

フェムト秒 EDFA 光源の ASE 雑音特性と出力波形に関する数値解析 Numerical analysis on ASE noise and output pulse shape for femtosecond EDFA lasers

桜井一充(B4), 廣澤賢一(D1), 田口修平(M1), 百瀬嘉則(M1)

K. Sakurai, K. Hirose, S. Taguchi and Y. Momose

Abstract

We numerically analyzed the relationship between ASE noise and output pulse shape amplified by an erbium doped fiber amplifier (EDFA) at various conditions. Operation conditions to achieve lower ASE noise with small pulse shape distortion by fiber nonlinearity are investigated to apply EDFA sources for quantum communications.

1 はじめに

光ファイバを用いた光増幅には、ファイバ中の希土類イオンなどのエネルギー準位を利用する方法と、誘導ラマン散乱、誘導ブリルアン散乱などの三次の非線形光学効果を利用する方法がある。希土類イオンを添加した光ファイバによる増幅では添加物により増幅可能な波長領域が決まり、利得帯域幅や利得係数などはガラスの組成によって変化する。このような希土類ドープファイバーが光増幅器およびレーザとして適しているのは、低い入力で励起反応を高くでき、相互作用長が長いこと、単位長さ当たりの利得が小さくても十分な結合利得が得られ、VAD, MCVD 法などの優れたファイバ製造技術のおかげで低損失な導波路であること、などがあげられる。その中でもエルビウム(Er)を添加した石英系ファイバは Er^{3+} イオンの誘導放出波長に $1.53 \sim 1.55 \mu\text{m}$ の遷移線があり、この波長帯がちょうど光通信の最低損失波長帯にあるため同分野で注目されており、この増幅器は一般に EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) とよばれている。

我々は、小型で安定性が高いこのフェムト秒 EDFA 光源を使って、量子情報処理のコア技術であるもつれあい状態生成に必要な真空スクイズド光(Squeezed Vacuum: SV)発生を目指して研究してきた[1]。しかし、EDFA で発生する ASE (Amplified Spontaneous Emission) によるビート雑音や SPM (Self Phase Modulation), ラマン散乱といった非線形効果による量

子状態の変化といったものを受け、量子ノイズの増大した準コヒーレント状態になっており[2], 良質な SV が得られていない。

そこで本研究では EDFA の ASE 雑音特性と非線形効果を考慮に入れた波形伝搬をそれぞれ文献[3][4]を参考にして数値モデルを作成し、ASE の雑音指数(NF)が小さく、非線形効果によりスペクトルが広がらない条件を探した。

2 数値解析手法

EDFA の ASE 雑音特性を数値解析するにあたり以下の伝搬方程式を解いた。

$$\begin{aligned} \frac{dP_s}{dz} &= \rho \Gamma_s \sigma_s^a [(1+\alpha)N_2 - 1] P_s \\ \frac{dP_p}{dz} &= \rho \Gamma_p \sigma_p^a [(1+\beta)N_2 - 1] P_p \\ \frac{dP_{f,b}}{dz} &= u_{f,b} 2h\nu_s \Delta\nu_{\text{eff}} \Gamma_s \sigma_s^e \rho N_2 + u_{f,b} \Gamma_s \sigma_s^a \rho [(1+\alpha)N_2 - 1] P_{f,b} \end{aligned} \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{\left[\frac{\Gamma_p \sigma_p^a}{v_p} P_p + \frac{\Gamma_s \sigma_s^a}{v_s} (P_s + P_f + P_b) \right]}{\left\{ \frac{hA}{\tau} + \left[\frac{\Gamma_p \sigma_p^a (1+\beta)}{v_p} P_p + \frac{\Gamma_s \sigma_s^a (1+\alpha)}{v_s} P_s (P_s + P_f + P_b) \right] \right\}} \quad (2)$$

ここで P_p, P_s はポンプ光とシグナル光のパワー, P_f, P_b はそれぞれ前方伝搬と後方伝搬の ASE のパワーである。 u は単に伝搬の向きを表しており, $u_f=1, u_b=-1$ である。また、EDFA のパラメータについては文献[3]を参考にエルビウムイオン濃度 $\rho=3.6 \times 10^{+24} \text{ m}^{-3}$, ポンプ光誘導放出係数 $\sigma_p^e=1.11 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, ポンプ光吸収係数 $\sigma_p^a=5.71 \times 10^{-24} \text{ m}^2$, シグナル光誘導放出係数 $\sigma_s^e=5.64 \times 10^{-24} \text{ m}^2$, シグナル光吸収係数 $\sigma_s^a=2.86 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, 有効コア断面積 $A=8.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, シグナル・ポンプの閉じ込め係数 $\Gamma_p=\Gamma_s=0.5$ とした。また、 $\alpha=\sigma_s^e/\sigma_s^a, \beta=\sigma_p^e/\sigma_p^a$,

