을 감안하면 과도응답 특성은 더욱 양호함을 알 수 있다. 앞서 언급했던 것처럼 단파장 발진광일 수록 C-band에서의 자연방출광이 많이 줄게 되어 발진출력광은 크게 나타나기 때문에 변화율도 작게 나타나는 것은 당연하다.

3. 후방 발진과장에 따른 과도응답 특성

그림 1의 양방향 펌프 고정이득 L-band EDFA에서 고리형 공진기의 광고립기의 방향을 바꾸어 후방 발진광(1570.08nm, 1594.8nm)으로써 전방으로 가해진 1582nm ADM채널에서 동일한 고정이득(23dB)을 유지하도록 한다. 그림 8은 1570nm, 1595nm 파장의 두 후방 발진광, 110mA 주입된 1582nm 파장의 전방 신호입력광이 동일한 평균밀도반전율을 유지할 경우에 전후방관측단 OSA에서 본 전후방광출력 스펙트럼이다.

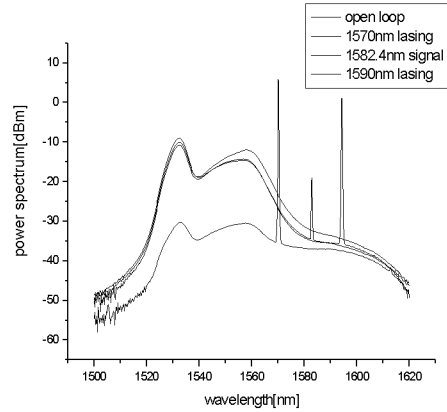
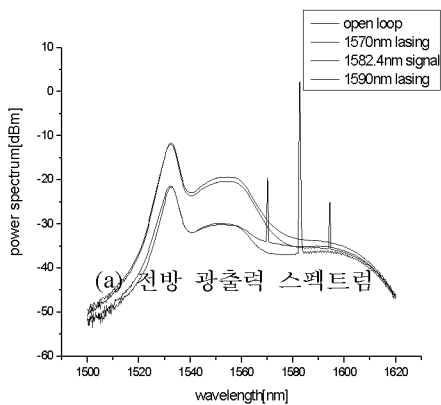


그림 8. 후방발진 고정이득 L-band EDFA의 전후방광출력 스펙트럼



(b) 후방 광출력 스펙트럼

그림 5에서의 전방발진광의 경우와 비교해 볼 때, 전방 자연방출광은 늘어나고 반면에 후방 자연방출광은 줄어든다. 이와 같이 되는 이유는 전방입력광과 후방입력광에 의해 동일한 평균밀도반전율을 가진다고 할 때, 그림 9에서 보는 것처럼 여기 밀도 분포는 달리 나타난다. 즉, 후방입력광의 경우 전방입력광에 비해 EDFA 초단에서 증폭되어 커서 여기밀도가 작아지고 EDFA 종단에서는 작아서 여기밀도가 크게 나타난다. 따라서 그림 8의 후방 발진광의 경우, 그림 5의 전방 발진광에 비해 EDFA 초단에서 작아진 여기밀도로 인해 후방 자연방출광은 줄어들고 반면에 EDFA 종단에서는 커진 여기밀도로 인해 전방 자연방출광이 커지는 양상을 갖게 된다.



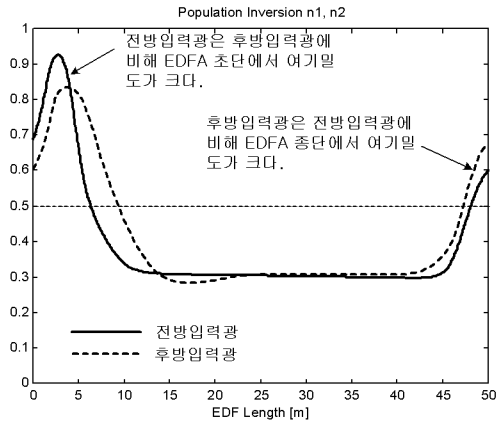
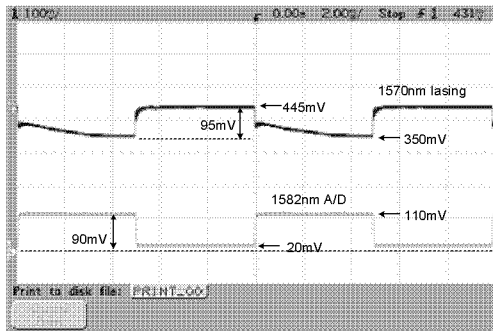


