

Loss mechanism을 고려한 밀도 반전이 고정된 EDFA의 black box 모델링에 대한 연구

민법기 · 이원재 · 박재형 · 박남규[†]

서울대학교 전기 · 컴퓨터공학부 광통신시스템연구실

(주) 151-742 서울시 관악구 신림동 산56-1

(2001년 1월 8일 받음, 2001년 5월 21일 수정본 받음)

본 논문에서는 최근 주목받고 있는 장파장 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)에서의 성능 분석, 특히 전력변환률(Power Conversion Efficiency)의 예측을 위한 밀도반전이 고정된 상태에서의 black box 모델을 유도하고 이득이 평탄화된 장파장 EDFA의 요구되는 펌프파워측면에서 수치해석과 실험을 통하여 유도된 모델의 유용성을 증명하였다. 모델을 통한 펌프파워의 예측치는 실험오차 범위내에서 1.9%이내의 정확성을 보였다. 밀도반전이 고정된 상태에서의 black box 모델은 일반적으로 980 nm, 1480 nm 펌핑의 경우 모두 적용이 가능하며, EDF의 3가지 이상의 길이에 대하여 입력 펌프파워와 입력/출력 신호 파워의 관계를 측정하여 밀도반전이 일정한 상태에서 다른 동작점의 성능을 예측할 수 있었다. 또한 단파장 EDFA에서는 손실의 효과가 크게 나타나지 않아 해석적인 해와 일치하는 결과가 알려져 있었으나 이에 비해 장파장 EDFA에서는 여러 가지 손실의 효과가 더욱 크게 작용하게 되며, 특히 paired ion의 효과로 인한 손실로써 비선형적인 관계식이 유도됨을 보였다.

분류코드 : FO.020.

I. 서 론

현재의 장파장 EDFA는 단파장 EDFA에 비하여 일반적으로 낮은 전력변환률의 영역에서 동작한다.^[1] 이러한 장파장 EDFA의 낮은 전력변환률은 많은 경우, 펌프파워를 대부분 소모하는 강한 backward ASE의 생성에 기인하고 있다.^[2] 특히, 980 nm 펌프를 사용하는 경우 높은 펌프 흡수계수로 인하여, 입력단에서 밀도반전의 정도가 1480 nm 펌핑의 경우에 비해 높기 때문에 980 nm 펌핑의 경우 더 많은 backward ASE가 생성되며 이는 심각하게 전력변환률을 낮추는 주된 원인이 되고 있다. 따라서 현재까지의 연구는 이러한 강한 backward ASE를 억제하거나 이를 다시 펌핑광원으로 재활용하여 장파장 EDFA의 전력변환률을 높이는 방향으로 진행되고 있다.^[2,3] 또 다른 이유로서 장파장 EDFA에서의 증폭과정은 주펌프(980 nm 또는 1480 nm)에서 1550 nm 대역으로의 첫 번째 전이과정에 이은 1550 nm 대역의 광자가 다시 장파장의 광자를 펌핑하는 형식의 비효율적 2단계 증폭과정을 보이기 때문이다.^[2] 따라서 장파장 EDFA의 제작과 실제 구현에 있어서 전력변환률의 정확한 예측과 측정은 실제적인 제작에 있어 필수적이라 할 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 전력변환률의 간단한 측정 방법을 black box 모델을 사용하여 접근해 본다.

기존의 EDFA의 모델들은 기본적으로 spectroscopic parameter들을 필요로 하며 EDF의 성능분석을 위하여서는 이러한 parameter의 측정을 기본으로 한다는 점과 해석적 모델을 제외하면 양 끝단에서의 경계값의 만족을 위하여 모두 iterative algorithm을 필요로 한다는 점에서 한계점을 가질 수 밖에 없

었다. Black box 모델링은 이러한 parameter의 측정 없이 외부적으로 측정 가능한 증폭기의 특성을 이용하여 다른 동작점에서의 값을 예측하자는 의도에서 처음으로 제안되었으며 모델의 적용범위에 따라서 여러 가지 다른 증폭기의 특성을 이용하여 왔다.^[4,5]

본 논문에서는 기존의 black box 모델링의 개념을 더욱 확장하여 밀도반전이 고정된 경우 입력 펌프파워와 신호파워 사이의 관계식으로부터 새로운 black box 모델을 유도하며, 또한 장파장 EDFA에서의 homogeneous upconversion, ESA(Excited State Absorption), paired ion quenching등의 영향을 수치해석적인 방법을 통하여 살펴본다.

II. 이론적 배경

EDFA의 해석적 모델에 의하면 ASE self-saturation이 없다고 가정할 때 다음과 같은 입력/출력 신호파워와 입력 펌프파워사이의 간단한 관계를 도출할 수 있다.^[6]

$$P_p^{in} = \zeta \cdot Inv \cdot L + \frac{P_s^{in}}{P_s^{IS}}(G - 1) = \zeta \cdot Inv \cdot L + \frac{P_s^{out}}{P_s^{IS}}\left(1 - \frac{1}{G}\right) \quad (1)$$

여기서 ζ 는 saturation parameter이고, Inv 는 평균 밀도 반전, L 은 EDFA의 길이, P_s^{IS} 는 intrinsic saturation parameter를 나타내게 된다. 또한, homogeneously broadened medium을 가정할 경우, gain은 평균 밀도반전 개념을 이용하여 다음 식과 같이 Inv 과 L 의 함수로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} G_{dB}(L, Inv) &= \gamma_{dB/m}(Inv)L \\ G(L, Inv) &= \exp[\gamma(Inv)L] \end{aligned} \quad (2)$$