N_2 は規格化した上準位にあるイオン数である。ポンプ光波長は $\lambda_p=1.48 \mu\text{m}$ とし、自然放出寿命 $\tau=10 \text{ms}$ で、 h はプランク定数である。この式を元に、増幅器の雑音特性を表す値である NF はファイバ入射時の SN 比をファイバ出射時の SN 比で割った以下の式から求めた。

$$NF(L) = \frac{1}{G} \left[\frac{P_f(L)}{h\nu_s \cdot \Delta\nu_{\text{eff}}} + 1 \right] \quad (3)$$

ここで、 G はシグナル光の増幅率、 L はファイバ長である。

また、結果の検算は、エネルギー保存則より、

$$\begin{aligned} \frac{P_p(0)}{h\nu_p} + \frac{P_s(0)}{h\nu_s} &= \frac{P_p(L)}{h\nu_p} + \frac{P_s(L)}{h\nu_s} + \frac{P_b(0)}{h\nu_s} + \frac{P_f(L)}{h\nu_s} \\ &+ \int_0^L \rho \cdot \left(\frac{A}{\tau} - 4\Delta\nu_{\text{eff}} \Gamma_s \sigma_s^e \right) \cdot N_2(z) dz \end{aligned} \quad (4)$$

から行った。

また EDFA 中のパルス伝搬を数値解析するにあたり以下の非線形シュレディンガー方程式を解いた。

$$\begin{aligned} i \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 E}{\partial \tau^3} + i \frac{\alpha}{2} E + \frac{n_2 \omega_0}{c} |E|^2 E \\ + i \frac{2n_2}{c} \frac{\partial(|E|^2 E)}{\partial \tau} - \frac{n_2 \omega_0 T_R}{c} \frac{\partial |E|^2 E}{\partial \tau} \\ = \frac{1}{4\pi} \gamma_0 \int_{-\infty}^{\infty} [f(\Omega) + ig(\Omega)] \tilde{E} \exp(-i\Omega t) d\Omega \end{aligned} \quad (5)$$

$$f(\Omega) = \frac{-\Omega T_2}{1 + \Omega^2 T_2^2}, \quad g(\Omega) = \frac{1}{1 + \Omega^2 T_2^2}$$

$$\gamma_0 = \frac{\omega_0 \mu^2 T_2}{nce_0 \hbar} W_{ss}(z)$$

ここで二次分散 $\beta_2 = -21 \text{ ps}^2/\text{km}$ 、三次分散 $\beta_3 = 0.13 \text{ ps}^3/\text{km}$ 、非線形屈折率 $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 、ラマン応答速度 $T_R = 5.9 \text{ fs}$ 、中心波長 $\lambda_0 = 1.53 \mu\text{m}$ であり、 μ_0 は真空の透磁率である。また、双極子モーメント $\mu = 5 \times 10^{-32} \text{ C} \cdot \text{m}$ 、ドープ濃度 $N_0 = 8 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ とした。さらに EDFA の線形伝搬特性を非線形伝搬特性の計算に組み込むために次式を用いた。

$$W_{ss}(z) = (2N_2 - 1)\rho \quad (6)$$

3 数値解析結果

3-1 ASE 雑音特性と非線形伝播

まず、初期条件としてファイバ長を $L=15 \text{ m}$ とした。また入力シグナル光強度は我々の実験で用いている Imra 社製の EDFA レーザと同じ $P_s(0)=1 \text{ mW}$ とした。この条件で入力ポンプ光強度を 0 から 10mW まで変化させたときの NF と Gain の結果を Fig. 1 に示した。この結果から Gain が 1 以上で、かつ NF が 20 dB 以下となる入力ポンプ光強度である 1 mW、2 mW、4 mW に関して、(5) 式の非線形シュレディンガー方程式を解き、スペクトルの変化を調べた (Fig. 2)。これを見ると入力ポンプ強度が 1 mW の時点で、すでに三(三次分散など漢数字と併用しているのでそろえる)次の非線形効果である SPM がおきている (Fig. 2(a))。これ以上入力ポンプ強度を下げると Gain が 1 以下となり EDFA の増幅の意味がないので、この条件では SV 生成に有効な条件をみつけられなかった。