그림 9. 동일한 평균이득반전율하에서 전후방 입력광에 따른 여기밀도 분포

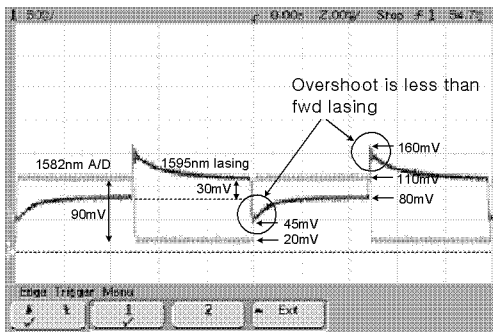
전방발진과 동일하게 변조된 1582nm ADM채널을 전방향으로 입력하고, 1570nm, 1595nm 파장으로 후방발진시켜 1582nm의 ADM채널에 대해 23dB로 이득을 고정시킨다. 그림 10.(a), (b)에서 보는 것처럼 두 발진 파장에 의해서 이득 고정된 1582nm ADM채널출력광 파형이 전방관측단의 oscilloscope에서 110mV로서 관측되고 앞서의 전방발진의 경우와 동일한 이득으로 고정되었음을 알 수 있다. 또한 후방관측단 oscilloscope에서 본 1570nm, 1595nm 발진출력광 파형이 그림 10.(a), (b)에 나와 있다. 마찬가지로 C-band EDFA의 발진파장에 따른 발진출력광의 과도응답 특성과 매우 동일한 경향을 보여 준다. 즉 단파장의 발진출력광에서 overshoot가 작게 나타나고 이완주파수가 더 빠른 경향을 볼 수 있다. 또한 발진출력광 변화율의 경우 단파장인 1570nm의 경우가  $425\text{mV}/330\text{mV}=1.29$ 로서 1595nm의 경우  $90\text{mV}/60\text{mV}=1.5$ 에 비해 작

음을 알 수 있다. 이로부터 잔류채널의 과도응답 특성은 1595nm 후방발진에 비해 1570nm 후방발진인 경우가 더 나을 것으로 생각된다. 또한 앞서 전방발진의 경우와 비교하면 1570nm, 1595nm의 발진 파장에 대해 각각 발진출력광 변화율이  $1.6 \rightarrow 1.29$ ,  $2 \rightarrow 1.5$ 로서 발진출력광 변화율이 더 작게 나타난다. 따라서 잔류채널의 과도응답 특성에 있어서, 후방발진인 경우가 전방발진인 경우보다 낮고 1570nm가 1595nm 보다 낮다는 결론이다. 이는 그림 6.(b)와 그림 10.(b)의 1595nm 발진출력광 파형을 비교해 보면 극명하게 드러난다. 그런데 그림 1.의 실험 셋업에서 전후방관측단의 손실이 거의 같다고 추정되는데 이로부터 그림 6.과 그림 10.의 발진출력광파형을 보면 후방발진인 경우가 크고 발진출력광 차이는 작아짐을 볼 수 있다. 이것은 후방발진광의 형성 과정을 살펴보면 이해하기 쉬울 것 같다. 가령 초기에 큰 후방 자연방출광이 공진기 손실을 경험하고 다시 후방으로 입력되는 경우와 그에 반해 초기에 작은 전방 자연방출광이 동일한 공진기 손실을 경험하고 다시 전방으로 입력되는 경우를 비교해 보면, 궁극적으로 정상상태에 돌입하게 되면 초기에 큰 광파워를 가진 쪽이 크게 됨을 고려할 수 있다. 또 다른 면으로 보면 그림 12.에서 전방펌프입력광파워가 후방펌프입력광파워보다 커서 전방발진에 비해 후방발진에 의해 여기밀도가 떨어진 EDFA 초단에서 당연히 후방 자연방출광이 더 많이 작아져 총 전후방 자연방출광은 전방발

