

## 고농도로 도핑된 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기의 이론적 모델링 기법에 관한 연구

신재현 · 정민완 · 이주한<sup>†</sup>

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부  
Ⓞ 130-743 서울시 동대문구 시립대길 13 (전농동 90번지)

(2010년 5월 19일 받음, 2010년 7월 30일 수정본 받음, 2010년 8월 5일 게재 확정)

본 논문에서는 고농도로 도핑된 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기의 이득 및 노이즈 특성을 정확히 예측하기 위하여 필요한 이론적 모델링 기법에 대한 연구를 수행 하였다. 고농도의 Erbium 이온이 첨가되었을 때 발생하는 Clustering 현상에 기인한 Inhomogeneous Broadening 현상, Cooperative Upconversion 현상, Pump Excited State Absorption과 Signal Excited State Absorption 현상 등 모든 현상을 고려하여 6 레벨 증폭기 System Model을 제시하고 이를 전산모사하여 실험치와 비교함으로써 제시된 모델의 유효성을 검증하였다.

## Theoretical Modeling of High Concentration Bismuth-based Erbium-doped Fiber Amplifier

Jae-Hyun Shin, Min-Wan Jung, and Ju-Han Lee<sup>†</sup>

*School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea*

(Received May 19, 2010; Revised manuscript July 30, 2010; Accepted August 5, 2010)

A complete modeling of erbium-doped Bismuth-oxide fibers with a high doping concentration is presented. A 6-level amplifier system that incorporated clustering-induced concentration quenching, cooperative upconversion, pump excited state absorption (ESA), and signal ESA, was adopted for the modeling. The accuracy of the modeling was verified by comparing the calculated gain and noise figure with experimentally obtained ones.

Keywords: Bismuth oxide, Erbium-doped fiber amplifier, Homogeneous effect, Inhomogeneous effect, Modeling

OCIS codes: (060.2410) Fibers, erbium; (060.2320) Fiber optics amplifiers and oscillators; (160.5690) Rare earth doped materials; (160.2290) Fiber materials

### I. 서 론

최근 고화질 TV, 동영상, 인터넷의 발달로 광대역 Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) 시스템의 통신 방식에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. DWDM 시스템의 필수요소 중 하나가 Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) 이다. 기존의 실리카 기반 EDFA는 C-band 대역에서 신호 이득을 가지고 있었으나 광통신의 발달로 더 넓은 신호 이득대역의 필요성이 대두되었으며 이에 따라 기존의 EDFA의 구조를 달리하여 이득대역을 Shift 시킨 L-band EDFA<sup>[1]</sup>, Fiber Raman Amplifier (FRA)<sup>[2]</sup>와 기존의 EDFA를

결합시켜 C-, L-band 대역의 신호이득을 동시에 줄 수 있는 Hybrid 증폭에 대한 연구가 활발히 진행되었다<sup>[3]</sup>. 또한 하나의 광증폭기로 C-, L-band 동시에 신호이득을 줄 수 있는 새로운 Host 물질로 이루어진 광증폭기에 대한 연구도 활발히 진행되어왔다. 더 넓은 증폭대역을 얻기 위해 높은 굴절률을 가진 Host 물질을 사용해야 한다고 보고된 바 있으며<sup>[4]</sup> 그 중 Tellurite와 Bismuth 기반의 Host 물질이 많은 관심을 끌었다. Tellurite와 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유의 경우 높은 굴절률을 가지고 있다는 것 외에 고농도 어븀이온 첨가가 가능하여 수 m의 길이로도 C-, L-band 대역에 이득을 줄 수 있다고 보고 되었다<sup>[4, 5]</sup>. 그 중 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유

<sup>†</sup>E-mail: j.h.lee@ieee.org

의 경우 Tellurite 기반 어븀첨가 광섬유와는 달리 현재 광통신 시스템에 사용중인 실리카 광섬유와 융착이 용이해 많은 관심을 끌었으며 이에 대한 다양한 연구가 이루어져왔다<sup>[5]</sup>. 기존의 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기에 대한 연구는 주로 실험적으로 진행되었으며 최적화 구조에 대한 연구<sup>[6]</sup>, Cooperative Upconversion 현상에 대한 연구<sup>[7]</sup>, Pump Excited State Absorption (ESA) 현상에 대한 연구<sup>[8]</sup>, Signal ESA 현상에 대한 연구<sup>[9]</sup>, Clustering 현상에 기인한 Inhomogeneous 현상에 대한 연구<sup>[10]</sup> 등이 이루어져 왔다. 최근에 본 연구그룹에서는 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유의 장단점을 이해하기 위해 정밀한 이론적 모델링이 필요함을 지적하였으며 이에 따라 Concentration Quenching 현상이 출력이득과 Noise Figure에 미치는 영향을 제한적으로나마 분석하였다<sup>[10]</sup>. 하지만 좀 더 정밀한 이론적 모델링 기법에 대한 연구가 아직도 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기의 정밀하고 정확한 수치해석적 모델링 기법을 확립하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 Inhomogeneous Broadening, Cooperative Upconversion, Pump ESA, Signal ESA 현상을 모두 고려한 6 레벨 시스템으로 모델링을 제시하고 이를 수치해석적으로 계산하였다. 모델링 기법의 정확성을 검증하기 위하여 실험적으로 얻은 출력 Spectrum과 전산모사 결과를 비교해 이의 유효성을 확인하였다.