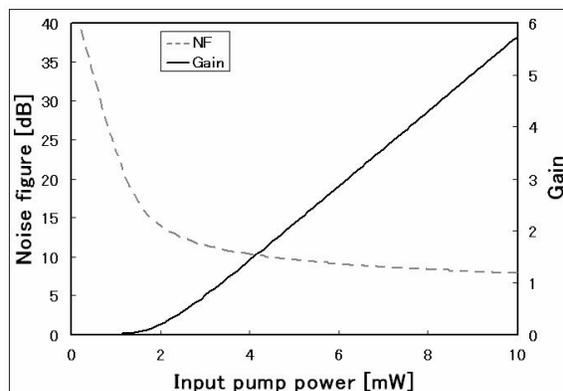


Fig.1 Dependence of the noise figure and gain on input powers into EDFA. The input signal power is 1 mW and the fiber length is 15 m.

3-2 非線形効果を低減させた場合

次にファイバ長、入力シグナル光強度は同じ 15 m、1 mW のまま非線形効果を下げするために Er のドープ濃度 $\rho = 3.6 \times 10^{+24} \text{ m}^{-3}$ から $1.0 \times 10^{+24} \text{ m}^{-3}$ に低減した場合と有効コア断面積を $A = 8.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ から $A = 8.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ に低減させた場合の ASE 雑音特性と出力スペクトラムをそれぞれ調べた。これらの結果を同じ出力強度で比較できるように、Gain=4.02 になるようなポンプパワーを入力した状態(多分ポンプパワーだと思うので)でのスペクトル波形を Fig. 3 に示した。この

結果から、ドーパント濃度、コア断面積を下げる前は NF=7.02 であったのが、ドーパント濃度を下げた場合は NF=3.22、コア断面積を下げた場合は NF=6.33 にそれぞれ減少させることに成功した。

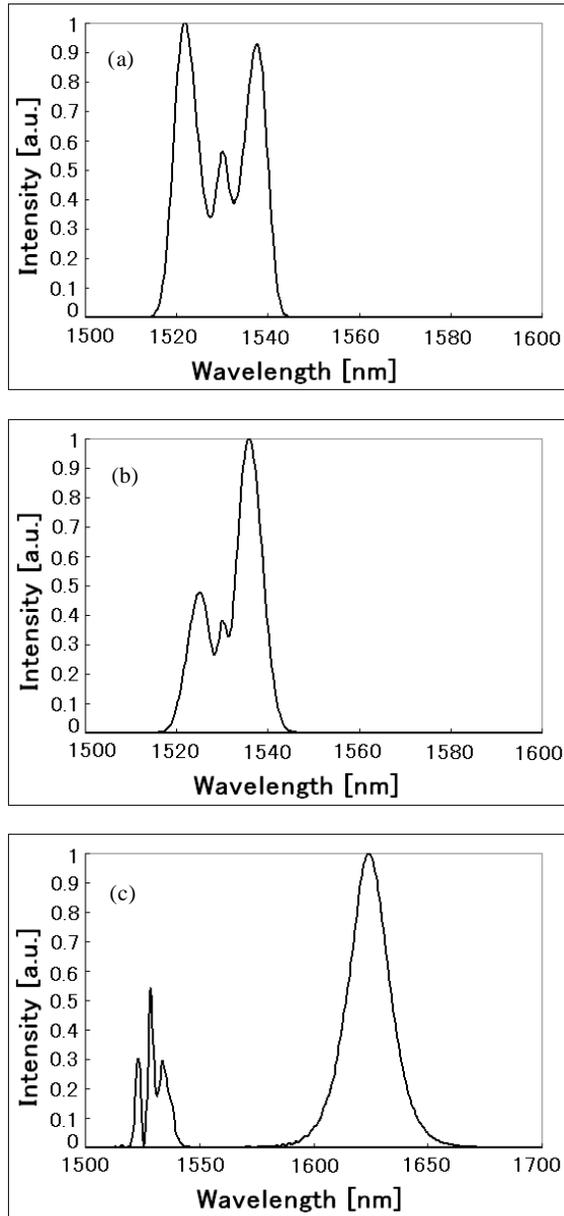


Fig. 2 Output spectra calculated from different input pump powers: (a) 1 mW, (b) 2 mW, and (c) 4 mW.

