

# Thulium이 도핑된 광섬유 증폭기의 과도현상에 관한 연구

이재명 · 이영우

목원대학교 전자 및 컴퓨터 공학과

## A Study of the Transient Effect at the Thulium-doped Optical Fiber Amplifier

Jae-myung Lee · Young-woo Lee

Department of Electronics and Computer Engineering of Mokwon University

E-mail : ywlee@mokwon.ac.kr

### 요 약

본 논문에서는 1400nm 대역에서 이득을 갖는 TDFA의 증폭 특성과 과도응답 특성을 이론적으로 해석하였다. 수치모델은 밀도반전의 형성과정, 여기파워, 증폭기를 따라 변화하는 신호파워를 포함한다. 본 이론해석의 결과는 광섬유증폭기의 이득 포화와 복구시간을 예측할 수 있게 해주고, 펌핑율과 포화율이 이득의 포화와 복구시간에 미치는 영향을 예측할 수 있게 한다.

### ABSTRACT

The transient response in TDFA(Thulium-Doped Fiber Amplifier) is theoretically investigated. The TDFA has the spectral gain band in 1.47  $\mu\text{m}$ . The transient model includes the transient buildup of the population inversion, the pump power, the signal power and their transient variation along the fiber amplifier. The results of numerical analysis can predict the gain saturation and recovery time at the fiber amplifier. It also shows the gain saturation and recovery effect depending on the pumping and saturation rate.

### 키워드

TDFA, Thulium-doped fiber amplifier, Thulium, fiber amplifier

### 1. 서 론

최근 광통신 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히 파장분할변조(WDM)에 사용되어지는 광섬유 증폭기에 관하여 연구가 집중되어지고 있다.

1.3  $\mu\text{m}$  영역과 1.5  $\mu\text{m}$  영역에서의 silica fiber는 zero dispersion을 갖고있기 때문에, 1.5  $\mu\text{m}$  영역의 전송 시스템에 사용되어지는  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber amplifier(EDFA)는 가장 많은 연구가 되어져왔고, 1.3  $\mu\text{m}$  영역에서 동작하는  $\text{Pr}^{3+}$ -doped fiber amplifier(PDFA)도 활발히 연구되어지고 있다. 1.45~1.5  $\mu\text{m}$  영역 또한 매우 적은 손실을 갖는 영역이므로 광통신 밴드폭을 넓게 사용하기 위해 1.4  $\mu\text{m}$  영역에서 동작하는 증폭기에 대한 연구는

앞으로 WDM의 사용 가능한 대역폭을 확장하는데 중요한 issue가 되고 있다.

1982년, B. M. Antipenko et al. 은 1.47 $\mu\text{m}$  주위에서 방출하는  $\text{Tm}^{3+}$  와  $\text{Yb}^{3+}$  이온이 함께 도핑된  $\text{BaYb}_2\text{F}_8$  과  $\text{LiYbF}_4$  크리스탈에서의 레이저 발진을 얻었다[1]. 또한 1989년, J. Y. Allain et al. 이 처음으로 0.676  $\mu\text{m}$ 의 펌프 소스로 동작하는  $\text{Tm}^{3+}$ -doped multimode fluoride fiber에 의한 1.48  $\mu\text{m}$  대의 레이저 발진을 얻었다[2].

지금까지 연구된 TDFA는 single signal과 WDM signal에서의 이득 특성에 관한 연구들과 이득을 shift 시켜서 밴드폭을 넓게 사용하는 연구들이 소개되어지고 있다. 그러나 멀티채널로 증폭하는 동안 발생할 수 있는 crosstalk에 관한 연구는 소개되어지지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 TDFA가 WDM에서 사용되어질 경우 saturation 과 recovery 시간에 따라 발생할 수 있는 crosstalk에 관한 과도현상을 알아보기 위해 transient gain dynamics를 시뮬레이션 하였다.

