
광섬유 증폭기에서의 입력 펄스 열에 의한 Gain Recovery 특성

이재명 · 이영우
목원대학교

The effect of gain recovery at the optical fiber amplifier by the input pulse train

Jae-myung Lee · Young-woo Lee
Mokwon University
E-mail : ywlee@mokwon.ac.kr

요 약

본 논문은 광섬유 증폭기에서 입력 펄스 열에 따른 gain recovery 특성을 고찰하였다. 1.3 μm 대역에서 증폭 특성을 갖는 PDFA(Praseodymium-Doped Fiber Amplifier)의 WDM 적용 시 short pulse 열을 인가할 경우 발생할 수 있는 이득 포화 및 복구의 시간적 한계를 이론적으로 해석하였다. 펄스 열의 간격과 펌프 파워, 그리고 펄스 간격에 따른 이득 포화 및 복구 시간이 광 펄스의 증폭에 미치는 영향을 예측할 수 있었다.

ABSTRACT

We studied the effect of gain recovery at the optical fiber amplifier by the input pulse trains. We also theoretically analyzed the limitation of the saturation and recovery time for the PDFA(Praseodymium-Doped Fiber Amplifier) which has the spectral gain at 1.3 μm band. We can predict the interval between the pulse train, pump power, and the effect of the saturation and recovery time which is affected to the amplification of the optical pulse.

키워드

PDFA, transient effect, gain recovery, 광섬유 증폭기

1. 서 론

급격히 늘어가는 대용량의 데이터를 초고속으로 전송하기 위해서는 기존의 시스템이 갖는 전송 대역뿐만 아니라, 그 이외의 대역에서도 신호를 증폭시킬 수 있는 광섬유 증폭기에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 특히 파장 분할 변조(WDM)에 대한 연구는 큰 issue가 되고 있다.

현재 연구되어지고 있는 광섬유 증폭기로는, 1.5 μm 대역에서 증폭 특성을 갖는 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)가 가장 많은 연구가 진행되어져왔고, 1.3 μm 대역에서 동작하는 PDFA(Praseodymium-Doped Fiber Amplifier)와 1.4 μm 대역에서 동작하는 TDF(Thulium-Doped

Fiber Amplifier)에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

이러한 광섬유 증폭기의 활발한 연구는 1.3~1.5 μm 까지 WDM의 대역폭을 확장시키기 위한 중요한 연구가 되고 있다.

지금까지의 광섬유 증폭기에 대한 많은 연구들은 WDM을 위해 밴드폭 확장과 이득 평탄화에 중점을 두고 있다. 그러나 본 논문에서는 앞으로 더욱 방대해질 데이터를 초고속으로 전송하기 위해 short pulse의 멀티채널 증폭의 필요성을 인식하여, short pulse로 멀티채널을 증폭하는 동안 발생할 수 있는 transient effect를 PDFA의 모델

링을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

본 시뮬레이션을 통해 신호 펄스의 모양에 따른 recovery 특성, 신호 펄스간의 간격에 따른 recovery와 펌프 파워의 상관관계, 펌프 파워에 따른 펄스열의 recovery 시간에 대한 transient effect를 예측할 수 있었다.

II. PDFA의 이론해석

Transient effect의 시뮬레이션을 위해 1.3μm에서 증폭 특성을 갖는 PDFA의 증폭 모델을 사용하였다.

그림 1은 Pr³⁺의 4준위 모델을 나타낸다[1].

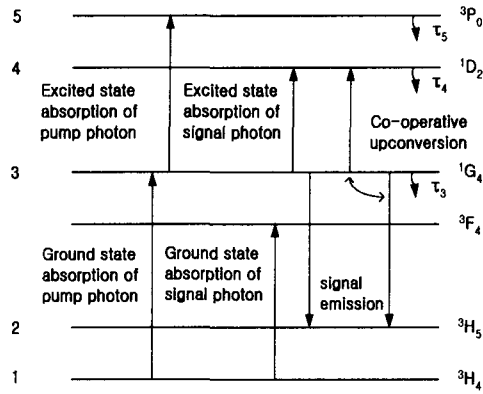


그림 1. Pr³⁺의 에너지 준위 도표

신호 증폭은 1G₄-3H₅의 1.3μm 천이에서 발생한다. Pr³⁺의 이온분포밀도 N_i에 대한 율 방정식은 다음과 같은 식으로 주어진다[1].

