

Pr³⁺이 도핑된 광섬유증폭기의 최적화 및 과도현상에 관한 연구

이재명 · 지명훈 · 염진용* · 이영우

목원대학교

* 레이콤 시스템

A Study on the Optimization and the Transient Phenomena of the Pr³⁺-doped Fiber Amplifier

Jae-myung Lee · Ji-myung Hoon · Jin-yong Yeom* · Young-woo Lee

Mokwon University

* Lacom System

E-mail : ywlee@mokwon.ac.kr

요 약

본 논문에서는 1.3 μm 대역에서 증폭특성을 갖는 PDFA의 과도응답 특성을 이론적으로 해석하였다. 수치모델은 밀도반전의 형성과정, 여기파워, 신호파워와 증폭기를 따라 변화하는 신호파워를 포함하고 광섬유 증폭기의 길이에 따른 각 에너지준위의 밀도, 여기파워, 이득의 해석과 시간의 변화에 따른 각 에너지준위의 밀도변화와 이득을 해석하였다. 이러한 수치해석의 결과는 광섬유증폭기의 이득 포화와 복구시간을 예측할 수 있게 해주고, 이득의 포화와 복구시간이 광 펄스의 증폭에 미치는 영향을 예측할 수 있게한다. 시뮬레이션의 결과, 여기광의 파장 1.017 μm , 파워 0.5W이고 광섬유증폭기의 Pr 이온의 도핑농도가 1000ppm일 경우 광섬유증폭기의 길이 약 5m 에서 이득의 포화가 이루어졌으며 30dB의 이득을 얻었다. 또한 상준위의 이온밀도는 약 250 μs 의 시간이 지난후에 포화됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The transient response in PDFA(Praseodymium-Doped Fiber Amplifier) is theoretically investigated. The PDFA has the spectral gain band in 1.3 μm . The transient model includes the transient buildup of the population inversion, the pump power, and the signal power and their transient variation along the fiber amplifier. The numerical analysis of transient model can predict the gain saturation, the variation of pump power and the gain as a function of the fiber length. It also shows the gain saturation and recovery effects depending on the pumping rate lead to distortion and saturation in the amplification of optical pulse. The results of numerical analysis, for the case of the Pr ion concentration of 1000ppm and the pump power of 0.5W the gain saturation is obtained 30dB at the length of 5m and the saturation time of upper level is 250 μs .

1. 서 론

1991년 Ohishi 등에 의해서 처음으로 Praseodymium(Pr³⁺)-doped fiber amplifier(PDFA)가 제안되었으며, 1.3 μm 대역에서 사용되는 광섬유 증폭기 개발에 새로운 전망이 제공되었다[1]. 거의 동시에 PDFA를 사용한 광증폭 실험이 보고되었으며, 30dB 이상의 높은 신호 이득과 17.8dBm의 출력파워의 보고로 PDFA의 가능성이 인정되었

다. 현재 세계적으로 초고속 광통신을 위한 광섬유 증폭기에서의 극초단 펄스의 전파에 관한 연구 등이 진행되고 있다[2,3]. 특히 PDFA는 수십 nm의 넓은 이득 대역폭을 갖기 때문에, 1.3 μm 대역에서 극초단 펄스 증폭을 위한 가장 유망한 후보이다.

본 논문에서는 1.3 μm 대역에서 증폭특성을 갖는 PDFA의 일반적 특성과 과도응답을 이론적으

로 해석하였다. 모델은 밀도반전의 형성과정, 여기파워와 증폭기를 따라 변화하는 신호파워를 포함한다. 본 모델을 이용하여 광섬유 증폭기의 길이에 따른 각 에너지준위의 밀도, 여기파워, 이득의 해석과 시간의 변화에 따른 각 에너지준위의 밀도변화와 이득을 해석하였다. 이러한 수치해석의 결과는 광섬유증폭기의 이득 포화와 복구 시간을 예측할 수 있게 해주고, 이득의 포화와 복구 시간이 광 펄스의 증폭에 미치는 영향을 예측할 수 있게 한다.