## II. TDFA의 이론해석

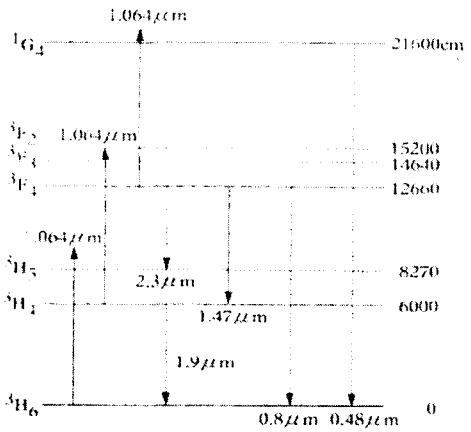


그림 1. fluoride glass의 3가의 thulium ion( $Tm^{3+}$ ) 에너지 다이어그램

그림 1은 fluoride thulium ion( $Tm^{3+}$ )의 에너지 레벨 다이어그램을 보여준다.  $Tm^{3+}$ 은 0.48  $\mu m$ , 0.8  $\mu m$ , 1.47  $\mu m$ , 1.9  $\mu m$  그리고 2.3  $\mu m$ 에서의 여러 레이저 천이선을 갖는다[3]. 하지만, 이 논문에서는 1.47  $\mu m$  천이( $^3F_4 \rightarrow ^3H_4$ )에 초점을 뒀다.

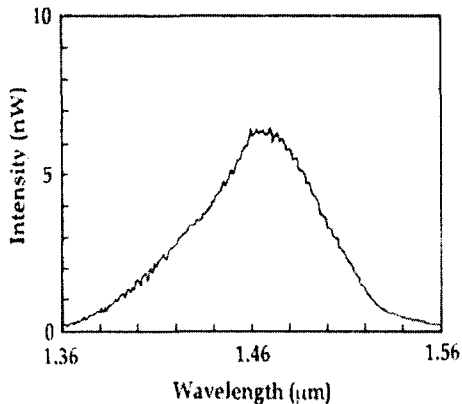


그림 2. 1.064  $\mu m$ 로 펌핑한 방출 스펙트럼

하지만, 1.47  $\mu m$  천이( $^3F_4 \rightarrow ^3H_4$ )에서의 증폭은

윗준위( $^3F_4$ )의 수명이 아래준위(terminating level,  $^3H_4$ )의 수명보다 짧다는 문제점이 있다. 2000ppm의  $Tm^{3+}$ 이온 밀도에서 측정된  $^3F_4$ 와  $^3H_4$ 의 lifetime은 각각 1.35 ms와 9.0 ms이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 1.064  $\mu m$  upconversion 여기 방법을 사용했다[4].

그림 1에서 ESA(Excited State Absorption,  $^3H_4 \rightarrow ^3F_2$ )는 결과적으로  $^3H_4$ 의 밀도를 줄이고  $^3F_4$ 의 밀도를 증가시킨다. 이러한 방법으로  $^3F_4$ 와  $^3H_4$  레벨사이에 밀도 반전이 형성된다[4].

그림 2는 1.064  $\mu m$  밴드로 펌핑했을 때의 방출 스펙트럼이다. 방출 영역은 EDFA가 작동할 수 없는 1.38~1.55  $\mu m$ 의 낮은 손실 전송밴드 영역으로 광통신에서 매우 관심을 끄는 영역이다.

그림 3은 TDFA의 율 방정식의 모델을 보여준다.