[†]E-mail: nkpark@plaza.snu.ac.kr

식 (1)에 식 (2)를 대입하면 gain이 큰 경우, 입력 펌프파워를 밀도반전과 신호파워, EDF의 길이 L 의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_p^{in}(L, Inv, P_s^{in}) &= \delta \cdot L + \chi(\exp[\gamma(Inv)L] - 1)P_s^{in} \\ &\equiv \delta \cdot L + \chi \exp[\gamma(Inv)L]P_s^{in} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\gamma(Inv)$ 은 Inv 의 함수로 표현한 gain coefficient^o고 δ 와 χ 는 각각 Inv 과 P_s^{in} 의 값과 관계된 상수이다. 따라서 위의 식 (3)에서 Inv 과 L 을 고정시키는 경우 요구되는 입력 펌프파워는 입력 신호파워의 1차함수로 표현가능하며, 신호가 없는 경우에 필요한 밀도반전을 유지하기 위한 펌프파워는 EDF의 길이에 비례하게 될 것임을 알 수 있다. 여기서 펌프파워와 입력 신호파워 사이의 기울기는 $G-1 \approx G$ (길이에 대한 지수함수)에 비례한다. 이러한 관계식은 단파장 EDFA에서는 실험 결과와 잘 부합하는 것을 기준의 연구결과에서 볼 수 있다.^[7] 하지만, 장파장 EDFA의 경우, 여러 가지 손실효과의 영향과 강한 backward ASE의 존재로 인하여 위의 식 (3)에서 상당히 벗어나게 된다. 이러한 결과는 기본적으로 식 (1)이 ASE self-saturation과 여러 손실효과를 무시한 가정으로부터 비롯된 것이다. III과 IV에서 실험과 수치해석을 통하여 장파장 EDFA와 단파장 EDFA 모두에 적용가능하며, 또한 여러 손실효과를 고려할 때 새로이 유도한 경험적 식은 다음과 같다. 식 (3)을 변형하여 다음과 같이 입력 신호파워에 관련된 손실 항을 추가하면 모든 입력 신호파워의 범위에서 정확한 예측이 일반적으로 가능해진다.

$$\begin{aligned} P_p^{in}(L, Inv, P_s^{in}) &= [\delta_0 + \delta_1 L + \delta_2 L^2] + \chi_0 \\ &\quad \exp[\chi_1 L]P_s^{in} + [\alpha_0 + \alpha_1 L + \alpha_2 L^2] \exp[-\beta P_s^{in}] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 첫 번째 항과 두 번째 항은 일반적인 선형관계의 연장선상에서 해석되어질 수 있으며, 세 번째 항은 입력 신호파워에 관련된 펌프파워의 추가 손실을 설명한다. δ_0 와 α_0 는 입력단에서의 손실과 관련된 항이며, L_2 항은 paired ion의 개수와 관련된 손실향이다. β 의 경우는 대략적으로 길이와 입력 신호파워에 관련이 없는 상수로써 EDF의 특성과 연관되어진 것으로 보인다. Paired ion의 비율을 높일 때 β 의 값은 천천히 증가하는 특성을 보였으며, 어느 정도 비율이 높아지면 증가율은 점점 낮아진다. 또한 다른 손실에 관한 parameter에 대해서도 약한 상관관계를 가진 것으로 보인다. 따라서, 3가지 길이의 EDF를 측정하여 위의 식 (3)에 fitting하면 P_p^{in} 을 구할 수 있고 따라서 모든 동작점에서의 성능, 전력변환률의 예측이 다음 식을 통하여 가능해지게 된다.

$$\begin{aligned} PCE(L, Inv, P_s^{in}) &= \frac{P_s^{out} - P_s^{in}}{P_p^{in}} \\ &= \frac{(10^{\frac{G_{db}(L, Inv)/10}{10}} - 1)P_s^{in}}{[\delta_0 + \delta_1 L + \delta_2 L^2] + \chi_0 \exp[\chi_1 L]P_s^{in} + [\alpha_0 + \alpha_1 L + \alpha_2 L^2] \exp[-\beta P_s^{in}]} \end{aligned} \quad (5)$$

III. 시뮬레이션을 통한 검증

앞 절에서 제시된 밀도반전이 고정된 상태에서의 black box 모델에의 여러 가지 손실의 영향을 알아보기 위하여 신호 exited state absorption(ESA), 펌프 ESA, ion pairing, homogeneous upconversion(HUC) 등을 고려한 보다 전반적인 수치해석을 수행하였다. 여기서 사용한 paired ion에 대한 비율방정식(Rate Equation)은 다음과 같으며 3개 이상의 erbium ion^o clustered 된 경우는 고려하지 않았다.^[8]