II. PDFFA의 이론해석

광섬유 증폭기에서의 1.3 μm 증폭 모델에 관한 연구는 세계적으로 활발히 연구되어왔다[4,5,6]. 그림 1은 1.3 μm 증폭을 위한 Pr^{3+} 의 ${}^1\text{G}_4$ - ${}^3\text{H}_5$ 천이를 나타내는 4 준위 모델을 나타낸다. 모델은 여기광의 ${}^3\text{H}_4$ 와 ${}^1\text{G}_4$ 준위 사이의 기저상태 흡수와 ${}^1\text{G}_4$ 와 ${}^3\text{P}_0$ 준위 사이의 여기상태 흡수를 나타낸다. 또한 신호광의 ${}^3\text{H}_4$ - ${}^3\text{F}_4$ 의 기저상태 흡수와 ${}^1\text{G}_4$ - ${}^1\text{D}_2$ 사이의 여기상태 흡수도 포함한다. ${}^1\text{G}_4$ 준위의 밀도는 ${}^1\text{G}_4$ - ${}^1\text{D}_2$ 준위와 ${}^1\text{G}_4$ - ${}^3\text{H}_5$ 준위에서의 천이에 의해 발생하는 cooperative upconversion에 의해서 감소한다. 또한 신호증폭은 ${}^1\text{G}_4$ 준위에서 ${}^3\text{H}_5$ 준위로의 자극방출의 결과로서 나타나게 된다. 결과적으로 이득은 1.3 μm 부근에서 발생하게 된다. 그림 1에서 상준위의 수명(${}^1\text{G}_4$ - ${}^3\text{H}_5$)은 증폭성능의 이득을 결정짓는데 아주 중요한 파라미터이다. 또한 낮은 준위의 수명(${}^3\text{H}_5$ - ${}^3\text{H}_4$)도 증폭성능에 중요하다.

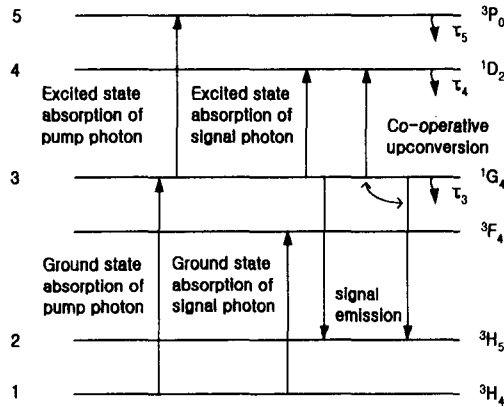


그림 1. Pr^{3+} 의 에너지 준위 도표

Fig. 1. Simplified energy level diagram of Pr^{3+}

ZBLAN fluoride glass에서 Pr^{3+} 의 형광 스펙트럼분포에 대한 곡선과 각 준위별 천이에 따른 수명과 단면적들을 적용함으로써 ZBLAN fluoride host glass에서의 Pr^{3+} 의 율방정식을 구할 수 있게 된다[4-8]. 이러한 ZBLAN fluoride host glass에서의 Pr^{3+} 에 대한 형광 스펙트럼과 각 준위별 데이

터들은 PDFFA의 이론해석 및 수치적 표현에 있어서 가장 기본이 된다고 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 실험적 데이터 값들을 토대로 수치해석을 하였으며 이론적인 수치해석을 위해서는 각 준위별 천이에 대한 비율식과 광섬유에 대하여 같은 방향으로 전파해 나가는 펌프파와 신호파에 대한 전파방정식의 해석이 필요하다. 먼저 각 준위별 천이에 대한 이온 밀도 N_i 에서의 비율식은 아래 식들과 같이 주어진다. 이러한 비율식의 해석으로부터 전파방정식을 유도할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} dN_3/dt = & W_{13}N_1 - (W_{35} + W_{34} + W_{32} + W_{31} \\ & + 1/\tau_3 + CN_3)N_3 + B_{43}N_4/\tau_4 \\ & + B_{53}N_5/\tau_5 \end{aligned} \quad (1)$$