## II. Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기 모델링

그림 1은 Level 1 (<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>)와 Level 2 (<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>), Level 3 (<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>), Level 4 (<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>), Level 5 (<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>), Level 6 (<sup>4</sup>F<sub>7/2</sub>) 인 6 레벨 System 이다. 각각의 State에 N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>, N<sub>4</sub>, N<sub>5</sub>, N<sub>6</sub>의 이온 Population이 존재한다고 가정하였다. 광섬유 내에 이온들이 고르게 분포한다는 가정하에 Homogeneous Broadening 현상과 레벨 2에서 레벨 4로 이온 천이 되는 Upconversion 현상, Pump 레벨과 그에 상응하는 레벨이 존재할 때 생기는 Pump

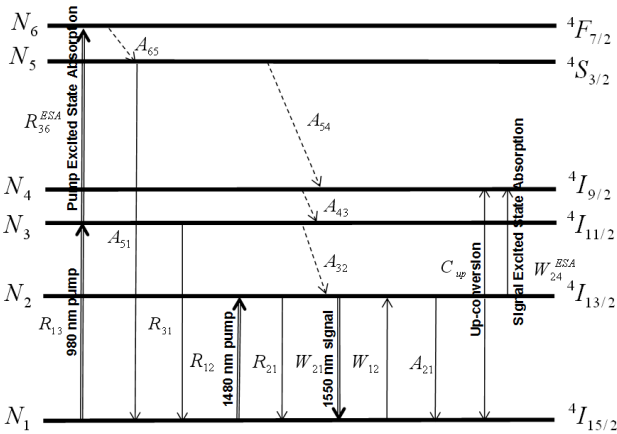


FIG. 1. Schematic diagram of energy levels and erbium transition in Bismuth oxide glass assuming 980 nm and 1480 nm pumping.

ESA 현상, L-band 대역의 증폭기를 설계할 때 고려해야 하는 Signal ESA 현상, 이온들이 고르게 분포하지 않을 때 생기는 Clustering 현상을 전부 고려하여 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기를 Full 모델링을 하였다. Clustering에 기인한 Concentration Quenching 현상을 고려하기 위하여 이온들을 Singled Ion과 Clustered Ion으로 구별하였으며 Clustered Ion의 경우 쌍 (Paired Ion) 으로부터 존재한다고 가정하였다. Single Ion으로 존재하는 Singled Ion Equation과 이온들이 군집해서 존재하는 Paired Ion Equation 나눠 Rate Equation을 전개 하였다. 특히 주목할 것은 기존의 참고 논문에서 Quenching Effect가 들어간 6 레벨 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기의 Rate Equation이 나와 있지 않기에 참고문헌 [11] ~ [14]에 나온 Rate Equation들을 응용하여 본 연구에 적합한 Rate Equation을 다음과 같이 유도하였다는 사실이다.

### Singled Ion Rate Equation

$$\frac{dN_1^S}{dt} = -(R_{13} + R_{12} + W_{12})N_1^S + (A_{21} + W_{21} + R_{21} + C_{up}N_2^S)N_2^S + R_{31}N_3^S + A_{51}N_5^S \quad (1)$$

$$\frac{dN_2^S}{dt} = (R_{12} + W_{12})N_1^S - (A_{21} + W_{21} + R_{21} + 2C_{up}N_2^S + W_{24}^{ESA})N_2^S + A_{32}N_3^S \quad (2)$$

$$\frac{dN_3^S}{dt} = R_{13}N_1^S - (A_{32} + R_{31} + R_{36}^{ESA})N_3^S + A_{43}N_4^S \quad (3)$$

$$\frac{dN_4^S}{dt} = (C_{up}N_2^S + W_{24}^{ESA})N_2^S - A_{43}N_4^S + A_{54}N_5^S \quad (4)$$