$$\begin{aligned} \frac{dN_{1,pr}}{dt} &= -2 \left[W_e(v_p) + \sum_{i=1}^n W_e(v_i) + \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_{pr}} \right] N_{1,pr} \\ &\quad + \left[W_a(v_p) + \sum_{i=1}^n W_a(v_i) \right] [N_{2,pr} + N_{3,pr}] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(N_{2,pr}N_{3,pr})}{dt} &= \left[W_e(v_p) + \sum_{i=1}^n W_e(v_i) + \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_{pr}} \right] N_{1,pr} \\ &\quad + \left[W_a(v_p) + \sum_{i=1}^n W_a(v_i) \right] N_{4,pr} \\ &\quad - \left[W_e(v_p) + W_a(v_p) + \sum_{i=1}^n W_e(v_i) + \sum_{i=1}^n W_a(v_i) - \frac{1}{\tau} \right] \\ &\quad \langle N_{2,pr}, N_{3,pr} \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{4,pr}}{dt} &= \left[W_e(v_p) + \sum_{i=1}^n W_e(v_i) + \frac{1}{\tau} \right] [N_{2,pr} + N_{3,pr}] \\ &\quad - \left[2W_a(v_p) + 2 \sum_{i=1}^n W_a(v_p) \right] N_{4,pr} \end{aligned} \quad (8)$$

$$N_{u,erp} = 2N_{1,pr} + N_{2,pr} + N_{3,pr} \quad (9)$$

$$N_{2,pr} = N_{3,pr} \quad (10)$$

여기서 각각의 paired ion의 상태는 다음 그림 1과 같다. 상태 1은 서로 연관된 erbium ion 2개가 모두 여기된 경우이고, 상태 2와 상태 3은 2개중 1개만이 여기된 경우, 상태 4는 2개의 erbium ion^o 모두 여기되지 않은 상태를 나타낸다.

위의 paired ion에 관한 비율방정식과 함께 homogeneous upconversion에 의한 기본적인 비율방정식의 변형은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{dN_u}{dt} &= \left[W_a(v_p) + \sum_{i=1}^n W_a(v_i) \right] N_l - W_e(v_p)N_p \\ &\quad - \left[\sum_{i=1}^n W_e(v_i) + \frac{1}{\tau} \right] N_u - KN_u^2 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 K 는 homogeneous upconversion 상수이다. 수치해석

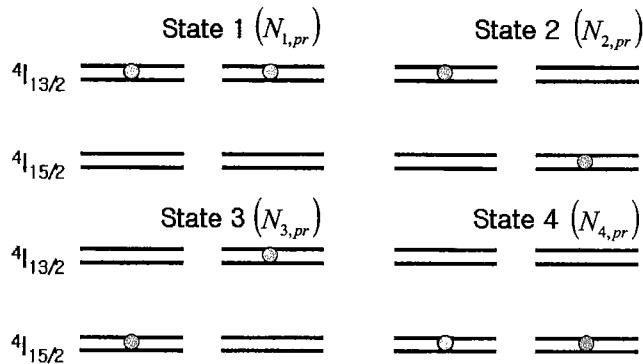


그림 1. Erbium ion pair의 4가지 상태.

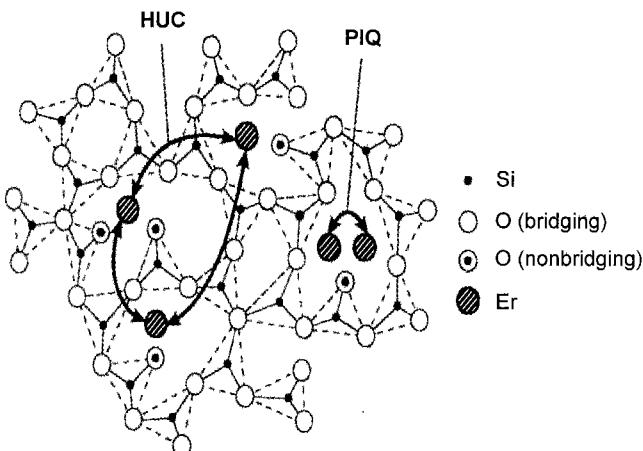


그림 2. Homogeneous upconversion과 paired ion quenching.

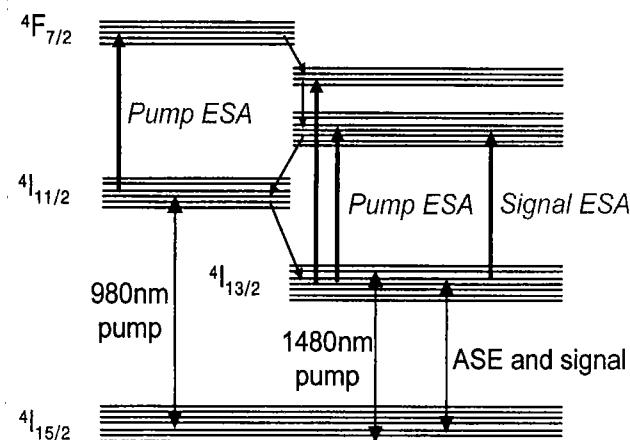


그림 3. 여러 loss mechanism과 관련된 erbium의 전이.

