

이중경로증폭 선형공진 고정이득 L-band EDFA에서 발진 파장 및 방향에 따른 과도응답 특성

정회원 김익상*

The Characteristics of Transient Response According to Lasing Wavelengths and Propagation Directions in Double-Pass Gain-Clamped L-band EDFA with Linear Cavity

Ik-Sang Kim* *Regular Member*

요약

본 논문에서는 고효율 증폭 기능을 가지는 이중경로증폭 구조의 고정이득 L-band EDFA를 구현하였다. 선형공진기로부터 생성된 발진광에 의해 신호채널들이 분기결합 되더라도 잔류채널의 요동을 줄일 수 있다. 잔류채널의 과도응답 특성에 대해 발진출력광 변화율이라는 정량적인 척도를 제시하였고 이를 이용해 발진파장 및 발진방향에 따른 과도응답 특성을 측정하였다. 결과적으로 단파장 및 펄프광의 반대 방향으로 전파하는 후방 발진광이 가장 양호한 것으로 판명되었다.

Key Words : L-band erbium doped fiber amplifier, automatic gain control, transient response

ABSTRACT

We implemented DPGC(Double-Pass Gain-Clamped) L-band EDFA for highly efficient amplification. A lasing signal generated within the linear cavity, can minimize the fluctuation of surviving channels when several WDM(Wavelength Division Multiplexing) channels are added or dropped. The new method measuring the characteristics of transient response of surviving channels quantitatively is suggested. It is to measure the ratio of lasing output before add or drop to that after add or drop. We investigated dynamic characteristics by using this method according to lasing wavelengths and propagation directions within the cavity. Experimental measurements show that the short lasing wavelength and backward propagation direction is the best condition for small fluctuation of surviving channels.

I. 서론

광선로상에 신호광의 손실을 보상해 주는 EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)는 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 전송속도를 급상승시켰다. 특히 WDM 광통신망의 한 노드에 위치한 EDFA의 입력단에서 WDM 채널들이 분기 또는 결합될 때, 이득이 달라져 통과되는 신호채널들의 출력변화가 나타난다. 이러한 신호채널들의 출력변화는 수신단에서 통신성능의 저하를 초래하기 때문에 이를 억제할 필요가 있다. 이를 위해 이득을

* 배재대학교 정보통신공학과 전자파응용연구실 (iskim@pcu.ac.kr)

논문번호: KICS2006-02-073, 접수일자: 2006년 2월 9일, 최종논문접수일자: 2006년 6월 9일

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 펌프광을 제어해 주는 방식들이 있다. 이와 같이 고정이득 EDFA에 의해 신호채널들의 출력변화는 억제되지만 순간적으로 나타나는 미소한 출력 요동(과도 응답)이 통신 성능을 떨어뜨리 이를 억제하기 위한 연구가 이루어져 왔다.^[1~4] 또한 이중경로증폭 구조의 EDFA는 신호채널이 반사경에 의해 반사되어 이중으로 EDF를 전파해 가면서 증폭되기 때문에 증폭 효율이 좋을 뿐만 아니라 분산 보상 기능을 가진 반사경을 구성할 수 있다는 면에서 장점을 가지고 있다.^[5] 그러나 잡음지수의 악화라는 단점을 갖고 있어서 이를 향상하기 위한 연구 결과가 있다.^[6, 7]

본 논문에서는 이중경로증폭 구조를 가지는 L-band EDFA에 선형공진기를 구성해서 이득을 일정하게 고정시키도록 DPGC(Double Pass Gain Clamped) L-band EDFA를 구현하였다. 선형공진기 내를 순환하는 발진광의 파장 및 반사경의 반사율 조합에 따른 신호채널들의 과도응답 특성에 대한 결과를 보여 주고자 한다.

II. 실험 셋업 및 구동 조건

2.1 DPGC L-band EDFA의 구현

L-band에서의 효율적으로 이득을 크게 하기 위해서 그림 1과 같이 30m 길이의 고밀도 EDF와 EDF 초단에 1500nm 영역의 신호광과 980nm 펌프광을 결합하는 양방향 WDM coupler, 한 개의 980nm 펌프 레이저 다이오드(LD, laser diode)를 사용하였다. 나중에 종종 참조할 전방 및 후방의 방향 기준, 초단 및 종단의 위치 기준이 그림 1에 명시되어 있

다. 주입전류 변조된 1582.4nm의 cooled DFB-LD는 전방으로 입력된 분기결합(ADM, Add Drop Multiplexing) 채널로서 활용하고 다른 1590nm LD는 잔류채널로서 활용한다. 또한 전후방 광출력 스펙트럼을 보기 위해 광스펙트럼분석기(OSA, Optical Spectrum Analyzer)를 사용하고 ADM채널 또는 발진광, 잔류채널의 과도응답 파형을 관측하기 위해 광여파기(OBPF, optical bandpass filter), 수광소자(PD, photodetector), 오실로스코프를 사용하는 A 후방관측단 및 B 전방관측단이 그림 1에 표시되어 있다. 또한 반사율이 99%이고 중심파장이 1570nm 및 1590nm의 광섬유격자(FBG, fiber Bragg grating)를 사용하여 선형공진기의 좌측반사경 R_2 를 구성하고, 선형공진기의 우측반사경 R_1 은 광회전기(OC, optical circulator)만을 사용하여 광대역반사경으로서 이득을 고정시키기 위한 발진광 이외에 신호광 및 전방 자연방출광을 반사시키게 된다. 여기서 광대역반사경을 사용한 이유는 구조가 간단해질 뿐만 아니라 발진광 파장의 안정성을 유지할 수 있기 때문이다. 그러나 이로 인해 EDFA의 이득포화특성이나 잡음지수 측면에 있어서는 다소 악화시키는 요인이 된다.