진에 비해 많이 줄어들기 때문에 결국 발진출력광이 커지고 이로 인해 발진출력광의 변화율이 줄어들어 잔류채널의 과도응답 특성이 향상된다고 볼 수 있다. 그러나, 전방 신호입력에 대해서 후방발진의 경우가 전방발진에 비해 과도응답 특성이 양호한 반면 잡음지수 측면에서는 전방 자연방출광이 커서 악화된다는 단점이 있다.



(a) 1570nm 발진



(b) 1595nm 발진

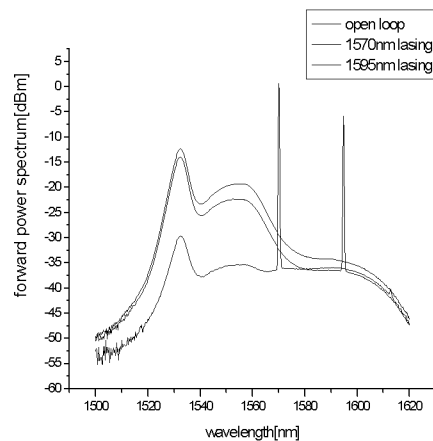
그림 10. 후방 발진출력광과 1582nm ADM채널출력광의 과도응답(20mV bias, 0.16V/mW 1830C PD 감도)

#### 4. 전후방 발진과장에 따른 과도응답 특성

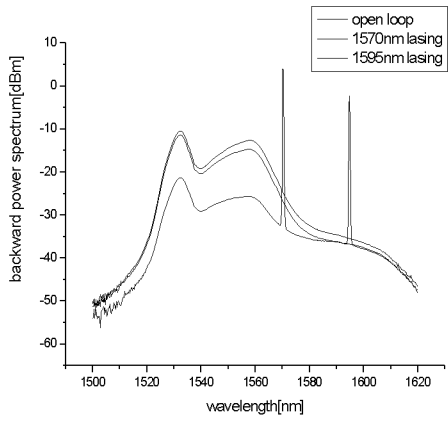
양방향 펌프 고정이득 L-band EDFA에서 고리형 공진기의 광감쇠기를 제거하여

1570.08nm, 1594.8nm 파장으로 동시에 전후방발진을 일으켜 1582nm 파장에서 동일한 고정이득(23dB)을 만든 후, 1582.4nm ADM채널의 과도응답과 두 파장에서의 전, 후방 발진광의 과도응답을 비교하였다. 이를 위해 각 경우에 대해 동일한 이득을 갖도록 공진기의 광감쇠기를 조정하여 L-band 영역의 스펙트럼을 최대한 일치하게 하였다.

그림 11.은 1570nm, 1595nm 파장의 전후방 발진광이 동일한 평균밀도반전을(1582nm 파장에서 23dB 고정이득, 약 36%)을 유지할 경우에 전후방관측단 OSA에서 본 전후방광출력 스펙트럼이다. 그림 6.에서의 전방발진인 경우, 그림 10.에서의 후방발진인 경우와 비교해 볼 때, 전후방발진일 경우의 전후방 자연방출광은 이들의 중간적인 특성을 가진다.