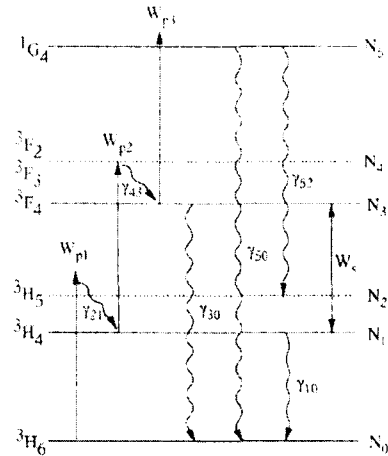


그림 3. 율 방정식 해석을 위한 모델

$^3H_6$ ,  $^3H_4$ ,  $^3H_5$ ,  $^3F_4$ ,  $^3F_2$ - $^3F_3$ ,  $^1G_4$  각각의 분포 밀도를  $N_0, N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$  라고 하고,  $^3H_6 \rightarrow ^3H_5$ ,  $^3H_4 \rightarrow ^3F_2$ ,  $^3F_4 \rightarrow ^1G_4$ 의 펌핑 천이율을  $W_{p1}, W_{p2}, W_{p3}$  라고 가정하면, 율 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dN_0}{dt} = -W_{p1} N_0 + \gamma_{10} N_1 + \gamma_{30} N_3 + \gamma_{50} N_5 \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -(\gamma_{10} + W_{s2} + W_s) N_1 + \gamma_{21} N_2 + W_s N_3 \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{p1} N_0 - \gamma_{21} N_2 + \gamma_{52} N_5 \quad (3)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_s N_1 - (\gamma_{30} + W_s + W_{s3}) N_3 + \gamma_{43} N_4 \quad (4)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = W_{s2} N_1 - \gamma_{43} N_4 \quad (5)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = W_{p3} N_3 - (\gamma_{50} + \gamma_{52}) N_5 \quad (6)$$

여기서  $N_2$  와  $N_4$  는 다른  $N_i$  에 비해 매우 작

은 값을 갖으며,  $W_{p3} \ll (1 + \gamma_{52} / \gamma_{50}) \gamma_{30}$  또한 무시할 수 있다. 그러므로 총 분포밀도  $N$  은 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$N = N_0 + N_1 + N_3 \quad (7)$$

(1)-(7)의 율 방정식과 빛의 진행과 원자 분포를 설명한 유한 차등 방정식[5]에 의해 이론 해석을 행하여 TDFA에서의 이득 포화와 이득 회복에 관한 특성을 조사하였다.

### III. TDFA에서의 과도응답

우리는 TDFA의 이론 해석을 통해서 TDFA의 6준위 레벨을 EDFA에서와 같은 3준위 레벨로 변화시켰다. 이렇게 3준위 레벨로 만들어진 TDFA를 이용해서 fiber의 입력 단에서의  $z=0$  일 때, 시간에 따른 gain dynamics에 관한 고찰을 해봄으로써 과도응답 특성을 알아보려고 한다[6].

$$\Delta N_{13}(0, t) = \frac{\alpha-1}{1+\alpha+2\beta} \left[ 1 + \frac{2\beta}{1+\alpha} \exp\left(-\frac{1+\alpha+2\beta}{\tau_3} t\right) \right] \text{ for } 0 \leq t < \Delta T, \quad (8)$$

$$\Delta N_{13}(0, t) = \frac{\alpha-1}{1+\alpha} \left[ 1 - \frac{2\beta}{1+\alpha+2\beta} \exp\left(-\frac{1+\alpha}{\tau_3} (t - \Delta T)\right) \right] \text{ for } t \geq \Delta T, \quad (9)$$

여기서  $\alpha = P_p(0) / P_p^{th}$ ,  $\beta = P_s(0) / P_{sat}$ 을 나타낸다.  $P_p(0)$ ,  $P_s(0)$ ,  $P_p^{th}$ ,  $P_{sat}$ 는 각각 입력 펌프, 신호 파워, 분포반전을 위한 펌프 문턱전압, 그리고 포화 강도이다.

signal pulse가 들어가는 동안에 반전분포  $\Delta N_{12}(0, t)$ 는 감소하고, signal이 들어가지 않는 동안에는 초기 값으로 되돌아가게 된다. Saturation 과 Recovery time에서의 반전분포  $\Delta N_{12}(0, t)$ 를 이론적으로 해석하였다.

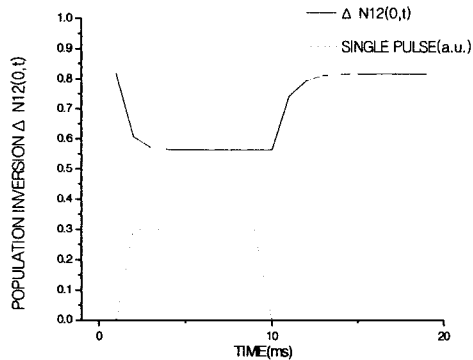


그림 4. Saturation 과 Recovery regime에서의 반전분포  $\Delta N_{12}(0, t)$

그림 4의 시뮬레이션 그래프를 통해서 우리는 saturation 되었다가 recovery 되어서 반전분포를 얻을 때 처음 saturation 될 때의 값에 완전히 도달하지 못하고 있는 것을 볼 수 있었다.