그림 1에서 신호입력광은 EDF를 전파해서 증폭되고 종단에 위치한 광대역 반사경 R_1 에 의해 반사되어 다시 EDF를 전파해서 이중으로 증폭되어 OC를 거쳐서 후방관측단 A로 출력된다. 이와 같은 이중경로증폭 구조는 등가적으로 단일 펌프광이 두 개의 양방향 펌프광으로 동작하고 EDF 길이 역시 두 배가 되는 효과를 가진다. 따라서 큰 이득을 얻을 수 있는 장점은 있지만 전방 자연방출광이 EDF 종단에 위치한 광대역 반사경에 의해 반사되어 EDF 초단으로 되돌아와 출력되기 때문에 잡음지수가 상당히 크다는 단점을 가지고 있다. 또한 동일한 펌프입력광파위에 대해서 단일경로증폭 구조에 비해서 작은 신호입력광파위로써 포화가 빨리 나타난다.

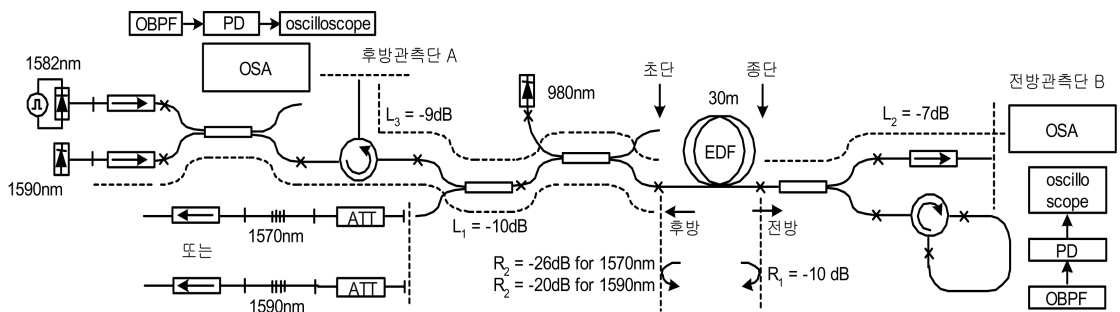


그림 1. DPGC L-band EDFA 실험 셋업

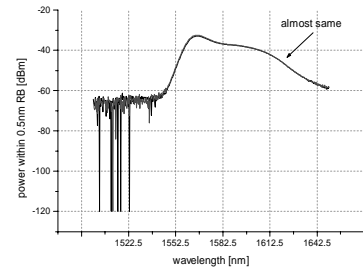
이러한 이중경로증폭 구조에서 이득을 고정하기 위해 선형공진기를 구성해서 특정 파장의 발진광을 생성함으로써 신호입력광 채널들의 분기 및 결합이 일어날 때 잔류채널의 이득에 영향을 주지 않도록 한다. 다시 말해서 발진광이 분기 및 결합에 의한 신호입력광의 변화분을 보상하도록 발진입력광파워를 자동적으로 조정하여 항상 일정한 EDFA의 입력 광파워를 유지함으로써 EDFA의 일정한 평균밀도반전율을 유지하게 되고 이로부터 잔류채널의 이득을 일정하게 고정시키게 된다.

그림 1의 선형공진기로부터 발진되는 과정은 다음과 같다. EDF 한 지점의 매우 미약한 자연방출광이 전파해서 두 반사경으로부터 반사되어 원래의 위치로 되돌아왔을 때 원래 시작점의 자연방출광과 보강간섭이 일어나고 왕복 전파경로 손실을 극복하는 이득이 형성되면 수 많은 다중 반사된 미약한 자연방출광의 보강간섭 의해 발진이 일어나게 된다. 여기서 EDFA의 신호대역의 고정이득을 형성하기 위한 발진광의 고정이득 G_L 은 다음 식 (1)과 같이 두 반사경의 반사율 R_1, R_2 에 의해 결정된다.