$$\frac{dN_5^S}{dt} = -(A_{51} + A_{54})N_5^S + A_{65}N_6^S \quad (5)$$

$$\frac{dN_6^S}{dt} = R_{36}^{ESA}N_3^S - A_{65}N_6^S \quad (6)$$

$$N_1^S + N_2^S + N_3^S + N_4^S + N_5^S + N_6^S = (1 - mk)N_i \quad (7)$$

여기서 N<sub>1</sub><sup>S</sup>, N<sub>2</sub><sup>S</sup>, N<sub>3</sub><sup>S</sup>, N<sub>4</sub><sup>S</sup>, N<sub>5</sub><sup>S</sup>, N<sub>6</sub><sup>S</sup>는 각각 <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>, <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>7/2</sub> 레벨에 존재하는 Singled Ion 들의 Population을 나타낸다. m은 이온들이 쌍으로 존재한다고 가정할 경우 2가 되며, k는 Pair로 존재하는 이온들의 비율이다. 본 모델링을 위하여 k 값은 아주 중요한 요소이다. 현재 저자들의 실험실에서는 k 값을 실험적으로 구할 수 있는 실험 시설이 존재하지 않고 광섬유 제조사로부터 k 값에 대한 정확한 데이터를 얻지 못한 연유로 참고 논문 [14]에 나온 방법을 응용하여 수치해석적으로 k 값을 추정하였다. A<sub>21</sub>, A<sub>51</sub>는 각각 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>, <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 레벨에서 <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 레벨로 천이되는 Spontaneous Emission 계수, A<sub>32</sub>, A<sub>43</sub>, A<sub>54</sub>, A<sub>65</sub>은 Non-radiative decay 계수, C<sub>up</sub>는 Upconversion 계수를 나타낸다. R<sub>13</sub>과 R<sub>31</sub>은 980 nm Pump의 Absorption과 Emission 계수, R<sub>12</sub>과 R<sub>21</sub>은 1480 nm Pump의

Absorption과 Emission 계수,  $W_{12}$ ,  $W_{21}$ 는 Signal의 Absorption과 Emission 계수를 나타낸다. 또한  $R_{36}^{ESA}$ ,  $W_{24}^{ESA}$ 는 Pump와 Signal의 Excited State Absorption을 나타낸다. 이러한 계수들은 다음과 같은 관계식으로 표시된다<sup>[15]</sup>.

$$R_{12} = \left( \frac{P_p^+ + P_p^-}{h\nu_p \pi r_m^2} \right) \Gamma_p \sigma_{pa2} \quad (8)$$

$$R_{13} = \left( \frac{P_p^+ + P_p^-}{h\nu_p \pi r_m^2} \right) \Gamma_p \sigma_{pa} \quad (9)$$

$$R_{21} = \left( \frac{P_s^+ + P_s^-}{h\nu_s \pi r_m^2} \right) \Gamma_s \sigma_{pe2} \quad (10)$$

$$R_{31} = \left( \frac{P_p^+ + P_p^-}{h\nu_p \pi r_m^2} \right) \Gamma_p \sigma_{pe} \quad (11)$$

$$W_{12} = \left( \frac{P_s^+ + P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-}{h\nu_s \pi r_m^2} \right) \Gamma_s \sigma_{sa} \quad (12)$$

$$W_{21} = \left( \frac{P_s^+ + P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-}{h\nu_s \pi r_m^2} \right) \Gamma_s \sigma_{se} \quad (13)$$

$$R_{36}^{ESA} = \left( \frac{P_p^+ + P_p^-}{h\nu_p \pi r_m^2} \right) \Gamma_p \sigma_{pump}^{ESA} \quad (14)$$

$$W_{24}^{ESA} = \left( \frac{P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-}{h\nu_s \pi r_m^2} \right) \Gamma_s \sigma_{signal}^{ESA} \quad (15)$$

여기서  $\Gamma_p$ ,  $\Gamma_s$ 는 각각 Pump, Signal 대 코어 증첩 Factor를 나타내며  $P_p$ ,  $P_s$ ,  $P_{ASE}$ 는 각각 Pump와 Signal, ASE의 Power를 나타낸다. 위 첨자 (+)는 순방향을 (-)는 역방향을 나타낸다.  $h$ 는 플랑크 상수,  $\nu_p$ 와  $\nu_s$ 는 각각 Pump와 신호의 주파수,  $r_m$ 은 Mode Field Radius를 나타낸다.  $\sigma_{pa}$ 와  $\sigma_{pe}$ 는 980 nm Pump의 Absorption과 Emission Cross-section,  $\sigma_{pa2}$ 와  $\sigma_{pe2}$ 는 1480 nm Pump의 Absorption과 Emission Cross-section,  $\sigma_{sa}$ 와  $\sigma_{se}$ 는 Signal의 Absorption과 Emission Cross-section을 나타낸다. Signal Absorption과 Emission Cross-section은 Ref.<sup>[16, 17]</sup>으로부터 얻은 수치를 사용하였다. Ref.<sup>[8]</sup>에 나온 대로 Pump ESA Cross-section은  $\sigma_{pump}^{ESA} \approx 2 \times \sigma_{pe}$ 과 같이 표현하였으며, Signal ESA Cross-section  $\sigma_{signal}^{ESA}$ 의 경우 측정하여 그림 3과 같은 값을 얻었다. Signal ESA Cross-section 측정에 관한 자세한 내용은 Ref.<sup>[9]</sup>에 자세히 나와있다.