에서 고려되어진 여러 가지 손실효과와 그에 관련된 전이는 다음 그림 2와 3에 도시되어 있다.^[8-16]

위의 비율방정식을 각각의 상태에 관하여 정상상태 조건을 적용하여 구하여 다음 전파방정식(Propagation Equation)에 대입한다. 아래의 식은 980 nm 펌핑의 경우 EDFA를 3-level 시스템으로 가정할 경우의 식이며 비슷한 식을 1480 nm 펌핑의 경우에 대하여 구할 수 있다. 기본적으로 양방향으로 진행하는 광자들이 존재하므로 완화법(Relaxation Method)을 사용

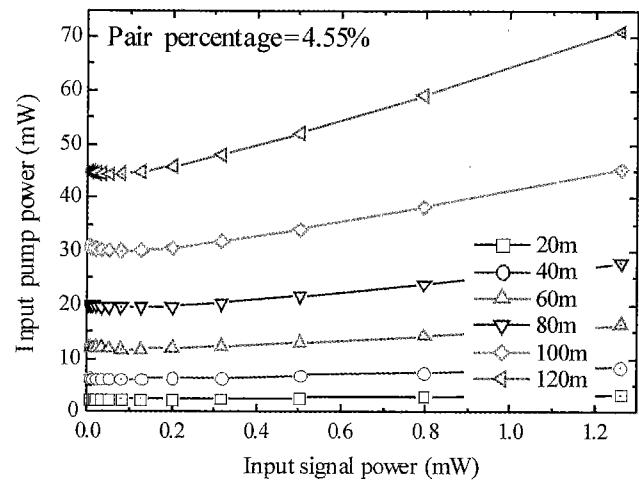


그림 4. Loss mechanism을 고려했을 때의 입력 펌프파워와 입력 신호파워의 관계(@980 nm 펌프).

하여 two-point 경계값 문제를 반복적으로 풀어야 한다.^[17,18]

$$\frac{dP_p^{\pm}(z)}{dz} = \mp \left[\alpha_p(N_l + 2N_{pr,4} + N_{pr,2} + N_{pr,3}) + \alpha_p^{ESA} N_p + (\alpha_{p,u}^{ESA} - g_p^*)(2N_{pr,1} + N_{pr,2} + N_{pr,3}) - l_p \right] P_p^{\pm}(z) \pm \gamma_p P_p^{\mp}(z) \quad (12)$$

$$\frac{dP_s^{\pm}(z)}{dz} = \pm \left[(g_s^* - \alpha_{s,u}^{ESA})(N_u + 2N_{pr,1} + N_{pr,2} + N_{pr,3}) - \alpha_s(N_l + 2N_{pr,4} + N_{pr,2} + N_{pr,3}) - l_s \right] P_s^{\pm}(z) \pm \gamma_s P_s^{\mp}(z) + 2\hbar v_s \Delta v_s g_s^*(N_u + 2N_{pr,1} + N_{pr,2} + N_{pr,3}) \quad (13)$$

여기서 \$N_l\$, \$N_u\$, \$N_p\$는 각각 \$4I_{15/2}\$, \$4I_{13/2}\$, \$4I_{11/2}\$의 erbium의 밀도를 나타내며, \$\alpha_p^{ESA}\$는 \$4I_{11/2}\$에서 \$4F_{7/2}\$로의 펌프 ESA 흡수 계수이고 \$\alpha_{p,u}^{ESA}\$는 \$4I_{13/2}\$에서의 더 높은 에너지 준위로의 펌프 ESA 흡수계수이며, \$\alpha_{s,u}^{ESA}\$는 \$4I_{13/2}\$에서의 더 높은 에너지 준위로의 신호 ESA 흡수계수이다. 위에서 전술한 손실의 효과들을 모두 고려하여 해석을 하는 경우 장파장 EDFA의 경우는 단파장 EDFA의 경우의 선형적 예측과는 달리 다음 그림 4에서 볼 수 있듯이 식 (4)에 부합하는 다른 경향을 보여준다.

즉, 입력 신호파워가 큰 경우에는 선형적인 관계가 유지됨에 반하여 입력 신호파워가 작은 경우에는 선형적인 관계에서 벗어나게 된다. 또한 신호가 없는 경우에 필요한 밀도반전을 유지하기 위한 펌프파워 역시 길이에 대한 비례관계에서 벗어나 2차 이상의 관계식을 가지게 된다. 그림 4는 신호/펌프 background loss가 \$6.6\text{ dB/km}(@1550\text{ nm})\$와 \$19.1\text{ dB/km}(@980\text{ nm})\$이고, pump-state ESA absorption은 \$4.0304\text{ dB/m}\$, \$4I_{13/2}\$로부터의 펌프 ESA는 \$0\text{ dB/m}\$, 신호/펌프 레일레이 산란계수는 \$1.7239 \times 10^{-6}/\text{m}(@1550\text{ nm})\$와 \$4.9556 \times 10^{-6}/\text{m}(@980\text{ nm})\$, fluorescence lifetime은 \$10\text{ ms}\$, 펌프 state lifetime은 \$7\mu\text{s}\$, homogeneous upconversion coefficient는 \$1.5 \times 10^{-24}/\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}\$, paired ion의 비율은 \$4.55\%\$, paired ion의 lifetime은 \$10\text{ }\mu\text{s}\$라고 가정하여 최대 이득 평탄화도를 나타낼 때의 입력 신호파워와 입력 펌프파워의 관계식을 구한 것이다. 시뮬레이션상에서는 paired ion의 비율, 신호 ESA의 크기, 신호 ESA 대역의 대역폭 및 펌프 ESA의