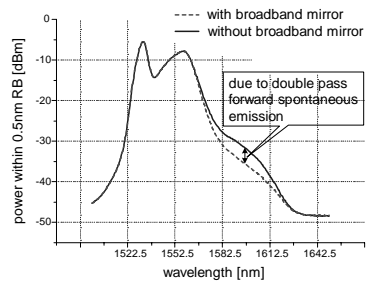
$$G_L = 1/\sqrt{R_1 R_2} \quad (1)$$

2.2 이중경로증폭 구조에서의 이득포화특성

그림 1과 같이 30m 길이의 고밀도 EDF를 사용하여 L-band에서 증폭이 일어나도록 하였고 약 190mW의 980nm 펌프광을 EDF에 주입하여 개회로 소신호에서 약 41%의 평균밀도반전율을 유지하도록 하였다. 그림 2는 좌측반사경에서 반사가 없도록 하여 공진기가 구성되지 않은 상태에서 우측 광대역반사경의 유무에 따른 A, B 후방 및 전방관측단에서의 자연방출광 스펙트럼을 보여 준다. B 전방관측단에서 두 경우 모두 전방 자연방출광에 있어 비슷한 이득 프로파일을 보여 준다. 반면에 A 후방관측단에서 광대역반사경이 있는 경우에 L-band 영역에서 좀 더 큰 광파워를 보여 주는데 이는 후방 자연방출광과 이중경로증폭된 전방 자연방출광이 섞여져 나온 때문이다. 엄밀하게는 동일한 펌프입력 광파워에 의해 여기된 EDFA에서 B 전방관측단에서 보여 지는 전방 자연방출광의 이득 프로파일이 이중경로증폭 구조에서 더 떨어져야 하는데 그 이유는 이중 증폭된 전방 자연방출광에 의해 좀 더 포화됨으로써 이득을 더 떨어뜨리게 되기 때문이다. 그러나 B 전방관측단에서 비슷한 이득 프로파일로 보여 지는 것은 이중 증폭된 전방 자연방출광이



(a) B 전방관측단에서의 스펙트럼



(b) A 후방관측단에서의 스펙트럼

그림 2. 광대역반사경의 유무에 따른 A, B 후방 및 전방관측단에서의 스펙트럼

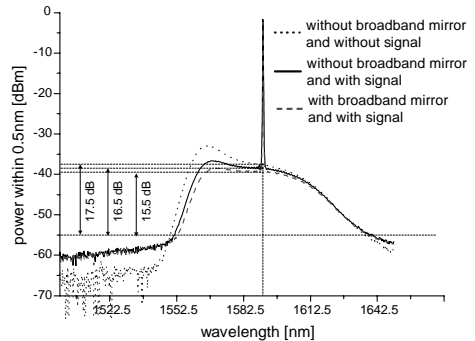


그림 3. 소신호, 단일경로증폭, 이중경로증폭에 따른 B 전방관측단에서의 스펙트럼

크지 않아 평균밀도반전율을 그리 많이 떨어뜨리지 않는 것으로 나타난다.

그림 3은 1590nm의 신호광이 EDF 초단에 약 -7dBm 광파워로서 입력되어 증폭되었을 때 좌측반사경 없이 광대역반사경의 유무에 따른 B 전방관측단에서의 스펙트럼 및 광대역반사경이 없이 소신호 입력의 경우 B 전방 관측단에서의 스펙트럼을 보여 준다. 광대역반사경이 있을 경우에 B 전방관측단에서 보여 지는 신호출력광이 광대역반사경이 없을

경우에 비해 더 작게 나타남을 볼 수 있다. 그 이유는 앞서 언급한 것처럼 신호입력광이 광대역반사경으로부터 반사되어 이중경로증폭을 경험함으로써 광대역반사경이 없는 단일경로증폭에 비해 평균밀도 반전율을 더 떨어 뜨려 단일경로 이득이 줄어들기 때문이다. 그림 4에서 이중경로증폭의 경우에 단일경로 이득이 단일경로증폭에 비해 작은 신호입력광에서 포화가 빨리 나타남을 볼 수 있다.

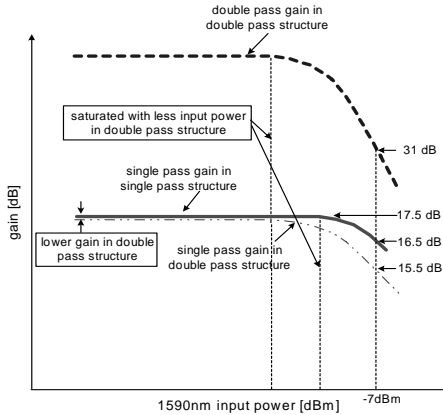


그림 4. 단일경로증폭, 이중경로증폭에 따른 1590nm 신호광의 이득특성

2.3 고정이득 동작점 설정

앞서 식(1)에서와 같이 선형공진기의 두 반사경의 반사율 R_1, R_2 에 의해 발진광의 이득 G_L 이 고정되고 이로부터 신호채널의 이득도 고정된다. 동일한 고정이득 G_L 을 형성하는 반사율 R_1, R_2 는 매우 다양하게 존재하며 식(2)와 같이 반사율 조합계수 k 를 정의하여 나타낼 수 있다.

$$R_1 = \frac{\kappa}{G_L}, R_2 = \frac{1}{\kappa G_L} \quad (2)$$

가령 k 가 $1/G_L$ 인 경우에는 R_2 는 1의 값을 가지므로 완전반사이고 R_1 은 매우 작아 투과된다. k 가 1인 경우에는 R_1, R_2 가 같다. k 가 G_L 인 경우에는 R_1 은 1의 값을 가지므로 완전반사이고 R_2 은 매우 작아 투과된다. 따라서 k 는 $1/G_L$ 과 G_L 사이의 값을 가진다. 동일한 고정이득을 만족시키는 반사율 R_1, R_2 의 다양한 경우에 따라 신호채널의 잡음지수 특성 및 과도응답 특성이 달라질 수 있다. 이와 같이 동일한 고정이득 조건하에서 k 에 따른 다양한 반사율의 조합과 발진 파장에 따라서 과도응답 특성에 대해서 살펴 보고자 한다.