$$dN_4/dt = (W_{34} + CN_3/2)N_3 - N_4/\tau_4 \quad (2)$$

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

여기서 C 는 ${}^1\text{G}_4$ 준위에서 ${}^1\text{D}_2$ 준위로의 cooperative upconversion 계수이고, W_{ij} 는 i 와 j 준위 사이의 천이율이다. W_{13} , W_{31} , W_{32} , W_{34} 와 W_{35} 는 $P\sigma_{13}\eta_p / Ah\nu_p$, $P\sigma_{31}\eta_p / Ah\nu_p$, $P\sigma_{32}\eta_s / Ah\nu_s$, $P\sigma_{34}\eta_s / Ah\nu_s$ 와 $P\sigma_{35}\eta_s / Ah\nu_s$ 로 각각 주어진다. 여기서 P 는 펌프파와 σ_{ij} 는 i 와 j 준위 사이의 유도방출 단면적, $\eta_{p,s}$ 는 코어에서의 펌프파와 신호파의 파워이다. A 는 코어적경, h 는 플랑크상수, $\nu_{p,s}$ 는 펌프와 신호파의 주파수이고, P_s 는 신호파이다. 총 밀도세기 $N_t = N_1 + N_3 + N_4 + N_5$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 2 준위의 밀도 N_2 는 존재하는 즉시로 기저 준위로 떨어지므로 무시할 수 있다. 또한 정상 상태에서의 각 준위의 이온 밀도 N_1 , N_3 , N_4 와 N_5 는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$N_1 = N_t - (1 + \tau_4(W_{35} + CN_3/2) + \tau_5 W_{35})N_{35} \quad (4)$$

$$N_3 = (-\beta + (\beta^2 - 4\alpha\gamma)^{1/2})/2\alpha \quad (5)$$

$$N_4 = \tau_4(W_{35} + CN_3/2)N_3 \quad (6)$$

$$N_5 = \tau_5 W_{35}N_3 \quad (7)$$

$$\alpha = C(\tau_4 + (2 - B_{43}) / W_{13})/2 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \beta = & 1 + W_{34}\tau_4 + W_{35}\tau_5 + (W_{35} + W_{34} + W_{32} \\ & + W_{31} - B_{43}W_{34} - B_{53}W_{35} + 1/\tau_3) / W_{13} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\gamma = -N_t \quad (10)$$

여기서 B_{43} , B_{53} 는 4준위와 5준위에서 3준위로 떨어지는 브랜치율이고, 각각 9%와 2%이다.

식(1-3)으로부터 계산된 각 준위의 밀도로부터 이득계수는 다음의 식으로 주어진다.

$$\sigma_s N_3 = \frac{\sigma_s N_1 P \sigma_{13} / A h \nu_p}{1/\tau_3 + P_s(\sigma_{32} + \sigma_{34}) / a h \nu_s} \quad (11)$$

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

σ_{13}	$4.24 \times 10^{-22} \text{cm}^2$	t_3	110 μs	C	$2 \times 10^{-10} \text{cm}^2$
σ_{32}	$3.73 \times 10^{-22} \text{cm}^2$	t_4	350 μs	Nt	$3.2 \times 10^{-20} \text{m}^2$
σ_{31}	$1.2 \times 10^{-22} \text{cm}^2$	t_5	58 μs		
σ_{34}	$1.0 \times 10^{-22} \text{cm}^2$	B ₄₃	9%		
σ_{35}	$0.6 \times 10^{-22} \text{cm}^2$	B ₅₃	2%		

여기서, $\sigma_s = \sigma_{32} - \sigma_{34}$ 이다.

수치 해석을 위해 쓰여진 각 파라미터들의 값은 여러 논문에서 발표되었고 표 1에 나타내었다[4,9-11].

III. PDFA의 기본특성

각 에너지 준위의 밀도는 2절에서 논의된 기본적인 방정식(1~3)을 사용하여 얻을 수 있다. 또한 방정식(1~3)의 풀이에 의해 얻어진 각 에너지 준위의 밀도 N_i 를 다음 식에 적용하여 길이 따른 여기 파워의 변화를 구할 수 있다[6].

$$P_p(z + \Delta z) = P_p(z) - (\sigma_{13} N_1 \beta_p - N_3 \beta_p (\sigma_{31} - \sigma_{35}) + \alpha) P_p(z) \Delta z \quad (12)$$

여기서 β_p 는 overlap factor 이고, α 는 background attenuation 이다. Pr 이온의 도핑농도가 1000ppm인 PDFA에서 여기파장이 1.017 μm 인 경우 α 는 0.07dB/m 이다. 여기서는 ASE의 효과는 고려되지 않았으며 여기 방식은 신호와 같은 방향으로 여기하는 전방 여기 방식이다.