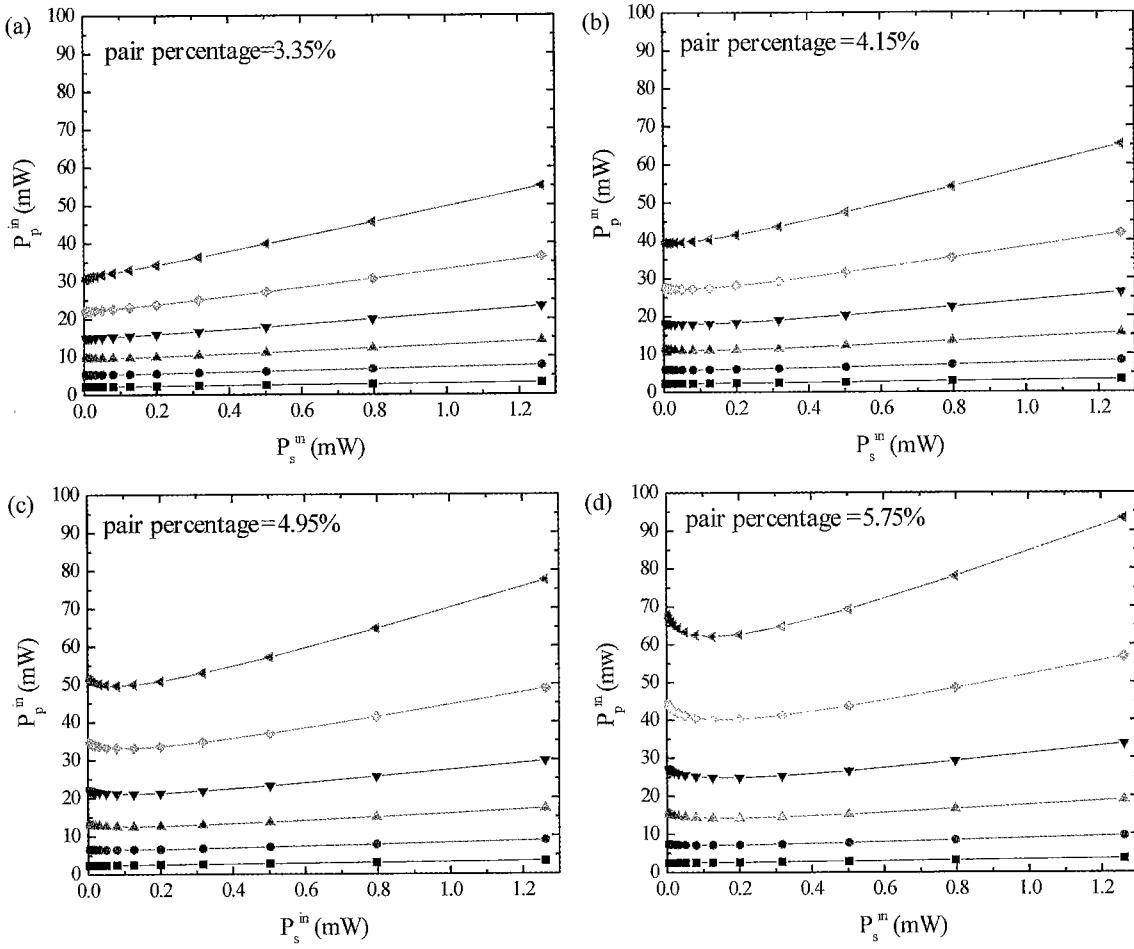


그림 5. Paired ion의 비율에 따른 관계. (a) Paired ion의 비율이 3.35%인 경우의 관계, (b) Paired ion의 비율이 4.15%인 경우의 관계, (c) Paired ion의 비율이 4.95%인 경우의 관계, (d) Paired ion의 비율이 5.75%인 경우의 관계.

크기 등을 변수로 하여 어떤 loss mechanism¹⁾이 가장 주요한 요인으로 작용하는지를 살펴보았으며, paired ion의 비율에 따라 small signal 영역에서의 비선형적인 성질과 요구되는 펌프 파워의 증가가 가장 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 이러한 paired ion의 비율변화에 따른 그래프는 그림 5에 도시되어 있다.

그림 4에서 볼 수 있는 선형적인 관계와의 벗어나는 정도에 대한 각 loss mechanism의 기여정도를 살펴보기 위하여 전파 방정식을 이용하여 손실의 각 부분을 분리해내었다. 다음 식은 background loss, paired ion, ESA에 의한 파워의 손실을 나타낸 식이다.

$$dP_s^{\text{background}} = -\alpha_s P_s dz \quad (14)$$

$$dP_p^{\text{background}} = -\alpha_p P_p dz \quad (15)$$

$$dP_s^{\text{ESA}} = -\alpha_{s,u}^{\text{ESA}} N_2 P_s dz \quad (16)$$

$$dP_p^{\text{ESA}} = -\alpha_{p,u}^{\text{ESA}} N_3 P_p dz \quad (17)$$

$$dP_s^{\text{pair}} = -2[\alpha_s(N_{pr,1} + N_{pr,2}) - g_s^*(N_{pr,1} + N_{pr,2})]P_s dz \quad (18)$$

$$dP_p^{\text{pair}} = -2[\alpha_p(N_{pr,4} + N_{pr,2}) - g_p^*(N_{pr,1} + N_{pr,2})]P_p dz \quad (19)$$

위 식들을 사용하여 여러 loss mechanism에 의한 펌프와 신호파워의 손실을 두 가지의 길이의 EDF에 대하여 도시하면 다음 그림 6과 그림 7과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 대략적