#### Paired Ion Rate Equation

$$\frac{dN_1^p}{dt} = -(R_{13} + R_{12} + W_{12})N_1^p + (A_{21} + W_{21} + W_{12} + R_{13} + R_{21} + R_{12})N_2^p + R_{31}N_3^p + A_{31}N_5^p \quad (16)$$

$$\frac{dN_2^p}{dt} = (R_{12} + W_{12})N_1^p - (A_{21} + W_{21} + W_{12} + R_{21} + R_{12} + R_{13} + W_{24}^{ESA})N_2^p + A_{32}N_5^p \quad (17)$$

$$\frac{dN_3^p}{dt} = R_{13}N_1^p - (A_{32} + R_{31} + R_{36}^{ESA})N_3^p + A_{43}N_4^p \quad (18)$$

$$\frac{dN_4^p}{dt} = R_{13}N_1^p - (A_{32} + R_{31} + R_{36}^{ESA})N_3^p + A_{43}N_4^p \quad (19)$$

$$\frac{dN_5^p}{dt} = -(A_{51} + A_{54})N_5^p + A_{65}N_6^p \quad (20)$$

$$\frac{dN_6^p}{dt} = R_{36}^{ESA}N_3^p - A_{65}N_6^p \quad (21)$$

$$N_1^p + N_2^p + N_3^p + N_4^p + N_5^p + N_6^p = mkN_i \quad (22)$$

$N_1^p$ ,  $N_2^p$ ,  $N_3^p$ ,  $N_4^p$ ,  $N_5^p$ ,  $N_6^p$ 는 각각  $^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{13/2}$ ,  $^4I_{11/2}$ ,  $^4I_{9/2}$ ,  $^4S_{3/2}$ ,  $^4F_{7/2}$  레벨에 존재하는 Paired Ion 들의 Population을 나타낸다.  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $N_4$ ,  $N_5$ ,  $N_6$ 는  $^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{13/2}$ ,  $^4I_{11/2}$ ,  $^4I_{9/2}$ ,  $^4S_{3/2}$ ,  $^4F_{7/2}$  레벨에 존재하는 전체 Population으로 다음과 같이 나타낸다.

$$N_1^s + N_1^p = N_1 \quad (23)$$

$$N_2^s + N_2^p = N_2 \quad (24)$$

$$N_3^s + N_3^p = N_3 \quad (25)$$

$$N_4^s + N_4^p = N_4 \quad (26)$$

$$N_5^s + N_5^p = N_5 \quad (27)$$

$$N_6^s + N_6^p = N_6 \quad (28)$$

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 = N_i \quad (29)$$

Rate Equation은 그림 1과 같이 분석할 수 있고, Rate Equation으로  $^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{13/2}$ ,  $^4I_{11/2}$ ,  $^4I_{9/2}$ ,  $^4S_{3/2}$ ,  $^4F_{7/2}$  레벨에 존재하는 이온들의 Population을 구할 수 있다. 각 레벨에 존재하는 이온들의 Population과 Propagation Equation으로 Pump, Signal, ASE Power가 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유를 진행해 나가면서 어떻게 계산되는지 수치해석을 이용해서 구할 수 있다. Propagation Equation은 다음과 같다<sup>[11]</sup>.

$$\frac{dP_p^\pm}{dz} = \mp (\sigma_{pa2}N_1 + \sigma_{pa}N_1 - \sigma_{pe2}N_2 - \sigma_{pe}N_3 + \sigma_{pump}^{ESA}N_3)P_p^\pm \mp \alpha_p P_p \quad (30)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = (\sigma_{se}N_2 - \sigma_{sa}N_1 - \sigma_{signal}^{ESA}N_2)P_s - \alpha_s P_s \quad (31)$$

$$\frac{dP_{ASE}^\pm}{dz} = \pm (\sigma_{se}N_2 - \sigma_{sa}N_1 - \sigma_{signal}^{ESA}N_2)P_{ASE}^\pm \pm 2\sigma_{se}N_2 h\nu_s \Delta\nu \mp \alpha_s P_{ASE}^\pm \quad (32)$$

여기서  $\Delta\nu$ 는 신호 주파수  $\nu_s$ 에 존재하는 ASE의 밴드폭을 나타내며  $a_s, a_p$ 는 각각 Signal과 Pump propagation loss를 나타낸다. 1480 nm Pump를 사용하여  ${}^4I_{15/2}$ 에 존재하는 이온들이  ${}^4I_{13/2}$  레벨로 여기될 경우 증폭기는  $\sigma_{pe} = 0, \sigma_{pa} = 0$  이 되며, 이와 달리 980 nm Pump를 사용하여  ${}^4I_{15/2}$ 에 존재하는 이온들이  ${}^4I_{9/2}$  레벨로 여기될 경우 증폭기는  $\sigma_{pe2} = 0, \sigma_{pa2} = 0$  이 된다.

Propagation Equation을 수치해석 할 때 사용되는 초기 경계조건은 다음과 같다.