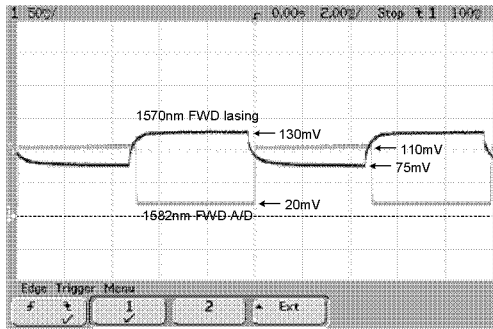
(a) 전방광출력 스펙트럼



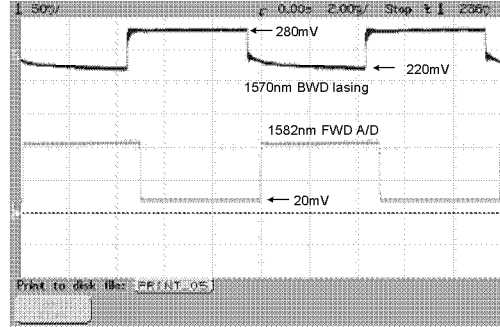
(b) 후방광출력 스펙트럼

그림 11. 전후방발진 고정이득 L-band EDFA의 전, 후방광출력 스펙트럼

앞서의 전방 및 후방발진과 동일하게 변조된 1582nm ADM채널을 전방향으로 입력하고, 1570nm, 1595nm 파장으로 전후방발진시켜 1582nm의 ADM채널에 대해 23dB로 이득을 고정시킨다. 그림 12와 그림 13에서 보는 것처럼 두 발진 과정에 의해서 이득

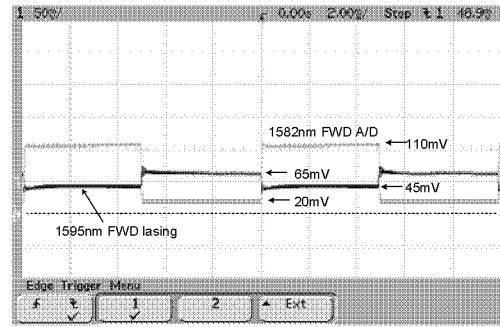


(a) 1570nm 전방발진

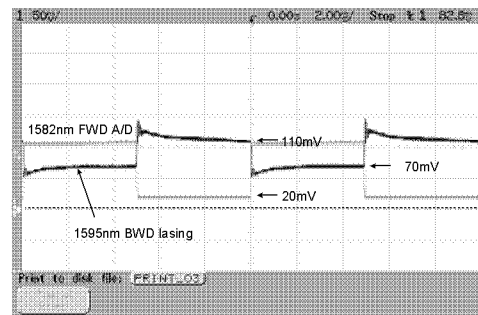


(b) 1570nm 후방발진

그림 12. 1570nm 전후방 발진출력광과 1582nm ADM채널출력광의 과도응답(20mV bias, 0.16V/mW 1830C PD 감도)



(b) 1595nm 전방발진



(b) 1595nm 후방발진

그림 13. 1595nm 전후방 발진출력광과 1582nm ADM채널출력광의 과도응답(20mV bias, 0.16V/mW 1830C PD 감도)

고정된 1582nm ADM채널출력광 파형이 전방관측단의 oscilloscope에서 110mV로서 관측되고 앞서의 전방 및 후방발진의 경우와 동일한 이득으로 고정되었음을 알 수 있다. 또한 전후방관측단 oscilloscope에서 본 1570nm 전후방 발진출력광 파형이 각각 그림 12.(a), (b)에 나와 있다. 여기서 전후방 발진광이 동일한 평균밀도반전율의 과도응답을 경험하기 때문에 사실상 발진출력광 변화율이 같아야 한다. 그런데 전방 발진광의 경우  $110\text{mV}/55\text{mV}=2$ 이고 후방 발진광의 경우  $260\text{mV}/220\text{mV}=1.3$ 으로서 다르다. 이것은 예상과 너무 다르다. 억지로 맞춘다면 전방 발진광의 경우  $110\text{mV} \rightarrow 100\text{mV}$ ,  $55\text{mV} \rightarrow 65\text{mV}$ 으로 가정하면 발진출력광 변화율은 약  $100\text{mV}/65\text{mV}=1.4$ 이고 후방 발진광의 경우  $260\text{mV} \rightarrow 270\text{mV}$ ,  $200\text{mV} \rightarrow 190\text{mV}$ 로서 가정하면 발진출력광 변화율은  $270\text{mV}/190\text{mV}=1.4$ 로서 같게 된다. 또한 전후방관측단 oscilloscope에서 본 1595nm 전후방 발진출력광 파형이 각각 그림 13.(a), (b)에 나와 있다. 여기서 전방 발진광의 경우  $45\text{mV}/25\text{mV}=1.8$ 이고 후방 발진광의 경우  $90\text{mV}/50\text{mV}=1.8$ 로서 같음을 볼 수 있다.