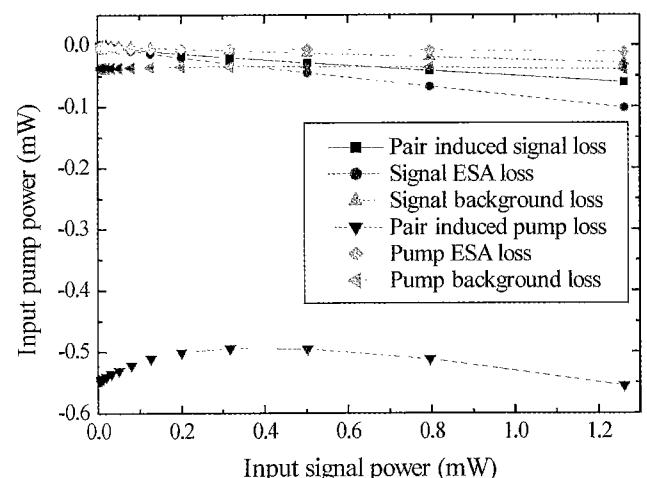


그림 6. Loss mechanism에 의한 펌프와 신호파워의 손실(EDF 길이 = 20 m).

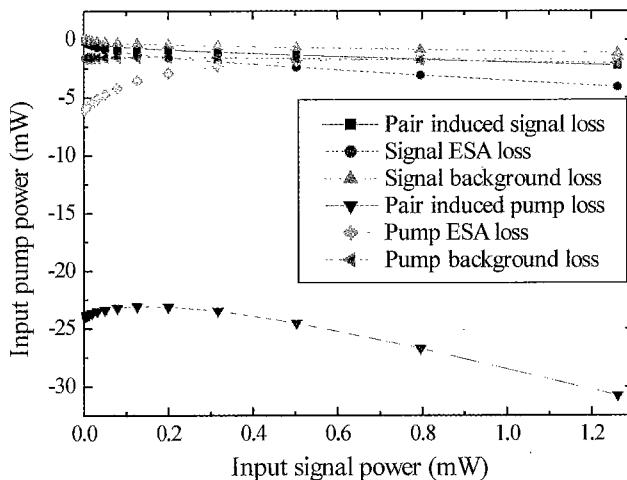


그림 7. Loss mechanism에 의한 펌프와 신호파워의 손실(EDF 길이 = 120 m).

인 loss의 입력 신호파워에 대한 모양은 길이와 상관없이 비슷 하지만 크기는 길이가 길어짐에 따라 훨씬 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 여러 가지 loss mechanism 중에서 paired ion에 의한 펌프파워의 손실이 가장 중요하다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 paired ion의 개수가 매우 작은 비율을 차지하더라도 paired ion은 lifetime이 일반 erbium ion에 비하여 $\sim 10^3$ 정도의 작은 값을 가지고 증폭과정에 참여하지 않게 되므로 이러한 빠른 응답속도가 파워손실의 많은 부분을 차지하게 되는 것을 이해할 수 있다. 또한 대부분의 경우 pair-induced quenching은 농도가 높은 EDF의 경우에 해당한다고 알려있으나, EDF의 제작시 erbium ion의 clustering은 낮은 농도에서도 완전히는 제거할 수 없다는 사실도 알려져 있으므로 EDF 제작과 성능분석시 이러한 ion pairing에의 주의가 필수적이라 생각된다. 다음의 표 1은 simulation 결과의 식 (4)에의 fitting data로써 이러한 관계식을 뚜렷이 보여준다.

위의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) EDF의 세 길이 L_0 , L_1 , L_2 에서 P_p^{in} 과 P_s^{in} 의 관계를 식 (3.15)로 fitting하고 각 길이에서의 gain을 측정하여 $G(dB) = (\text{상수})L$ 의 형식으로 fitting한다.
- 2) 상수 β 의 값을 구한다.
- 3) 식 (4)의 나머지 fitting 상수를 구한다.
- 4) 임의의 길이 L 에서의 gain은 $G(dB) = (\text{상수})L$ 으로 구한다.
- 5) 임의의 길이 L 에서의 P_p^{in} 는 식 (4)를 통하여 P_s^{in} 의 함수

표 1. Fitting result of simulation data to (4)

EDF length (m)	$\alpha_0 + \alpha_1 L + \alpha_2 L^2$ [mW]	β [mW ⁻¹]	$\chi_0 \exp[\chi_1 L]$	$\delta_0 + \delta_1 L + \delta_2 L^2$ [mW]
20	0.076	7.210	0.892	2.267
40	0.585	7.210	2.299	5.684
60	1.516	7.210	4.595	10.553
80	2.680	7.210	8.360	17.362
100	4.055	7.210	14.638	26.672
120	5.481	7.210	25.039	39.367

로 표현한다.

6) 임의의 길이 L 에서의 PCE는 $(GP_s^{in} - P_s^{in})/P_p^{in}$ 로 표현할 수 있다.

980 nm 펌프의 경우에 비하여 1480 nm 펌프의 경우는 이러한 비선형의 효과가 거의 없는 것을 simulation을 통하여 확인할 수 있다. 일반적으로 980 nm에 비하여 1480 nm 펌프는 입력단에서의 밀도반전이 낮게 되고 이러한 이유로 paired ion에 의한 손실이 적은 것으로 추정된다.