초기 경계조건

$$P_{p+}(z=0) = P_{p+}, \quad P_{p-}(z=L) = P_{p-} \quad (33)$$

$$P_s(z=0, \nu_s) = P_s(\nu_s) \quad (34)$$

$$P_{ASE+}(z=0, \nu) = P_{ASE-}(z=L, \nu) = 0 \quad (35)$$

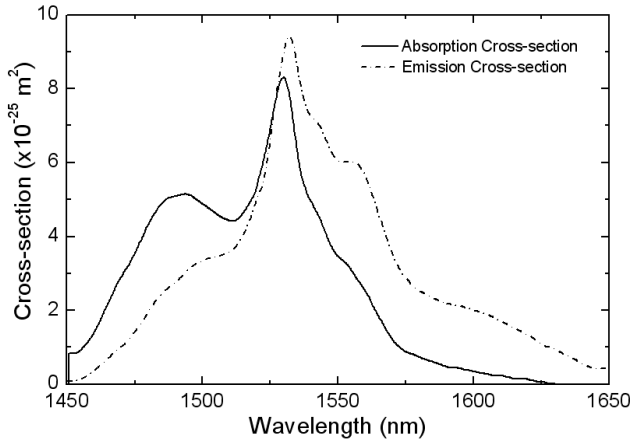


FIG. 2. Absorption and emission cross-section of the Bismuth EDF used in this study [16], [17].

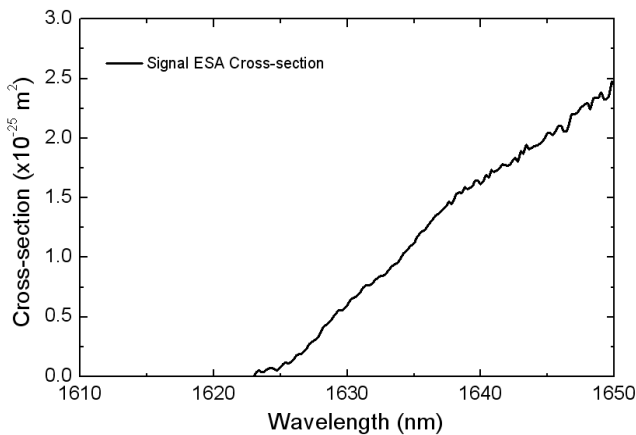


FIG. 3. Signal ESA cross-section of the Bismuth oxide-based EDF [9].

식 (1) ~ (32)의 Rate Equation과 Absorption Equation 들을 그림 2의 Absorption과 Emission Cross-section Spectrum, 그림 3의 Signal ESA Spectrum, Table 1의 파라미터를 이용하여 전산모사 하였다. 경계조건을 맞추어주기 위하여 Relaxation Method를 사용하였다<sup>[15]</sup>. 경계조건에서 순방향과 역방향은 아래첨자 (+), (-)로 각각 나타냈다. 처음으로  $z=0$ 에서  $z=L$  지점으로 진행할 때는 초기 경계조건인 Pump ( $P_{p+}(z=0) = P_{p+}$ )와 Signal ( $P_s(z=0) = P_s$ ), ASE ( $P_{ASE+}(z=0) = 0$ )와 순방향 Propagation Equation을 계산해 줌으로서 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유 각 지점에 존재하는 Pump, Signal, ASE 값을 예측 할 수 있다.  $z=L$ 에서  $z=0$  지점으로 진행 할 때의 경계 조건은 이전에 수치해석을 이용하여 구한  $z=L$  지점에서의 Pump 값과 ASE값을 이용한다. 이 과정을 통해 초기에 간과 하였던  $z=0$  지점에서의 ASE Power를 구할 수 있다. 반복과정을 통해 얻은 ASE Power의 차이가 1%로 수렴할 때까지

TABLE 1. Parameters of the Bismuth oxide-based EDF

Parameter	Symbol	Unit	Value
Spontaneous Emission Rate	$A_{21}$ <sup>a</sup>	1/s	300
	$A_{31}$ <sup>b</sup>	1/s	3,100
Nonradiative Decay Rate	$A_{32}$ <sup>a</sup>	1/s	7,500
	$A_{43}$ <sup>c</sup>	1/s	$\sim 1 \times 10^9$
	$A_{54}$ <sup>b</sup>	1/s	370,000
	$A_{65}$ <sup>d</sup>	1/s	$\sim 39237$
Upconversion Rate	$C_{up}$ <sup>e</sup>	$m^3/s$	$2.2 \times 10^{-24}$
Peak Emission Cross-section	$\sigma_{sa}$ <sup>f</sup>	$m^2$	$9.43 \times 10^{-25}$
Peak Absorption Cross-section	$\sigma_{sa}$ <sup>f</sup>	$m^2$	$8.31 \times 10^{-25}$
Pump Overlap Factor	$\Gamma_p$ <sup>a</sup>		0.5
Signal Overlap Factor	$\Gamma_s$ <sup>a</sup>		0.47
Signal Propagation Loss	$a_s$ <sup>g</sup>	dB/m	0.7
Pump Propagation Loss	$a_p$ <sup>g</sup>	dB/m	0.7
Density of Erbium Ions	$N_t$ <sup>a</sup>	$m^{-3}$	$7.9 \times 10^{25}$
Mode Field Radius	$r$ <sup>g</sup>	$\mu m$	6.2
Relative Number of Clusters	$k$ <sup>h</sup>	%	6.02
Fiber Length		m	2

<sup>a</sup> Ref. [6]의 데이터.

<sup>b</sup> Ref. [8]의 데이터.