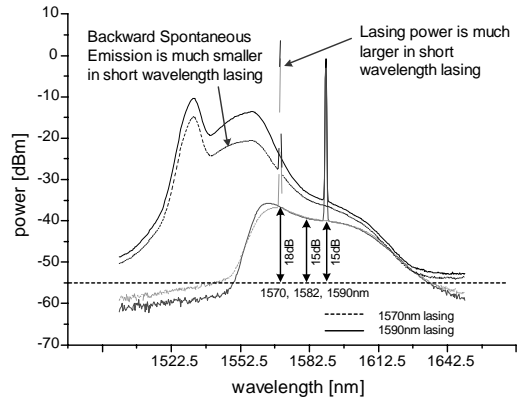


그림 5. FBG를 사용해 1570nm 및 1590nm의 발진광에 의한 이득 고정

그림 1에서 1570nm 및 1590nm의 파장에서 각각 발진이 일어나도록 FBG와 ATT를 사용하여 선형공진기를 구성하였다. 그림 5와 같이 1582nm 신호광 이득을 약 15dB로 고정하기 위해 B 전방관측단의 전방 자연방출광의 스펙트럼 프로파일이 이득 스펙트럼과 거의 동일하다는데 근거하여 1570nm 및 1590nm 발진광의 고정이득을 각각 18dB 및 15dB로 설정한다. 이를 위해 ATT를 사용하여 좌측 반사경의 반사율을 -26dB 및 -20dB로서 각각 조정하였다. 여기서 1570nm 발진광의 고정이득 G_L 은 약 18dB이고 식(1)에 의해 우측 광대역반사경 반사율 -10dB를 고려하면 좌측반사경의 반사율은 약 -26dB가 된다. 마찬가지로 1590nm 발진광의 고정 이득 G_L 은 약 15dB이고 식(1)에 의해 우측 광대역 반사경 반사율 -10dB를 고려하면 좌측반사경의 반사율은 약 -20dB가 된다.

그림 5에서 단파장인 1570nm에서 장파장인 1590nm에 비해 전후방 발진광파워가 매우 크음을 알 수 있다. 그리고 A 후방관측단에서 보는 것처럼 자연방출광이 1570nm 단파장 발진일 경우가 1590nm 장파장 발진에 비해 매우 작다는 점이다. 즉 광자 flux 보존의 법칙에 따라 동일한 평균밀도반전율에서 즉 동일한 고정이득 조건하에서 소모된 펌프광은 같고 이 펌프광이 발진광 및 전후방 자연방출광으로 소모되기 때문에 단파장에서 발진광파워가 큰 대신에 자연방출광은 장파장에 비해 줄어들 수 밖에 없는 것으로 설명된다.

III. 잔류채널의 과도응답 특성 분석 방법

이득은 일정하게 고정되더라도 WDM 신호채널

들의 분기 및 결합 시에 여전히 잔류채널들은 과도적으로 요동치게 된다. 이러한 잔류채널의 요동은 몇 단의 EDFA를 거치게 되면 전송 품질이 매우 악화된다는 연구 결과가 있다. 따라서 이와 같은 과도응답 특성을 검토하는 것은 매우 중요하다.

그런데 ADM채널들에 의해서 발생하는 과도응답 특성은 ADM채널이나 잔류채널의 출력파형에 대한 시각적인 관측으로부터 추정하기는 매우 어렵고 정확하지 않으며 정량적인 측정이 불가능하다. 반면에 발진광의 요동은 매우 명확하며 이로부터 과도응답 특성을 추정할 수 있을 것이다. 따라서 발진출력광의 변화율(CRLO, Change Ratio of Lasing Output)이라는 본 논문에서 제시하는 방법을 통해 간접적으로 잔류채널의 과도응답 특성을 정량적으로 확인할 수 있다.

DPGC L-band EDFA는 선형공진기 구조를 갖고 있어서 전후방 자연방출광이 씨앗이 되어 발진광을 생성하고 각각은 전후방관측단으로 출력된다. 과도응답 특성은 고유하기 때문에 전후방관측단에서 관측된 CRLO는 동일할 것으로 추정된다. 전방관측단에서의 발진출력광은 전후방 자연방출광에 의해 생성된 발진출력광의 합이고 후방관측단에서의 발진출력광 역시 전후방 자연방출광에 의해 생성된 발진출력광의 합으로서 생각할 수 있기 때문에 네 가지의 경우에 대한 CRLO와 과도응답 특성과의 연관성에 대해 다음과 같이 분석하고자 한다.