IV. 실험을 통한 검증 및 결론

앞 절에서 수치해석적 방법을 통한 밀도반전이 고정된 EDFA의 black box 모델을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 신호로써 1570 nm와 1580 nm의 두 개의 tunable external cavity laser를 사용하여 밀도반전을 최대 이득평탄화가 된 상태로 유지하였으며, EDF는 lucent사의 HE980을 사용하였다. 사용된 EDF는 농도가 $4.3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 로써 길이는 63.6 m, 80.1 m, 94.5 m와 110.8 m의 4가지를 사용하였으며 펌프는

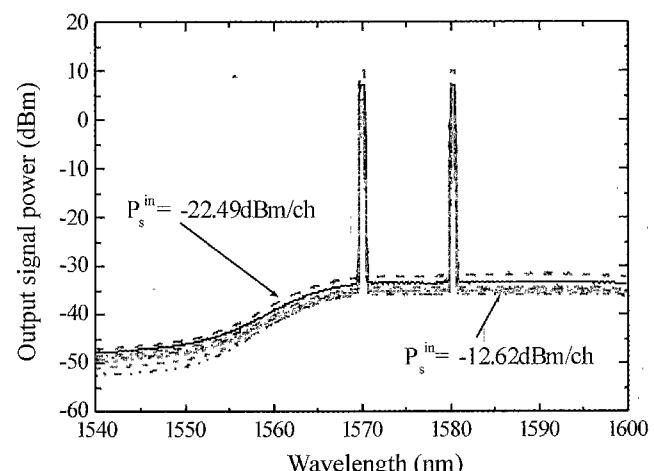


그림 8. 최대 이득 평탄화시 입력 신호파워의 변화에 따른 출력 파워 spectrum.

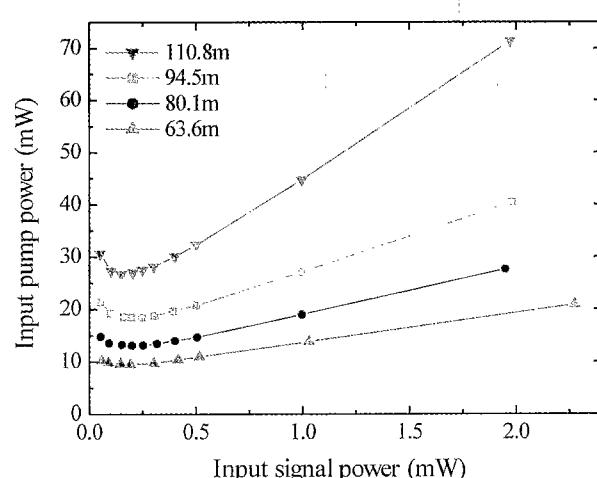


그림 9. 입력 펌프파워와 입력 신호파워의 관계(@976 nm 펌프).

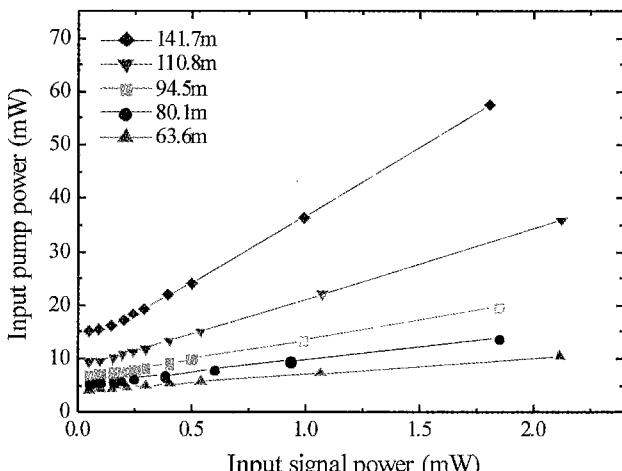


그림 10. 입력 펌프파워와 입력 신호파워의 관계(@1461 nm 펌프).

표 2. Fitting result of experimental data to (4)

EDF length (m)	$\alpha_0 + \alpha_1 L + \alpha_2 L^2$ [mW]	β [mW ⁻¹]	$\chi_0 \exp[\chi_1 L]$	$\delta_0 + \delta_1 L + \delta_2 L^2$ [mW]
63.6	3.002	9.165	5.662	7.922
80.1	6.490	9.165	8.872	10.275
94.5	10.458	9.165	13.264	14.064
110.8	16.058	9.165	26.492	18.932

976 nm와 1461 nm의 두가지를 사용하였다. 다음 그림 8은 EDF의 길이가 110.8 m일 때의 최대로 이득평탄화된 출력 spectrum을 보여준다.

그림 9와 10은 976 nm 펌프와 1461 nm 펌프의 경우 입력 신호파워를 변화하면서 최대의 이득평탄도를 가질 때의 펌프 파워를 표시한 것이다. 앞 절의 simulation 결과에서 볼 수 있었던 small signal 영역에서의 비선형성과 신호가 없는 경우에 필요한 밀도반전을 유지하기 위한 펌프파워가 길이에 비례하지 않음을 확인할 수 있으며 1461 nm의 경우 이러한 비선형성이 더 작음을 알 수 있다. 따라서 1480 nm 펌프를 사용하는 경우에는 2개의 동작점의 측정을 통하여도 비교적 정밀한 예측이 가능하게 된다.

그림 9를 식 (4)에 fitting한 결과는 다음 표 2와 같다. 여기서 simulation 결과와 마찬가지로 식 (4)에 상당히 정확히 fitting할 수 있었다. 즉, 3 point만의 fitting을 통하여 나머지 1 point에서의 펌프파워를 예측하는 경우 최대의 오차는 1.9% 이하였다.