$$dN_3/dt = W_{13}N_1 - (W_{35} + W_{34} + W_{32} + W_{31} + 1/\tau_3 + cN_3)N_3 + B_{43}N_4/\tau_4 + B_{53}N_5/\tau_5 \quad (1)$$

$$dN_4/dt = (W_{35} + cN_3/2)N_3 - N_4/\tau_4 \quad (2)$$

$$dN_5/dt = W_{35}N_3 - N_5/\tau_5 \quad (3)$$

c는 1G₄ 준위에서 1D₂ 준위로의 cooperative upconversion 계수이고, W_{ij}는 i와 j 준위 사이의 천이율이다. W₁₃, W₃₁, W₃₂, W₃₄, W₃₅는 $P\sigma_{13}\eta_p / Ah\nu_p$, $P\sigma_{31}\eta_p / Ah\nu_p$, $P_s\sigma_{32}\eta_s / Ah\nu_s$, $P_s\sigma_{34}\eta_s / Ah\nu_s$ 와 $P_s\sigma_{35}\eta_s / Ah\nu_s$ 로 각각 주어진다. 여기서 P는 펌프파워이고 σ_{ij}는 i와 j 준위 사이의 유도방출 단면적, η_{ps}는 코어에서의 펌프파와 신호파의 파워이다. A는 코어직경, h는 플랑크 상수, ν_{ps}는 펌프와 신호파의 주파수이고, P_s는 신호파워이다. 2준위의 밀도 N₂는 존재하는 즉시 기저 준위로 떨어지므로 무시할 수 있다. 그러므로 총 밀도세기 N_t = N₁ + N₃ + N₄ + N₅로

나타낼 수 있다. 수치 해석을 위해 쓰여진 각 파라미터들의 값은 여러 논문에서 발표되었고, 표 1에 나타내었다[2-5].

표 1. 수치해석에 사용된 Pr³⁺의 광 파라미터
Table 1. Optical parameter of Pr³⁺ used in numerical analysis

σ ₁₃	4.24 × 10 ⁻²² cm ²	t ₃	110 μs	C	2 × 10 ⁻¹⁸ cm ³
σ ₃₂	3.73 × 10 ⁻²² cm ²	t ₄	350 μs	Nt	3.2 × 10 ²³ m ⁻³
σ ₃₁	1.2 × 10 ⁻²² cm ²	t ₅	58 μs		
σ ₃₄	1.0 × 10 ⁻²² cm ²	B ₄₃	9%		
σ ₃₅	0.6 × 10 ⁻²² cm ²	B ₅₃	2%		

여기서, σ_s = σ₃₂ - σ₃₄이다.

III. Transient effect 모델링

PDFA의 율 방정식을 이론적으로 해석하여 fiber의 입력단에서 z=0 일 때, 시간과 입력 펄스에 따른 recovery time에 관한 고찰을 함으로써 과도응답 특성을 알아보려고 한다.

시뮬레이션을 위한 각 준위의 이온 밀도 N₁, N₃, N₄, N₅는 식 (1)~(3)에서 구해진 변화량에 시간의 변화량을 곱함으로써 한 지점에서 시간에 따른 밀도의 변화량을 구할 수 있었다.

그림 2는 fiber의 입력단에서 z=0 일 때, 입력 펄스로 가우시안 펄스가 입사될 때의 saturation과 recovery 시간에서의 N₃의 밀도 변화를 시뮬레이션 한 것이다.

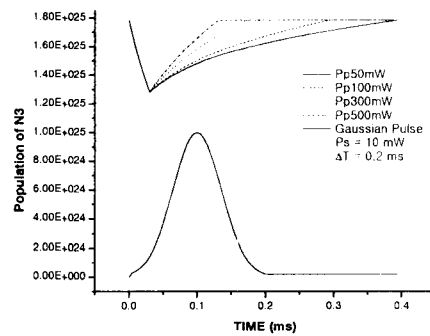


그림 2. single pulse의 펌프파워에 대한 N₃ 준위의 밀도변화

그림 2로부터 recovery 시간은 펌프파워에 의존한다는 것을 알 수 있었다.

그림 3에서는 입력 펄스의 모양에 따른 saturation과 recovery 시간의 상호 관계를 알아보기 위해 삼각 펄스와 가우시안 펄스에 대한 saturation과 recovery 시간을 시뮬레이션 하였다.

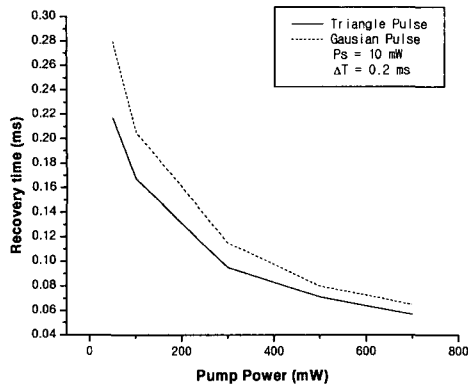
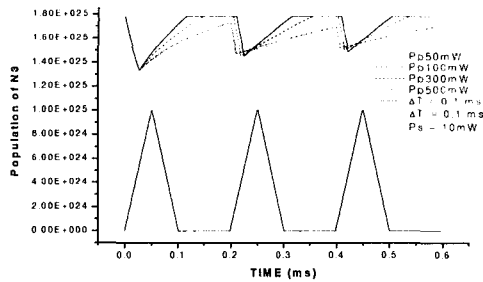