계산을 위해 먼저 광섬유를 일정 길이의 세그먼트로 나누었으며, 각 세그먼트들은 각각의 여기 파워와 각 준위의 밀도를 가지게 된다. 초기의 여기 파워가 나누어진 광섬유의 첫 번째 세그먼트를 통과할 때 식(12)에 의해 여기 파워의 변화와 각 준위의 밀도가 계산된 후 다음 세그먼트로 이동한다. 다음 세그먼트로 전파된 여기 파워는 다시 파워의 변화량과 각 준위의 밀도를 계산하게 된다. 이렇게 한 세그먼트씩 이동하면서 광섬유의 마지막 세그먼트까지 여기 파워의 변화와 변화된 여기 파워에 의한 각 준위의 밀도를 계산할 수가 있다.

그림 2는 식(12)을 이용해서 계산한 광섬유 길이 따른 여기 파워의 변화를 보여준다. 광섬유 증폭기의 길이 따른 여기 파워의 변화를 계산

하기 위해 초기의 파워는 0.5W, 파장 1.017 μm 로 하였고, 광섬유증폭기의 Pr 이온의 도핑농도는 1000ppm, 길이 20m 인 광섬유증폭기에 대하여 시뮬레이션 하였다.

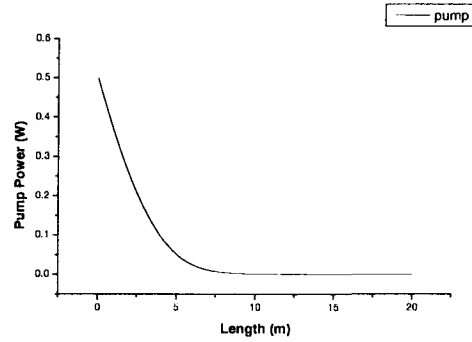


그림 2. 광섬유 길이에 따른 여기 파워의 변화
Fig. 2. Pump power versus doped fiber length

그림에서 보듯이 여기 파워는 약 5m 까지 파워가 광섬유증폭기에 거의 흡수되어서 이후로는 광섬유증폭기에 영향을 주지 못하는 것을 볼 수 있다. 이러한 시뮬레이션에 의해 각 여기 파워와 파장, 광섬유증폭기에 도핑된 이온의 농도에 대해 광섬유증폭기의 설계에 있어서 적당한 길이를 예측할 수 있을 것이다.

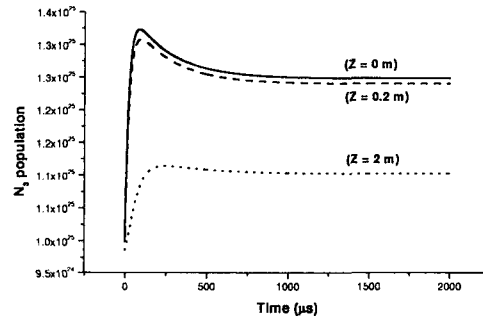


그림 3. 길이에 따른 N₃의 밀도반전
Fig. 3. N₃ population versus doped fiber length

그림 3은 초기의 파워가 0.5W, 파장 1.017 μm 이고, 광섬유증폭기의 Pr 이온의 도핑농도는 1000ppm, 길이 20m인 광섬유증폭기에 대하여 길이 따른 여기파워의 변화가 밀도반전에 주는 영향을 나타내고 있다. 광섬유증폭기의 길이가 각각 0 m, 0.2 m, 2 m일 때의 상준위의 밀도를 보여주고 있다. 길이에 따라서 여기파워가 감소하므로 영향받는 상준위의 포화밀도도 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 여기 파워에 따른 상준위의 밀도 변화를 보여준다. 각각 0.2W, 0.3W, 0.4W, 0.5W에 대해서 Z = 0 일때의 상준위 밀도 변화이다. 약

250 μ s 안에 상준위 밀도가 포화되는 것을 볼 수 있다.