따라서, 밀도반전이 고정된 black box 모델은 실험에서도 적용이 가능하였으며 또한 장파장 EDFA에서의 성능제한 요소로써 paired ion의 영향을 알 수 있었다. 이전의 장파장 EDFA에 대한 연구에서는 전력변환률이 980 nm 펌프의 사용 시 1480 nm 펌프를 사용할 때보다 낮은 이유로써 ESA의 영향이라는 제안을 하였으나^[1] 비교적 낮은 농도의 EDF에서의 실험과 수치해석 결과로부터 paired ion에 의한 펌프파워의 손실이 보다 근본적인 원인이라고 생각된다.

참고문헌

- [1] H. Ono, M. Yamada, T. Kanamori, S. Sudo, and Y. Ohishi, "1.58-μm Band Gain-Flattened Erbium-Doped Fiber Amplifiers for WDM Transmission Systems," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 3, pp. 490-496, 1999.
- [2] B. Min, H. Yoon, W. J. Lee, and N. Park, "Coupled Structure for Wide-Band EDFA with Gain and Noise Figure Improvements from C to L-Band ASE Injection," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, no. 5, pp. 480-482, 2000.
- [3] J. H. Lee, U.-C. Ryu, S. J. Ahn, and N. Park, "Enhancement of Power Conversion Efficiency for an L-Band EDFA with a Secondary Pumping Effect in the Unpumped EDF Section," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, no. 1, pp. 42-44, 1999.
- [4] J. Burgmeier, A. Cords, R. März, C. Schäffer, and B. Stummer, "A Black Box Model of EDFA's Operating in WDM Systems," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, no. 7, pp. 1271-1275, 1998.
- [5] X. Zhang and A. Mitchell, "A Simple Black Box Model for Erbium-Doped Fiber Amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 28-30, 2000.
- [6] A. A. M. Saleh, R. M. Jopson, J. D. Evankow, and J. Aspell, "Modeling of Gain in Erbium-Doped Fiber Amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 2, no. 10, pp. 714-716, 1990.
- [7] S. Y. Park, H. K. Kim, C. S. Park, and S.-Y. Shin, "Doped fibre length and pump power of gain-flattened EDFA's," *Electronics Letters*, vol. 32, no. 23, pp. 2101-2102, 1996.
- [8] P. F. Wysocki, J. L. Wagener, M. J. F. Digonnet, and H. J. Shaw, "Evidence and modeling of paired ions and other loss mechanisms in erbium-doped silica fibers," in *Proc. SPIE Fiber Laser Sources and Amplifiers IV*, vol. 1789, pp. 66-79, 1992.
- [9] P. F. Wysocki, M. J. F. Digonnet, B. Y. Kim, and H. J. Shaw, "Characteristics of Erbium-Doped Superfluorescent Fiber Sources for Interferometric Sensor Applications," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 550-567, 1994.
- [10] F. D. Pasquale and M. Federighi, "Modelling of Uniform and Pair-Induced Upconversion Mechanisms in High-Concentration Erbium-Doped Silica Waveguides," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 9, pp. 1858-1864, 1995.
- [11] P. Myslinski, D. Nguyen, and J. Chrostowski, "Effects of Concentration on the Performance of Erbium-Doped Fiber Amplifiers," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 112-120, 1997.
- [12] P. Blixt, J. Nilsson, T. Carlén, and B. Jaskorzynska, "Concentration-Dependent Upconversion in Er³⁺-Doped Fiber Amplifiers: Experiment and Modeling," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 3, no. 11, pp. 996-998, 1991.

- [13] E. Delevaque, T. Georges, M. Monerie, P. Lamouler, and J.-F. Bayon, "Modeling of Pair-Induced Quenching in Erbium-Doped Silicate Fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 73-75, 1993.
- [14] J. Nilsson, B. Jaskorzynska, and P. Blixt, "Performance Reduction and Design Modification of Erbium-Doped Fiber Amplifiers Resulting from Pair-Induced Quenching," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 12, pp. 1427-1429, 1993.
- [15] J. Nilsson, P. Blixt, B. Jaskorzynska, and J. Babonas, "Evaluation of Parasitic Upconversion Mechanisms in Er³⁺-Doped Silica-Glass Fibers by Analysis of Fluorescence at 980 nm," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 341-349, 1995.
- [16] P. Myslinski, C. Szubert, A. J. Bruce, D. J. DiGiovanni, and B. Palsdottir, "Performance of High-Concentration Erbium-Doped Fiber Amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, no. 8, pp. 973-975, 1999.
- [17] C. R. Giles and E. Desurvire, "Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 271-283, 1991.
- [18] C. R. Giles and E. Desurvire, "Propagation of Signal and Noise in Concatenated Erbium-Doped Fiber Optical Amplifiers," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 147-154, 1991.

Constant inversion black box model of EDFA including various loss mechanisms

Bumki Min, Won Jae Lee, Jaehyoung Park, and Namkyoo Park[†]

School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University, Seoul 151-742, KOREA

[†]E-mail: nkpark@plaza.snu.ac.kr

(Received January 8, 2001 ; Revised manuscript received May 21, 2001)

We propose a constant inversion black box model of erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs) for exact performance predictions for EDFAs operated in the gain-flattened condition. The validity of the newly proposed model was experimentally verified by predicting the performance of EDFAs for the L band, within 1.9% required pump power discrepancy. The role of ion pairing effects on the power conversion efficiency is also discussed.

Classification code : FO.020.