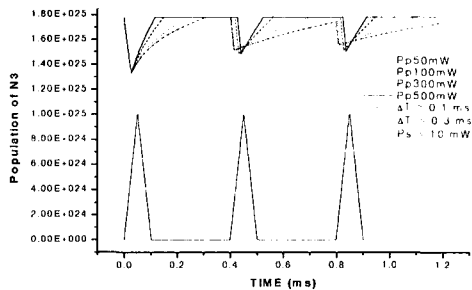
그림 3. 입력 펄스 모양과 recovery 시간

입력 펄스를 삼각 펄스와 가우시안 펄스로 시뮬레이션 해본 결과 가우시안 펄스가 인가될 때의 recovery 시간이 삼각 펄스가 인가되었을 때보다 5~60 μ s 만큼 지연되는 현상을 볼 수 있었다. 이 시뮬레이션을 통해 short pulse가 인가되기 위해서는 삼각 펄스 혹은 로렌지안 펄스 같은 정형화된 펄스를 사용하는 것이 더 좋은 이득을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

그림 4에서는 펄스간의 간격에 따른 recovery 시간과 펌프 파워의 관계를 시뮬레이션 하였다.



(a) 펄스간의 간격 $\Delta T_i = 0.1$ ms



(b) 펄스간의 간격 $\Delta T_i = 0.3$ ms

그림 4. 펄스간의 간격에 따른 recovery 시간과 펌프 파워

그림 5는 펄스 열이 지나갈 때 recovery 시간의 변화를 시뮬레이션 한 결과이다.

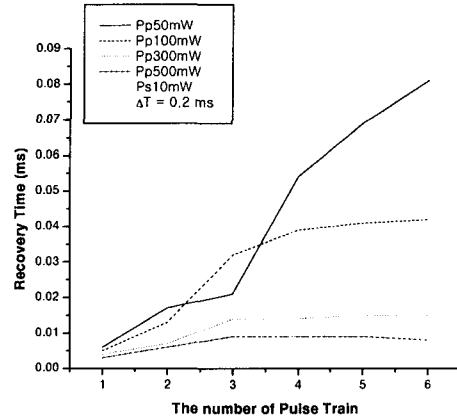


그림 5. 펌프파워에 대한 펄스열의 recovery 시간

처음의 펄스 열에서 가장 빠른 recovery 시간을 보이고있고, 뒤로 갈수록 recovery 시간이 지연되는 것을 특성을 보여준다. 또한 펌프 파워가 작을수록 recovery가 더디게 일어나는 것을 봄으로써 300mW 이상의 펌프 파워를 사용했을 때 원활한 증폭 이득을 얻을 수 있을 것이라고 예측할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구는 WDM에서 short pulse를 사용함으로써 인해 광섬유 증폭기에서 발생할 수 있는 transient effect를 예측하여, 이전에 언급되지 않았던 광섬유 증폭기의 과도응답 특성을 시뮬레이션 해봄으로써 WDM에서 short pulse로 증폭할 때 직면할 수 있는 과도응답 특성을 알아보았다.

시뮬레이션의 결과 광섬유 증폭기에 사용하는 신호 펄스로는 정형화된 펄스를 사용하는 것이 가우시안 펄스를 사용하는 것보다 5~60 μ s의 recovery 시간을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있었고, 펄스 열의 간격을 조밀하게 분할하여 증폭시키기 위해 펄스와 펄스간의 간격에 대한 펌프 파워를 예측할 수 있었다. 또한 펄스 열이 증폭되어 나가는 동안 발생하는 recovery 시간의 변화를 시뮬레이션 해봄으로써 PDFA에서 펄스 열의 증폭을 원활히 하기 위해서는 300mW 이상의 펌프 파워를 사용해야한다는 것을 예측할 수 있었다.

지금까지의 transient effect 모델링과 시뮬레이션을 검증하기 위한 실험을 진행중이며, recovery 시간에 의한 과도응답의 transient effect 외에 다

른 현상에 의해 발생 가능한 transient effect에 대한 연구를 계속할 계획이다.

참고문헌

- [1] Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Nishi, S. Takahashi and E. Snitzer, "Concentration effect on gain of Pr³⁺-doped fluoride fiber for 1.3 μ m amplification", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, 1338
- [2] Y. Ohishi, T. Kanamori, M. Shimizu, M. Yamada, Y. Terunuma, J. Temmyo, M. Wada and S. Sudo "Praseodymium-Doped Fiber Amplifiers at 1.3 μ m", IEICE Trans. Commun. E77-B, 421 (1994)
- [3] V. Morin and E. Taufflieb, "High output-power praseodymium-doped fiber amplifier single-pumped at 1030nm : analysis and results", IEEE journal of selected topics in Quantum Elec., vol. 3, no. 4, 1112 (1997)
- [4] Y. Ohishi, T. Kanamori, Y. Terunuma, M. Shimizu, M. Yamada and S. Sudo, "Investigation of efficient pump scheme for Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifiers", IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 6, No. 2, 195 (1994)
- [5] M. Karasek, "Analysis of gain dynamics in Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifiers", IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 7, No. 3, 299 (1995)