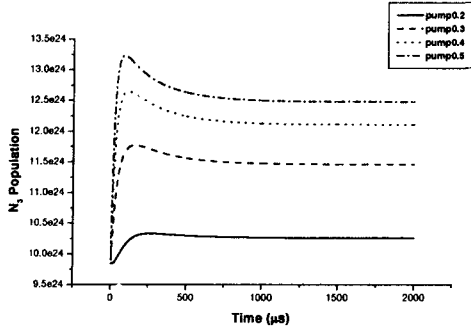


그림 4. 여기 파위에 따른 상준위의 밀도 변화
Fig. 4. Upper level population density versus pump power

이상과 같이 얻어진 PDFA의 기본 특성을 바탕으로 과도적인 현상에 대한 이론해석 결과도 발표한 예정이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 1.3 μ m 대역에서 증폭특성을 갖는 PDFA의 일반적 특성과 과도응답을 이론적으로 해석하였다. 모델은 밀도반전의 형성과정, 여기파워, 신호파워와 증폭기를 따라 변화하는 신호파워를 포함한다. 모델을 이용하여 광섬유 증폭기의 길이에 따른 각 에너지준위의 밀도, 여기파워, 이득의 해석과 시간의 변화에 따른 각 에너지준위의 밀도변화와 이득을 해석하였다. 이러한 수치해석의 결과는 광섬유증폭기의 이득 포화와 복구시간을 예측할 수 있게 해주고, 이득의 포화와 복구시간이 광 펄스의 증폭에 미치는 영향을 예측할 수 있었다.

시뮬레이션의 결과, 여기광의 파장 1.017 μ m, 파워 0.5W이고 광섬유증폭기의 Pr 이온의 도핑농도가 1000ppm일 때, 여기광의 파워는 광섬유증폭기를 지나며 약 5m 까지 파워가 급격히 흡수되면서 이후로는 신호파의 증폭에 거의 영향을 주지 못하였으며, 길이에 따라서 여기광의 파워가 감소하므로 영향받는 상준위의 포화밀도도 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 여기광의 파워 0.5W 일 때 광섬유 증폭기를 지나서 신호가 갖는 이득은 약 5m 에서 30dB의 이득으로 포화되는 것을 알 수 있었다.

본 논문에서 얻어진 시뮬레이션의 결과는 광섬유증폭기의 길이와 입사되는 여기광의 파워에 따른 증폭이득의 변화, 시간의 변화에 따른 각 에너지준위의 밀도를 예상할 수 있게 해 줌으로써 최적의 PDFA 시스템 구축을 가능하게 할 것이다.

참고문헌

- [1] Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Kitagawa, S. Takahashi, E. Snitzer and G. H. Sigel, Jr., "Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifier operating at 1.3 μ m," in Tech. Dig. of Optical Fiber Communication Conf., (1991)
- [2] H.Ammann, W.Hodel and H.P.Weber, "Experimental and numerical investigation of short pulse propagation and amplification around 1.3 μ m in a Nd³⁺-doped fluoride fiber", Optics Comm. 113 (1994) 39
- [3] Jamal T. Manassah, Barry Gross, "Propagation of femtosecond pulses in a fiber amplifier" Opt. Commun. 122 (1995) 71
- [4] 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 (1994) 421
- [5] M. Eval, E. Greenberg, R. Reisfeld, "Spectroscopy of Praseodymium (III) in zirconium glass", Chem. Physics Lett. Vol. 7, (1985) 108
- [6] Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Kitagawa and S. Takahashi, "Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifier operation at 1.3 μ m", Optics Lett., Vol. 16, No. 22, 1747 (1991)
- [7] Y. Nishida, M. Yamada, T. Kanamori, K. Kobayashi, J. Temmyo, S. Sudo and Y. Ohishi, "Development of Efficient praseodymium-doped fiber amplifier", IEEE Journal of Quantum Elec., Vol. 34, No. 8, 1332 (1998)
- [8] 염진용, "초고속 광통신을 위한 광섬유증폭기의 최적화에 관한 연구", 목원대학교 석사학위논문, 7 (1999)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] M. Karasek, "Analysis of gain dynamics in Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifiers", IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 7, No. 3, 299 (1995)