또한, 10%-90% 시간에 도달하는  $\Delta T_s$  와  $\Delta T_r$  은 간단히 다음과 같이 구할 수 있다[6].

$$\Delta T_s = \tau_3 \ln(8) / (1 + \alpha + 2\beta) \quad (10)$$

$$\Delta T_r = \tau_3 \ln(8) / (1 + \alpha) \quad (11)$$

$\Delta T_s$  와  $\Delta T_r$  의 크기와 펌프 파워의 의존도를 보기 위해  $\alpha$  와  $\beta$  의 변화에 따른 10%-90% 시간의 그래프를 그려보았다.

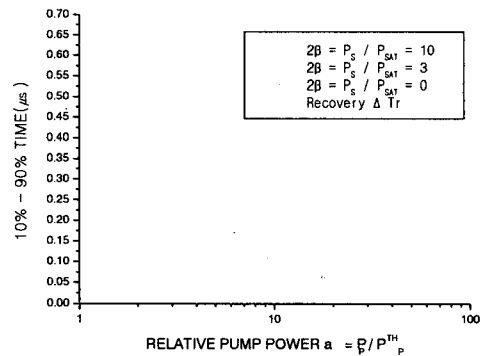


그림 5.  $\alpha$  와  $\beta$  의 변화에 따른  $\Delta T_s$  와  $\Delta T_r$

그림 5를 통해서 우리는  $\Delta T_s$  와  $\Delta T_r$  이  $\alpha$  와  $\beta$  의 변화에 영향을 받는 것을 볼 수 가 있었다.  $\alpha$  와  $\beta$  가 커짐에 따라서 10%-90% time이 더욱 빨리지는 것을 볼 수가 있다.

### IV. 결 론

우리는 WDM을 사용할 경우 각각의 밴드에 따라 파장이 다르고, short pulse를 사용함으로써 광 증폭기에서 발생할 수 있는 과도응답 특성을 알아보려고 했다. 그래서 이전에 언급되지 않았던 TDFA에서의 과도응답 특성을 시뮬레이션 해 봄으로써 앞으로 더욱 넓은 밴드를 사용할 WDM이 직면할 수 있는 과도응답의 특성을 미리 알아보려고 했다.

우리는 이번 시뮬레이션을 통해서 TDFA의 gain dynamics 과도응답이 펌프 파워와 포화 신호 파워에 영향을 받고 있다는 것을 알 수가 있었다. 지금까지 많이 연구되어져 오고있는 EDFA의 gain dynamics 와도 거의 유사한 과도응답 특성을 보이고 있지만, TDFA에서의 다른 점은 응답시간이 상당히 빠른 특성을 보이고 있다는 점이다. 응답시간이 빨라서 포화가 빨리 되면 주위의 crosstalk에 쉽게 영향을 받을 수 있기 때문에, 앞으로의 연구는 빠른 응답시간으로 인해 발생할

수 있는 과도응답에 대한 특성과 그에 따른 대비책을 찾는 것이 과제라고 생각한다.

### 참고문헌

- [1] B. M. Antipenko, A. A. Mak, O. B. Raba, K. B. Seiranyan, and T. V. Uvarova, "New lasing transition in the  $Tm^{3+}$  ion," *Sov. J. Quantum Electron.*, vol. 13, no. 4, pp. 558-560, 1983.
- [2] J. Y. Allian, M. Monerie, and H. Poignant, "Tunable cw lasing around 0.82, 1.48, 1.88 and 2.35  $\mu m$  in thulium-doped fluorozirconate fiber," *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 24, pp. 1660-1662, 1989.
- [3] M. J. F. Digonnet, Ed., *Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers*. New York: Marcel Dekker, 1993, ch. 2, pp. 19-133.
- [4] Tetsuro Komukai, Takashi Yamamoto, Tomoki Sugawa, and Yoshiaki Miyajima, "Upconversion Pumped Thulium-Doped Fluoride Fiber Amplifier and Laser Operating at 1.47  $\mu m$ ," *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol. 31, no. 11, pp. 1880-1889, 1995.
- [5] C. R. Giles, E. Desurvire, and J. R. Simpson, *Opt. Lett.*, vol. 14, Aug. 1989.
- [6] E. Desurvire, "Analysis of Transient Gain Saturation and Recovery in Erbium-Doped Fiber Amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 1, no. 8, pp. 196-199, 1989.