<sup>c,d</sup> 기존에 연구되었던 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기에서는  ${}^4I_{9/2}$  레벨에서  ${}^4I_{11/2}$  레벨로 천이되는  $A_{43}$ ,  ${}^4F_{7/2}$  레벨에서  ${}^4S_{3/2}$  레벨로 천이되는  $A_{65}$  계수가 논의된바 없기에 실리카 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기 데이터 (Ref. [11]), 텔루라이트 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기 데이터 (Ref.[18])를 각각 사용하였음.

<sup>e</sup> Ref. [7]의 데이터.

<sup>f</sup> Ref. [16]과 Ref. [17]의 데이터.

<sup>g</sup> Ref. [16]의 데이터.

<sup>h</sup> 수치적으로 추정된 값. (Ref. [14])

다음의 과정을 반복하여 수치해석 한다. 반복 할 때의 ASE Power는 초기 경계 조건이 아닌 반복하는 과정을 통해 얻은 값을 사용함으로써 시뮬레이션의 정확도를 높였다.

### III. 실험적 검증

구현된 시뮬레이터의 정확성을 검증하기 위하여 그림 4와 같은 증폭기를 실험적으로 구현하였다. 실험에 사용된 어븀첨가 광섬유는 길이 2 m, 도핑농도  $7.9 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ , 코어 사이즈 5.1  $\mu\text{m}$ , 클래딩 사이즈 125.3  $\mu\text{m}$ , Numerical Aperture 0.2 인 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유를 사용하였다. Pump 는 순방향 980 nm와 역방향 1480 nm를 사용하고 Tunable Laser 를 입력신호로 사용하였다. Pump와 Signal 광원은 1480/1550, 980/1550 WDM Coupler로 결합 하였다. 그림 5는 0 dBm의 입력신호를 1560 nm ~ 1615 nm까지 15 nm씩 (순방향 Pump 200 mW와 역방향 Pump 160 mW 고정) 이동하며 입사시켰을 때의 실험치와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 그림 6은 0 dBm과 -20 dBm의 입력신호를 1560 nm의 파장으로 (순방향 Pump 200 mW와 역방향 Pump 160 mW 고정) 입사시켰을 때의 실험치와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 또한, 그림 7은 0 dBm의 입력신호를 1605 nm의 파장으로 입사시켰을 때 순방향 Pump와 역방향 Pump의 파워를 변화

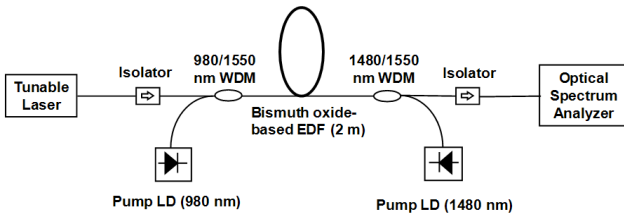


FIG. 4. Experimental setup.

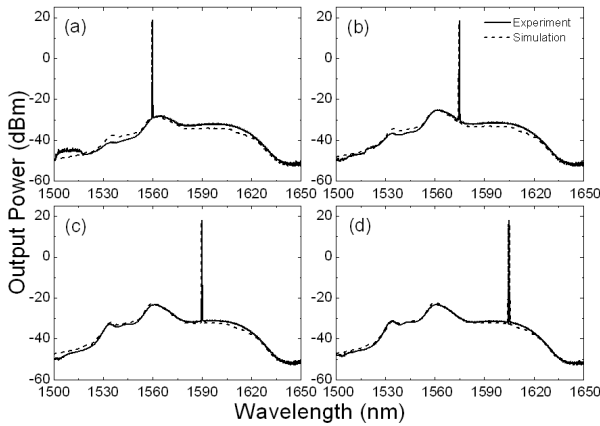


FIG. 5. Output optical spectrum comparison for four different input signal wavelengths under a bidirectional pumping scheme (forward pump power of 200 mW and backward pump power of 160 mW): (a) 1560 nm, (b) 1575 nm, (c) 1590 nm, and (d) 1605 nm. The input signal power was fixed at 0 dBm. Resolution bandwidth: 0.2 nm.

시켜가며 실험치와 시뮬레이션의 결과를 비교한 것이다. 이 때, 이론적인 출력 스펙트럼을 구하기 위하여 Rate Equation 과 Propagation Equation들을 수치해석적으로 계산할 때 ASE channel bandwidth를 우리가 실험을 위해 사용한 Optical Spectrum Analyzer의 Resolution Bandwidth인 0.2 nm로 하였으며, 계산은 1450 nm ~ 1650 nm 대역까지 200 nm 대역에서 1001 개의 ASE channel에 대하여 수행하였다. 6 레벨 시스템으로 Full 모델링 하였을 때 1500 ~ 1650 nm 대역에서 실험치와 시뮬레이션 결과가 정확하게 일치하는 것을 확인하였다.