과도응답 특성은 그림 6과 같이 평균밀도반전율의 요동을 의미하며 진폭(Overshoot, A), 이완주파수(relaxation oscillation frequency, Ω), 감쇠도(damping factor, D)의 세 가지로 인자로서 표현할 수 있다. 평균밀도반전율의 과도응답은 평균밀도반전율의 변화분 $\Delta \bar{n}_2(t)$ 와 정상상태에서의 평균밀도반전율 \bar{n}_2^{clamp} 의 합으로서 나타나며, 과도응답 특성

인자에 의해 다음 식과 같이 모델링할 수 있다.

$$\bar{n}_2(t) = \bar{n}_2^{clamp} + \Delta \bar{n}_2(t) \quad (3.a)$$

$$\Delta \bar{n}_2(t) = \pm A e^{-t/D} \sin(\Omega t) \quad (3.b)$$

전방 자연방출광에 의해 생성된 전방관측단에서의 발진출력광의 과도응답 특성을 다음과 같이 구한다. 먼저 분기 및 결합 직전 정상상태의 발진출력 광파워인 $[I_{out}(0)]_{FWD}^+$ 이 두 반사경으로 구성된 선형공진기를 왕복하면서 순시이득 $G_I(t)$ 및 반사손실 R_1, R_2 을 경험하면서 선형공진기를 왕복하는데 걸리는 시간인 Δt 시점에서 다음 식과 같이 표시된다. 여기서 $[I_{out}(0)]_{FWD}^+$ 의 아래첨자 FWD 는 전방 자연방출광에 의해 생성된 발진광임을 의미하고 위첨자 +는 전방관측단 방향의 출력을 의미한다.

$$[I_{out}(\Delta t)]_{FWD}^+ = R_1 G_I(\Delta t/2) R_2 G_I(\Delta t) [I_{out}(0)]_{FWD}^+ \quad (4.a)$$

$[I_{out}(\Delta t)]_{FWD}^+$ 은 다시 선형공진기를 왕복하면서 순시이득 및 반사손실을 경험하면서 $2\Delta t$ 시점에서 다음 식과 같이 표시된다.

$$[I_{out}(2\Delta t)]_{FWD}^+ = R_1 G_I(3\Delta t/2) R_2 G_I(2\Delta t) [I_{out}(\Delta t)]_{FWD}^+ \quad (4.b)$$

이런 식으로 t 시점에서의 발진출력광파워는 다음 식과 같이 표시된다.

$$[I_{out}(t)]_{FWD}^+ = R_1 G_I(t - \Delta t/2) R_2 G_I(t) [I_{out}(t - \Delta t)]_{FWD}^+ \quad (4.c)$$

식(4.a), (4.b), (4.c)로부터 초기 발진출력광파워로부터 분기 및 결합 시에 평균밀도반전율이 요동치면서 정상상태로 점점 돌입하는 발진출력광파워는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{out}(t) &= R_1 R_2 G_I(t) G_I(t - \Delta t/2) I_{out}(t - \Delta t) \\ &= R_1 R_2 G_I(t) G_I(t - \Delta t/2) \times R_1 R_2 G_I(t - \Delta t) G_I(t - 3\Delta t/2) I_{out}(t - 2\Delta t) \\ &= [\prod_{k=0}^{t/\Delta t - 1} R_1 R_2 G_I(t - k\Delta t) G_I(t - k\Delta t - \Delta t/2)] \times I_{out}(0) \end{aligned} \quad (5)$$

선형공진기 반사손실 R_1, R_2 와 정상상태에서의 발진광의 이중경로 이득과의 곱은 식(1)로부터 1과 같고 이로부터 다음 식과 같이 표시된다.

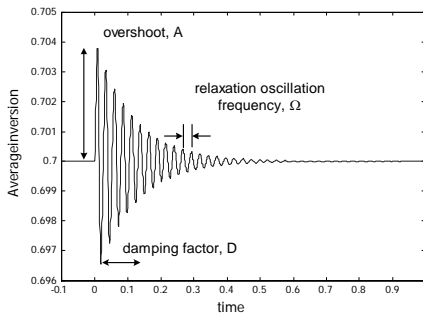


그림 6. 평균밀도반전율의 과도응답 특성인자

$$\begin{aligned}
 & R_1 R_2 G_f(t) G_f(t - \Delta t/2) \\
 &= R_1 R_2 \exp[\alpha_f(\bar{n}_2(t) - r_f^*)L] \exp[\alpha_f(\bar{n}_2(t - \Delta t/2) - r_f^*)L] \\
 &= R_1 R_2 \exp[2\alpha_f(\bar{n}_2^{clamp} - r_f^*)L] \\
 &\quad \times \exp[\alpha_f \bar{n}_2(t)L] \times \exp[\alpha_f \bar{n}_2(t - \Delta t/2)L] \\
 &\approx \exp[2\alpha_f \bar{n}_2(t)L] \tag{6}
 \end{aligned}$$

여기서 α_f 은 발진광의 이득 및 흡수계수의 합, r_f^* 는 흡수율, L 은 EDF의 길이를 나타낸다. 식(6)을 식(5)에 대입하면 결국 분기 및 결합 이후의 발진출력광의 과도응답은 다음과 같이 평균밀도반전율의 변화분 $\Delta \bar{n}_2(t)$ 에 대한 적분치의 지수함수 형태로 표시된다.

$$\begin{aligned}
 I_{out}(t) &= \exp[2\alpha_f L \sum_{k=0}^{t/\Delta t - 1} \Delta \bar{n}_2(t - k\Delta t)] I_{out}(0) \\
 &\approx \exp[2\alpha_f L \int_0^t \Delta \bar{n}_2(\xi) d\xi / \Delta t] I_{out}(0) \tag{7}
 \end{aligned}$$