표 1 발진파장 및 방향에 따른 잔류채널의 과도응답 특성

발진파장 및 방향	발진광출력 변화율	최대 발진광 출력[mV]	차이[mV]
1570nm 전방발진	1.6	320	120
1595nm 전방발진	2	80	40
1570nm 후방발진	1.29	425	95
1595nm 후방발진	1.5	90	30
1570nm 전후방발진	1.4	$110+260=370$	
1595nm 전후방발진	1.8	$45+90=135$	

이로부터 잔류채널의 과도응답 특성은 발진출력광 변화율에 근거하여 표 1.과 같이 후방발진이 가장 좋고, 그 다음이 전후방발진, 전방발진이 가장 좋지 않은 것으로 판단된다. 또한 1570nm 파장에서의 발진이 1595nm 파장에서의 발진보다 잔류채널의 과도응답 특성이 더 양호하다고 생각된다.

잔류채널의 과도응답 특성을 발진광출력 변화율로부터 추정할 수 있는데 이로부터 발진광출력이 크면 과도응답이 작아진다는 결론이다, 따라서 발진광에 의해 많이 포화가 되면 될 수록 (즉 고정이득이 낮아질수록, 평균밀도반전율이 떨어질수록), 동일한 수의 신호채널들이 분기 또는 결합될 경우 작은 수의 채널일수록 (즉 4채널↔8채널 경우보다 2채널↔6채널의 경우) 과도응답 특성이 좋다고 볼 수 있다.

### III. 비균일에 의한 이득 변화

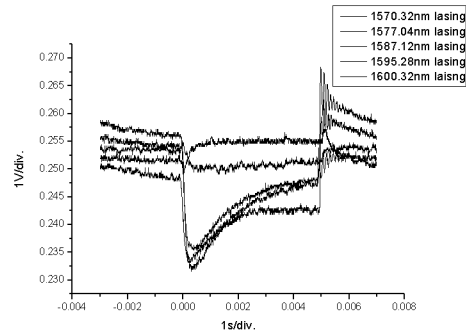
#### 1. C-band 및 L-band EDFA에서 비균일에 의한 이득 변화 양상

여러 파장의 포화광에 비해 그와 동일한 평균밀도반전율을 유지하면서 단일 파장의 포화광에 의해 나타나는 L-band EDFA의

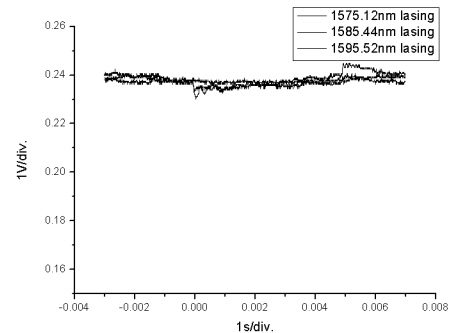
비균일 특성(inhomogeneous)에 의한 이득저하의 양상은 포화광이 장파장으로 갈수록 또는 포화광파워가 작아 큰 평균밀도반전율로 올라갈수록 커지는 경향이 있고 또한 넓은 대역에 걸쳐서 이득 저하가 나타난다. 반면에 C-band EDFA의 경우에는 포화광이 단파장으로 갈수록 또는 포화광파워가 커서 작은 평균밀도반전율로 떨어질수록 커지는 경향이 있고 또한 포화광을 중심으로 매우 좁은 대역에 걸쳐서 이득 저하가 나타난다. 이 두 가지의 양상을 비교해 보면 이러한 이득 저하의 원인이 C-band의 경우에는 포화광 자체의 광파워에 의해 지엽적으로 이득 저하를 야기시킨다고 볼 수 있고 반면에 L-band의 경우에는 넓은 대역에 걸쳐 존재하는 전후방 자연방출광파워에 의해 광대역으로 이득 저하를 야기시키는 것으로 해석할 수 있다. 즉 L-band의 경우 장파장의 포화광에서 전후방 자연방출광파워가 크기 때문에 장파장으로 갈수록 이득저하가 크게 나타나는 것이고 또한 포화광파워가 작아 큰 평균밀도반전율의 조건에서 전후방 자연방출광파워가 크기 때문에 역시 큰 이득저하를 야기시키는 것으로 해석된다. 2. 전방발전 파장에 따른 비균일에 의한 이득저하 양상