그림 8과 그림 9는 0 dBm의 입력신호를 파장 1540 ~ 1635 nm에 따라 5 nm 간격으로 입사시켜 주었을 때 (순방향 Pump 200 mW와 역방향 Pump 160 mW 고정) 실험치와 시뮬레이션 결과의 Internal Gain과 Internal Noise Figure를 비교 한 것이다. 여기서, Internal Gain과 Internal Noise Figure란 그림 4에서 WDM과 Isolator의 삽입손실을 고려하지 않은 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유 내에서만의 Gain과 Noise

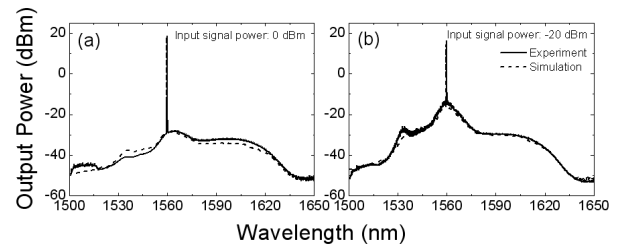


FIG. 6. Output optical spectrum comparison for two different input signal powers under a bidirectional pumping scheme (forward pump power of 200 mW and backward pump power of 160 mW): (a) 0 dBm and (b) -20 dBm. The input signal wavelength was fixed at 1560 nm. Resolution bandwidth: 0.2 nm.

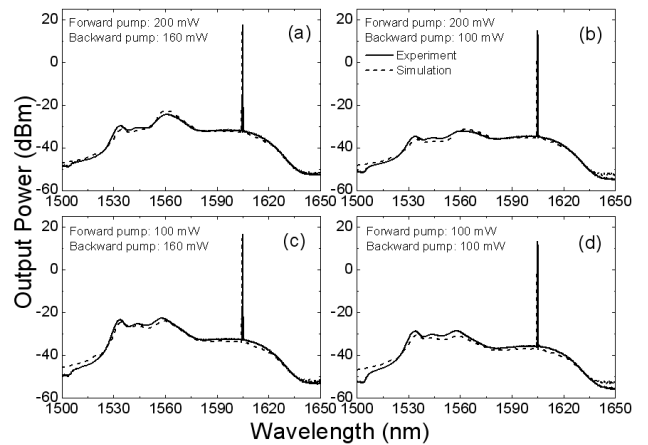
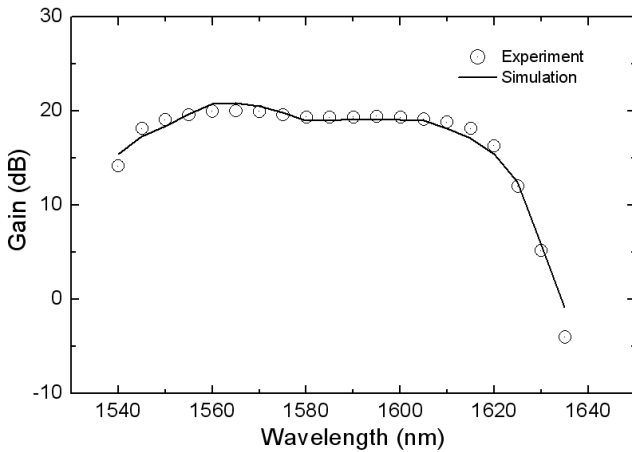
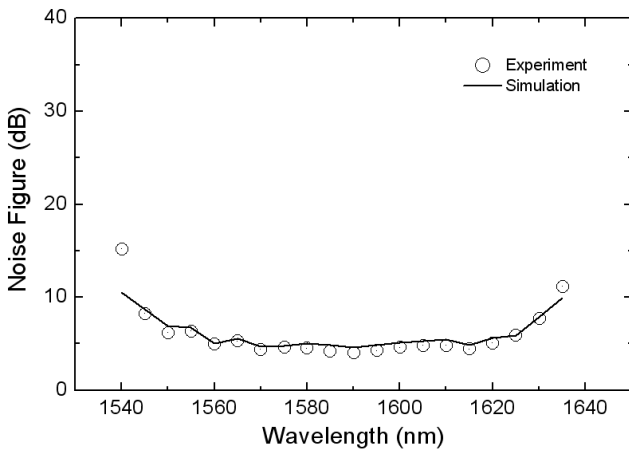


FIG. 7. Output optical spectrum comparison for four pump power combinations: (a) forward pump 200 mW and backward pump 160 mW, (b) forward pump: 200 mW and backward pump: 100 mW, (c) forward pump: 100 mW and backward pump: 160 mW, (d) forward pump: 100 mW and backward pump: 100 mW. Input signal was 0 dBm at a wavelength of 1605 nm. Resolution bandwidth: 0.2 nm.



**FIG. 8.** Signal gain comparison between experimental and numerical simulation results. An input signal of 0 dBm was scanned from 1540 to 1635 nm by a 5 nm step under a pumping condition of 200 mW forward and 160 mW backward pump powers.



**FIG. 9.** Noise figure comparison between experimental and numerical simulation. An input signal of 0 dBm was scanned from 1540 to 1635 nm by a 5 nm step under a pumping condition of 200 mW forward and 160 mW backward pump powers.