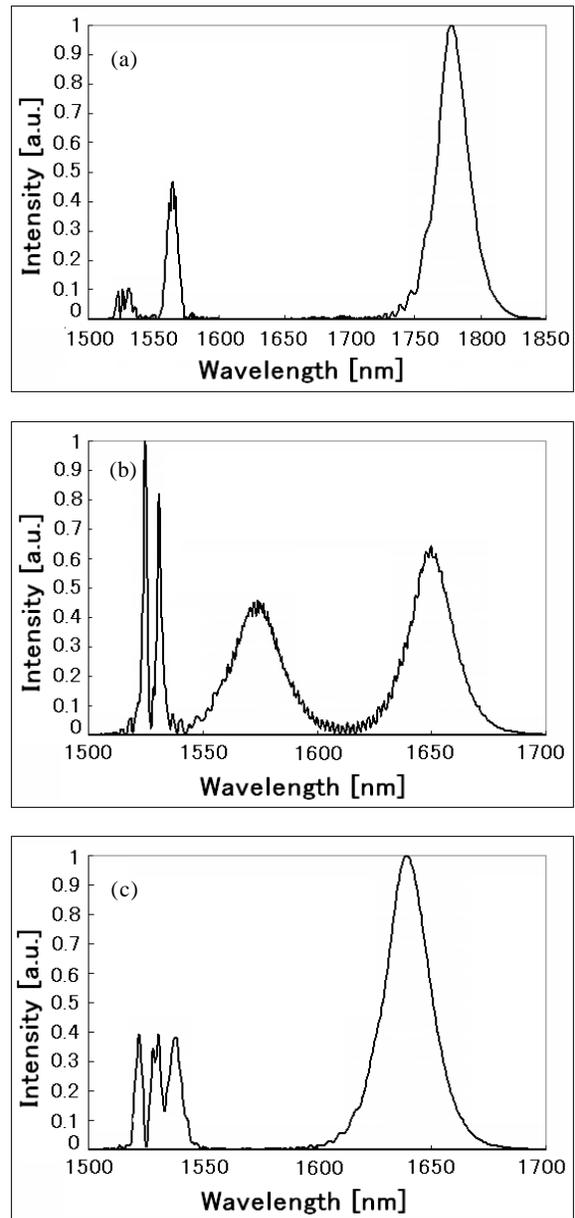


Fig. 3 :Dependence of the output spectra on erbium ion density ρ and cross-section area of the erbium-doped fiber core A . (a) $\rho=3.6 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $A=8.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, and NF=7.02 dB. (b) $\rho=1.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $A=8.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, and NF=3.22 dB. (c) $\rho=3.6 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $A=8.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, and NF=6.33 dB.

この結果からドーパント濃度および有効コア断面積を下げることにより、同じ Gain でも NF を低減させることができることがわかった。低減前と同じ利得を得

るには、入力ポンプ光強度を大きくする必要があるが、そのためEDFAが過飽和状態となりASEが少なくなりNFが下がったのだと考えられる。

4 まとめ

ファイバ長 $L=15$ m, 入力シグナル光強度 $P_s(0)=1$ mW について入力ポンプ光強度を 0 から 10 mW まで変化させたときの NF と Gain の変化を示し、この条件では SV 生成に有効な NF が小さく非線形効果によるスペクトルの広がりが少ないという二点を達成することは困難であることを示した。またドーパント濃度、有効コア断面積を低減させることにより同じ Gain を得られるときでも NF が小さくなることを示した。

References

- [1]田口修平,百瀬嘉則,廣澤賢一 : 神成研究室 Annual Report 2005-2006,pp.57-61.
- [2]百瀬嘉則,田口修平,廣澤賢一 : 神成研究室 Annual Report 2005-2006,pp.62-63.
- [3]Kent Bertilsson and Peter A. Andrekson : Journal of lightwave technology 12, 7, pp.1198-1206 (1994).
- [4]Sien Chi,Chir-Weei Chang and Senfar Wen : Optics Comm. 111, pp.132-136 (1994).