그림 1에서 후방관측단 대신에 1591nm의 uncooled DFB LD를 부착하여 잔류채널로서 활용하고 1582nm의 ADM채널이 분기 결합될 경우에 1591nm 잔류채널의 과도응답 특성을 확인하고자 한다. 1591nm 잔류채널(25mA 주입 시 -8.44dBm출력에 10dB

감쇄기를 사용하여 -19dBm을 입력)을 가하고 앞서와 동일한 고정이득(1582nm, 1591nm에서 약 23dB) 조건을 유지하도록



(a) 0~7.5mW ADM채널



(b) 0~4mW ADM채널

그림 14. 전방발전 파장에 따른 1591nm 잔류채널의 비균일에 의한 이득저하 특성(감도:1.6V/mW)

1570.32nm, 1577.04nm, 1587.12nm, 1595.28nm, 1600.32nm의 5가지 파장에서 전방발진을 일으키고 1582nm ADM채널은 0~7.5mW(90mA 주입) 및 0~4mW(60mA 주입)로서 100Hz 전류변조를 가했을 때, 그림 14.(a), (b)와 같이 1591nm 잔류채널의 과도응답을 전방관측단의 oscilloscope에서 확인할 수 있다.

그림 14.(a)에서 보면 1582nm의 ADM채널

이 7.5mW→0와 같이 분기 될 때 발진광이 이를 보상하여 커지면서 비균일 이득저하에 의해 1591nm의 잔류채널의 광파워가 떨어짐을 볼 수 있다. 그 경향은 앞서 언급한 것처럼 장파장 발진일수록 1591nm의 잔류채널의 광파워가 심하게 떨어짐을 확인할 수 있다. 엄밀하게는 1582nm ADM채널, 발진광, 1591nm 잔류채널의 조합으로 생각해야 하기 때문에 좀 더 복잡한 양상을 띠지만 분기 전후의 전후방 자연방출광파워를 비교해 볼 때 발진광이 장파장일수록 전후방 자연방출광파워가 커지기 때문에 이득저하가 심화된다는 것은 타당한 것이다.

그림 14.(b)는 1582nm ADM채널 분기 결합을 0~4mW로서 그림 14.(a)의 0~7.5mW의 경우에 반 정도로 할 경우 1591nm 잔류채널의 이득저하 양상을 보여 준다. 그림 14.(a)의 경우 0.24~0.26V의 변화를 보이는 반면 그림 14.(b)의 경우에는 0.24V 근처에서 장파장 발진의 경우에 약간의 변화를 볼 수 있고 대체적으로 매우 작은 변화를 보인다. 이것은 ADM채널의 변화가 작아 역시 발진광의 변화도 작음을 의미하고 전후방 자연방출광파워의 변화가 미미한 이유이다.