식(7)에서 앞서의 평균밀도반전율의 변화분 $\Delta \bar{n}_2(t)$ 에 대한 표현식 (3.b)를 사용하여 적분하면 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 \int_0^t \Delta \bar{n}_2(\xi) d\xi &= \int_0^t \pm A e^{-\xi/D} \sin(\Omega \xi) d\xi \\
 &= \pm \frac{A}{\sqrt{(1/D)^2 + \Omega^2}} e^{-t/D} \sin(\Omega t - \theta) \pm \frac{A\Omega}{(1/D)^2 + \Omega^2} \tag{8}
 \end{aligned}$$

여기서 $\tan \theta = \Omega D$ 이다. 따라서 정상상태에서의 발진출력광파위에 대한 분기 및 결합 직전의 발진출력광파위의 비율, 즉 발진출력광 변화율 CRLO는 다음과 같이 표시된다.

$$[I_{out}(\infty) / I_{out}(0)]_{FWD}^{\pm} \approx \exp[\pm \frac{A\Omega}{(1/D)^2 + \Omega^2} \Delta t \cdot 2\alpha_f L] \tag{9}$$

\pm 에서 $+$ 는 분기될 경우, $-$ 는 결합될 경우이다. 결국 식(9)에서 보는 것처럼 분기 이후의 CRLO는 진폭이 심할수록(A 가 클수록) 정상상태 돌입시간이 길수록(D 가 클수록) 변화율은 더욱 더 크게 나타난다. 이를 통해 ADM채널의 분기 및 결합 전후의 발진출력광의 변화율인 CRLO를 통해 잔류채널들의 과도응답 특성을 추정할 수 있다.

두 번째로 후방 자연방출광에 의해 생성된 전방 관측단에서의 발진출력광의 과도응답 특성을 앞서의

경우와 같이 구할 수 있다. 먼저 분기 및 결합 직전 정상상태의 발진출력광파위인 $[I_{out}(0)]_{BWD}^{\pm}$ 이 두 반사경으로 구성된 선형공진기를 왕복하면서 순시이득 $G_f(t)$ 및 반사손실 R_1, R_2 을 경험하면서 선형공진기를 왕복하는데 걸리는 시간인 Δt 시점에서 다음 식과 같이 표시된다. 여기서 $[I_{out}(0)]_{BWD}^{\pm}$ 의 아래 첨자 BWD는 후방 자연방출광에 의해 생성된 발진광임을 의미하고 위첨자 $+$ 는 전방 관측단 방향의 출력을 의미한다.

$$[I_{out}(\Delta t)]_{BWD}^{\pm} = R_1 G_f(\Delta t/2) R_2 G_f(\Delta t) [I_{out}(0)]_{BWD}^{\pm} \tag{10.a}$$

$[I_{out}(\Delta t)]_{BWD}^{\pm}$ 은 다시 선형공진기를 왕복하면서 순시이득 및 반사손실을 경험하면서 $2\Delta t$ 시점에서 다음 식과 같이 표시된다.

$$[I_{out}(2\Delta t)]_{BWD}^{\pm} = R_1 G_f(3\Delta t/2) R_2 G_f(2\Delta t) [I_{out}(\Delta t)]_{BWD}^{\pm} \tag{10.b}$$

이런 식으로 t 시점에서의 발진출력광파위는 다음 식과 같이 표시된다.

$$[I_{out}(t)]_{BWD}^{\pm} = R_1 G_f(t - \Delta t/2) R_2 G_f(t) [I_{out}(t - \Delta t)]_{BWD}^{\pm} \tag{10.c}$$

이후 수순은 식(5)에서 식(8)과 동일한 결론이기 때문에 후방 자연방출광에 의해 생성된 전방 관측단에서의 CRLO는 식(9)와 동일하다. 따라서 전방 관측단에서 관측된 발진출력광의 변화율 CLRO는 전후방 자연방출광에 의해 생성된 발진출력광의 합이므로 식(9)와 동일하다는 결론이다.

후방 관측단에서 관측된 발진출력광의 경우도 마찬가지로 동일한 CLRO를 나타낸다.

IV. 과도응답 특성 실험 결과

4.1 발진파장에 따른 과도응답 특성

II 장의 3 절에서 언급한 대로 1570nm 및 1590nm의 FBG 반사경을 사용한 DPGC L-band EDFA에서 고정이득의 동작점을 구성한다. 그림 1.의 1582nm DFB-LD에 100Hz 구형파를 사용해서 40mA~60mA의 전류변조를 가함으로써 2mW~4mW의 광출력으로 변화하는 분기결합채널(ADM채널)을 구성한다. A 후방관측단과 B 전방관측단에서의 측정된 ADM채널의 광파위 비율은 그림 1.의 추정손실 분포와 1582nm ADM채널의 고정이득 15dB로