Figure를 의미한다. 6 레벨 시스템으로 Full 모델링 하였을 때 Internal Gain과 Internal Noise Figure가 거의 일치하는 것을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 고농도 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기의 광학적 성능을 정확히 예측 할 수 있는 모델링 기법을 제시하였으며 이의 유효성을 실험을 통해 확인하였다. 본 모델링 기법은 최적의 Bismuth 기반 어븀첨가 광섬유 증폭기를 설계하는데 유용하게 사용될 수 있으리라고 판단 된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2009년도 서울시립대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었음.

#### References

1. T. Sakamoto, K. Hattori, J. Kani, M. Fukutoku, M. Fukui, M. Jinno, and K. Oguchi, "Flat-gain operation of 1580 nm-band EDFA with gain variation of 0.2 dB over 1579-1592 nm," *Electron. Lett.* **34**, 1959-1961 (1998).
2. H. Masuda and S. Kawai, "Wide-band and gain-flattened hybrid fiber amplifier consisting of an EDFA and a multiwavelength pumped raman amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11**, 647-649 (1999).
3. C. L. Chang, L. Wang, and Y. J. Chiang, "A dual pumped double-pass L-band EDFA with high gain and low noise," *Opt. Comm.* **267**, 108-112 (2006).
4. A. Mori, T. Sakamoto, K. Kobayashi, K. Shikano, K. Oikawa, K. Hoshino, T. Kanamori, Y. Ohishi, and M. Shimizu, "1.58- $\mu$ m broad-band Erbium-doped Tellurite fiber amplifier," *IEEE J. Lightwave Technol.* **20**, 794-799 (2002).
5. S. Ohara, N. Sugimoto, K. Ochiai, H. Hayashi, Y. Fukasawa, T. Hirose, T. Nagashima, and M. Reyes, "Ultra-wideband amplifiers based on Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-EDFAs," *Opt. Fiber Technol.* **10**, 283-295 (2004).
6. H. Hayashi, N. Sugimoto, and S. Tanabe, "High-performance and wideband amplifier using bismuth-oxide-based EDF with cascade configurations," *Opt. Fiber Technol.* **12**, 282-287 (2006).
7. H. Hayashi, S. Ohara, N. Sugimoto, and S. Tanabe, "Effects of Lanthanum and Boron addition on suppression of cooperative upconversion in Bismuth Oxide-based Erbium-doped fibers," *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, 3452-3454 (2007).
8. H. Hayashi, S. Tanabe, and N. Sugimoto, "Quantitative analysis of optical power budget of bismuth oxide-based erbium-doped fiber," *J. Lumin.* **128**, 333-340 (2008).
9. J. H. Shin and J. H. Lee, "Investigation of signal excited state absorption in Bismuth-based Erbium-doped fiber amplifier," *J. Opt. Soc. Am. B* **27**, 1452-1457 (2010).
10. J. H. Shin and J. H. Lee, "Modeling of Bismuth-oxide based Erbium-doped fiber amplifier: considering concentration quenching effect," *Bulletin of KIEEME* **23**, 14-21 (2010).
11. C. R. Giles and E. Desurvire, "Propagation of signal and noise in concatenated Erbium-doped fiber optical amplifiers," *IEEE J. Lightwave Technol.* **9**, 147-154 (1991).
12. Y. O. Barmenkov, A. V. Kir'yanov, A. D. Guzmán-Chávez, J.-L. Cruz, and M. V. Andrés, "Excited-state absorption in erbium-doped silica fiber with simultaneous excitation at 977 and 1531 nm," *J. Appl. Phys.* **106**, 083108 (2009).
13. A. P. López-Barbero, W. A. Arellano-Espinoza, H. L. Fragnito, and H. E. Hernández-Figueroa, "Tellurite-based optical fiber amplifier analysis using the finite-element

- method,” *Microw. Opt. Technol. Lett.* **25**, 103-107 (2000).
14. C. Jiang, W. Hu, and Q. Zeng, “Numerical analysis of concentration quenching model of  $\text{Er}^{3+}$ -doped phosphate fiber amplifier,” *IEEE J. Quantum Electron.* **39**, 1266-1271 (2003).
  15. E. Desurvire, *Erbium-doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications* (Wiley, USA, 2002).
  16. Asahi Glass company technical bulletin, <http://www.agc.co.jp/english/biedf/bi5web.pdf>.
  17. S. Tanabe, N. Sugimoto, S. Ito, and T. Hanada, “Broad-band 1.5 $\mu\text{m}$  emission of  $\text{Er}^{3+}$  ions in bismuth-based oxide glasses for potential WDM amplifier,” *J. Lumin.* **87-89**, 670-672 (2000).
  18. Y. Hu, S. Jiang, G. Sorbello, T. Luo, Y. Ding, B. C. Hwang, J. H. Kim, H. J. Seo, and N. Peyghambarian, “Numerical analyses of the population dynamics and determination of the upconversion coefficients in a new high erbium-doped tellurite glass,” *J. Opt. Soc. Am. B* **18**, 1928-1934 (2001).