3. 후방발진 파장에 따른 비균일에 의한 이득저하 양상

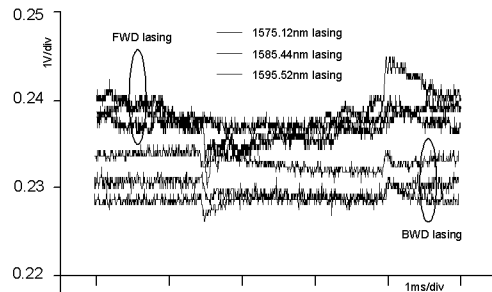


그림 15. 0~4mW ADM채널 입력 시에 전방 및 후방 발진광에 따른 1591nm 잔류 채널의 비균일 이득저하 특성(감도:1.6V/mW)

그림 1.에서 공진기의 광고립기의 방향을 반대로 하여 후방발진 시켰을 경우 동일한 고정 이득 조건하에서 발진파장에 따른 1591nm 잔류 채널의 과도응답 특성은 그림 15.와 같고 잔류채널의 비균일 이득저하 양상은 그림 14.(b)에 비해 작게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 전체적인 전후방 자연방출광파워가 전방발진에 비해 작기 때문에 비균일 이득저하 양상이 작게 나타나는데 기인한 것으로 보인다.

V. 결 론

양방향 펌프 구조 고정이득 L-band EDFA에서 발진방향 및 파장에 따른 잔류채널의 과도응답 특성 및 비균일 이득저하 특성에 관해 살펴보았다. 먼저 잔류채널의 명확한 과도응답을 관측하기가 곤란하여 발진출력광 변화율에 근거하여 추정할 수 있다는 타당한 근거를 제시하였다. 이를 근거로 해서 발진방향에 있어서는 후방발

진이 가장 좋고, 그 다음이 전후방발전, 전방발전이 가장 좋지 않은 것으로 판단된다. 또한 단파장 발전이 장파장에서의 발전보다 잔류채널의 과도응답 특성이 더 양호하다고 생각된다. 이와 같이 되는 이유는 동일한 고정이득 조건에서 단파장 후방 발전에 의해 이득이 고정될 때 전후방 자연방출광이 가장 많이 줄어들어 발전출력광이 가장 큰데 기인한 것이다.

또한 L-band EDFA에서의 비균일 특성은 전후방 자연방출광에 의해 넓은 L-band에 걸쳐서 이득저하를 야기시키는 경향을 가지고 있다. 따라서 단파장 후방발전의 경우에 전후방 자연방출광이 가장 작아 이러한 이득저하의 양상이 가장 작게 나타남을 확인할 수 있었다.

결론적으로 단파장 후방발전의 경우가 과도응답 측면에서 가장 양호한 특성을 나타내는 것으로 보여지지만 전방으로 입력된 신호채널들의 잡음지수 측면에서는 전방 발전에 비해서 별로 좋지 않다는 결론이다.

## 참고문헌

1. Jyung Chan Lee, Hee Sang Chung, Wang-Yuhl Oh, and Moo-Jung Chu, "The wavelength dependent transient effect in surviving channels in L-band EDFA", OFC 2002, pp. 646-647, 2002.
2. D. Gurkan, M.I. Hayee, and A. E. Willner, "Transient behavior of L-band and C-band EDFAs in an add/drop multiplexed 40-channel WDM network", CLEO 2001, pp. 415-416, 2001.
3. Ali Reza Bahrampour and Mahyar Mahjoei, "Theoretical analysis of spectral hole burning and relaxation oscillation in all-optical gain stabilized multichannel erbium-doped fiber amplifier(EDFA)", J. Lightwave Technol., vol. 19, pp. 1130-1139, 2001.
4. Felton A. Flood, "Gain saturation behavior in L-band EDFAs", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 12, pp. 1156-1158, Sep. 2000.
5. E. Rudkevich, D. M. Baney, J. Stimple, D. Derickson, and G. Wang, "Nonresonant spectral-hole burning in erbium-doped fiber amplifiers", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 11, pp. 542-544, May. 1999.
6. Felton A. Flood, "Impact of inhomogeneous broadening on L-band EDFA gain spectra", ECOC'99, pp. 148-149, 1999.