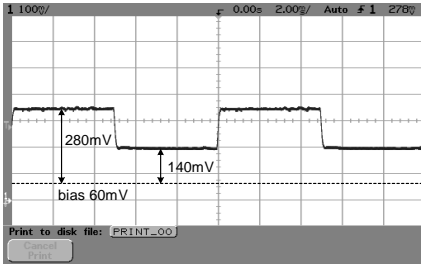


그림 7(a). 1570nm 발진 시에 B 전방관측단에서 1582nm ADM채널의 과도응답

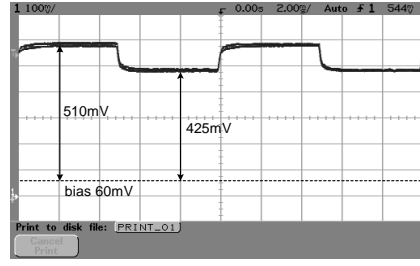


그림 8(a). B 전방관측단에서 1570nm 발진출력광의 과도응답

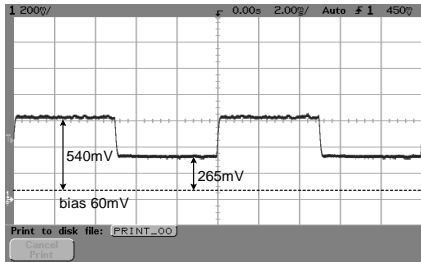


그림 7(b). 1570nm 발진 시에 A 후방관측단에서 1582nm ADM채널의 과도응답

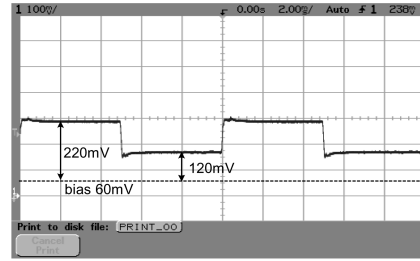


그림 8(c). B 전방관측단에서 1590nm 발진출력광의 과도응답

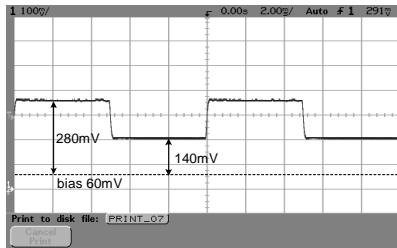


그림 7(c). 1590nm 발진 시에 B 전방관측단에서 1582nm ADM채널의 과도응답

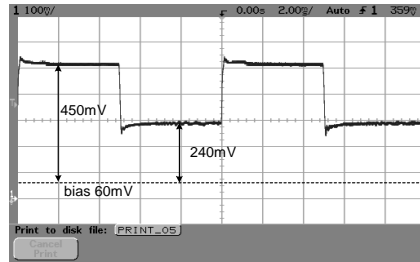


그림 8(d). A 후방관측단에서 1590nm 발진출력광의 과도응답

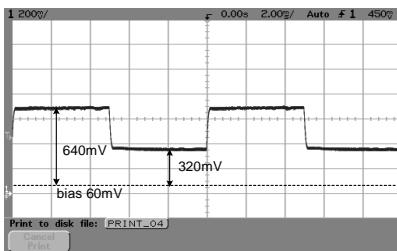


그림 7(d). 1590nm 발진 시에 A 후방관측단에서 1582nm ADM채널의 과도응답

부터 약 3dB 차이가 남을 추정할 수 있다.

그림 7(a)~7(d)은 1570nm 및 1590nm의 두 발진 파장에서 1582nm ADM채널이 15dB의 동일한 단일경로 이득으로 고정되었을 때 전후방관측단에서의 ADM채널의 파형을 보여 준다. 먼저 A 후방관측단

대비 B 전방관측단에서의 파형 비율이 앞서 추정된 바대로 3dB 차이가 있음을 볼 수 있다. 또한 두 발진파장에서 ADM채널 파형이 거의 동일한 것으로 보아 동일하게 15dB 정도의 이득으로서 고정되었음을 알 수 있다.

그림 8(a) 및 그림 8(b)는 A 후방 및 B 전방관측단에서 1570nm 발진출력광의 파형을 보여 준다. 분기 직후의 CRLO는 B 전방관측단에서 510mV/425mV로서 약 1.2, A 후방관측단에서 2V/1.6V로서 1.25로 나타나 전후방관측단에서 측정된 CRLO가 거의 동일한 것으로 나타나 앞서 유도된 III장의 결론과 잘 합치됨을 알 수 있다.

그림 8(c) 및 그림 8(d)는 A 후방 및 B 전방관측단에서 1590nm 발진출력광의 파형을 보여 준다.

분기 직후의 CRLO는 B 전방관측단에서 220mV/120mV로서 약 1.83, A 후방관측단에서 450mV/240mV로서 1.87이다. 이 경우에도 전후방 관측단에서 측정된 CRLO가 거의 동일한 것으로 나타나 앞서 유도된 III장의 결론과 잘 합치됨을 알 수 있다.

두 발진파장에서 분기 직후의 CRLO가 작은 1570nm 단파장 발진의 경우 CRLO가 큰 1590nm 장파장 발진에 비해 앞서의 III장에서 유도된 이론적 근거로부터 평균밀도반전율의 요동이 작음을 추정할 수 있다. 이와 같이 되는 이유는 앞서의 II장 3절에서 언급한 것처럼 1570nm 단파장 발진의 경우가 1590nm 장파장 발진의 경우에 비해 전후방

자연방출광이 많이 줄어들어 1570nm의 발진출력광이 1590nm의 발진출력광보다 매우 크기 때문이다.

4.2 발진방향에 따른 과도응답 특성

II장 3절에서 언급한 것처럼 동일한 고정이득을 만족시키는 반사율 R_1 , R_2 는 매우 다양하게 존재한다. 가령 동일한 고정이득을 유지하기 위해 R_1 을 크게하고 R_2 를 작게 조정하는 경우와 거꾸로 R_1 을 작게하고 R_2 를 크게 조정하는 두 가지 경우가 있을 수 있다. 전자의 경우는 후자의 경우에 비해 우측반사경으로부터 많이 반사되어 전방 발진입력광에 비해 후방 발진입력광이 매우 크게 나타날 것이다. 본 논문의 DPGC L-band EDFA 구조에서 EDF 초단에 위치한 펌프광에 의해서 큰 후방 발진입력광이 효율적으로 증폭되고 이로 인해 EDF 초단에서의 여기밀도를 크게 낮춤으로써 후방 자연방출광 및 우측반사경 R_1 에서 반사된 전방 자연방출광이 크게 줄어들기 때문에 광자 flux 보존성에 근거하여 발진출력광이 매우 크게 나타날 것이다.^[8] 따라서 분기 직후의 CRLO에 있어서 전자의 경우가 후자의 경우에 비해 월등히 작아 과도응답 특성의 향상을 기할 수 있다고 본다. 이와 같이 그림 1.의 광대역반사경의 반사율이 큰 경우가 과도응답 특성에 있어서 좋을 뿐만 아니라 이중경로증폭 구조에서도 당연히 반사율이 커야 신호채널에 대한 효율적인 증폭을 기할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 신호채널이 광대역반사경으로부터 반사되어 이중경로로 증폭되어 증폭 효율이 뛰어난 DPGC L-band EDFA를 구성하였다. 이러한 구조는

광대역반사경을 사용해서 잡음지수 측면에서는 악화되지만 선형공진기의 발진파장 튜닝이 그다지 필요하지 않다는 점에서 간단하고 더욱이 광대역반사경 쪽에 분산보상광섬유 부착이 매우 용이한 구조이다.

발진광에 의한 고정이득 EDFA에서 신호채널들이 분기 및 결합 할 때 잔류채널의 과도응답 특성에 대한 정확하고 정량적인 측정방법으로서 발진출력광의 변화율 CRLO를 제안하였다.

1570nm 및 1590nm 두 발진파장에 대해서 동일한 고정이득 조건하에서 잔류채널의 과도응답 특성을 CRLO를 통해서 추정한 결과 단파장 발진의 경우가 과도응답 요동이 작음을 알 수 있었다.

또한 동일한 고정이득을 만족시키는 반사율 R_1 , R_2 의 다양한 조합이 있을 수 있는데 펌프광의 반대 위치에 있는 반사경의 반사율이 커서 펌프광 반대 방향인 후방으로부터 입력되는 후방 발진입력광이 클수록 과도응답 요동이 작을 것으로 추정한다. 결국 반사율이 큰 광대역반사경 R_1 을 가지는 그림 1.과 같은 구조가 이중경로 증폭이나 선형공진기의 발진파장 안정화라는 두 가지 측면에서 가장 최적이라고 생각한다.

참 고 문 헌

- [1] S. Yamachida and M. Nishihara "L-band Erbium-Doped Fiber Amplifier Incorporating an Inline Fiber Grating Laser", *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 07, No. 1, pp.44-48, 2001.
- [2] D. H. Ricards, J. L. Jackel, and M. A. Ali, "A Theoretical Investigation of Dynamic All-Optical Automatic Gain Control in Multichannel EDFA's and EDFA Cascades", *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 3, No. 4, pp.1027-1036, 1997.
- [3] J. C. Lee, H. S. Chung, W. Y. Oh, and M. J. Chu, "The wavelength dependent transient effect in surviving channels in L-band EDFA", *OFC 2002*, pp. 646-647, 2002.
- [4] 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.

- [5] B. Xia, D. Pudo, and L. R. Chen, "Comparison of the static and dynamic properties of single- and double- pass partially gain-clamped two-stage L-band EDFAs", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 4, pp. 519-521, 2003.
- [6] S. W. Harun, N. Tamchek, P. Poopalan, and H. Ahmad, "Double-Pass L-Band EDFA With Enhanced Noise Figure Characteristics", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 8, pp.1055-1057, AUGUST 2003.
- [7] S. W. Harun, and H. Ahmad, "Double-Pass L-Band EDFA Incorporating Band Pass Filter" *ICSE 2002* pp.391-393, 2002, Penang Malaysia.
- [8] 김익상, 김창봉, 양홍, 손영호 "양방향 펌프구조 고정이득 L-band EDFA의 과도응답 특성", *한국통신학회논문지*, 제30권, 3A호, pp.160-167, 2005.

김익상 (Ik-Sang Kim)

정회원



1984년 2월 한양대학교 전자통신공학과 졸업

1986년 2월 한양대학교 전자통신공학과 석사

1995년 8월 Texas A&M University Electrical Eng. 공학박사

1987년 5월~1990년 6월 금성반도체 주임연구원

1995년 4월~1997년 3월 한국통신 전송기술연구소 선임연구원

1997년 3월~현재 배재대학교 IT공학부 부교수

<관심분야> 광섬유증폭기, 광섬유레이저, 광섬유센서