

# エルビウム添加光ファイバ増幅器の飽和特性

## Saturation characteristics of Erbium-doped optical fiber amplifiers

機械・電気システム工学専攻 A07101 赤堀 隼祐、佐藤 憲史  
Shunsuke AKAHORI and Kenji SATO

### Abstract

Optical amplifiers are indispensable for long-distance transmission system. Erbium doped fiber amplifiers (EDFA) are widely used. One of problems of EDFA is gain fluctuation due to change of the channel number in Wavelength Division Multiplexing (WDM). The gain fluctuation is caused by the saturation characteristics of EDFA. The purpose of this study is to investigate dynamic saturation characteristics of EDFA. The output waveforms for the step pulse were measured. At the start point of step pulse, the peak was observed. This is due to change from non-saturation gain to saturation gain. Transit time of the response shortens as the input power increases.

*Key Words:* EDFA, saturation characteristics, time response

### 1. 緒言

光ファイバ通信は急速に普及してきている。従来の同軸ケーブルと比較して、光ファイバは低損失、広帯域である。また、細径、軽量であり、設備面としても同軸ケーブルと比較して利点がある。材料面でも光ファイバの主材料は  $\text{SiO}_2$  であるので、資源の枯渇を心配する必要がない。最近では家庭に光ファイバを引き込む通信網方式 (FTTH : Fiber To The Home) の導入が進展している。

光ファイバ通信の構成は光源と変調器からなる送信部、伝送路、信号を増幅する中継器、光を受信し復調する受信部からなる。光ファイバ通信が開発された当初の 1980 年代では、光を電気に変換し、電氣的に増幅し、その後電気から光に変換する中継器が用いられていた。現在では、光電変換を行うことなく信号を増幅できる光ファイバ増幅器が開発されている。光ファイバ増幅器を用いることにより、より長距離の光通信が可能となる。

エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier) は、中長距離の光ファイバ通信の中継器として広く用いられている。EDFA は他の光増幅器と比較して、高利得が得られること、低励起で駆動できること、偏波依存性がないこと、他の光ファイバ部品との整合性がよく低損失結合が可能となる点が優れている。

現在、中長距離の光ファイバ通信では、波長分割多重方式 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) により大容量化

が図られている。EDFA の課題として、WDM でのチャンネル数の変動への対応や間欠的なバースト信号への対応が挙げられている。チャンネル数が変動した時、得られる利得が時間変動する。このことに EDFA の飽和特性が関係している。よって EDFA の飽和特性の評価を目的とする。本報告では EDFA の利得特性を示し、EDFA の飽和特性の測定結果と、飽和特性に関係する時間応答の測定結果を報告する。

### 2. 実験

#### 2.1 EDFA の基本構成

EDFA の基本構成を Fig.1 に示す。入力光信号と高出力半導体レーザから出射された励起光を WDM カップラで結合し、エルビウム添加ファイバ (EDF: Erbium Doped Fiber) に導入する。増幅された光には誘導放出による増幅によるものだけでなく、自然放出により放出された光も出力される。広いスペクトル幅を持つ自然放出増幅光 ASE (amplified spontaneous emission) として雑音になる。そのため、入力光信号だけが透過するような狭帯域フィルタを出力側におき、雑音を遮断する。接続点での反射によって、レーザ発振することを抑止するためアイソレータを EDF の入力側におく。EDF の長さの典型値は数 10 m であり、Er のドーピング量は 100~1000 ppm である。

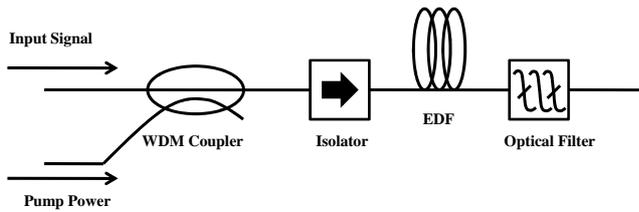


Fig.1. Schematic illustration of EDFA.

## 2.2 利得特性

Fig.2 に利得特性の実験構成を示す。入力には広いスペクトルをもつ半導体光増幅器を用いた。ポンプレーザには発振波長 980 nm のファブリペロレーザを用いた。スペクトルを測定するために光フィルタを外している。レーザには温度依存性があるため、温度を一定に保つ必要がある。レーザはファイバ付きのモジュールで、ペルチェ素子とサーミスタが付いている。サーミスタは温度を測定するセンサとして素子近傍の温度をモニタする。ペルチェ素子はペルチェ効果を利用した素子で吸熱、放熱をする。この二つの素子を用いて温度を一定に保つことができる。温度調節回路をもちいて 25°C 一定とした。まず入力である半導体アンプの光スペクトルを測定し、次に EDFA で増幅した後の信号の光スペクトルを測定した。その比をとり、EDFA の利得を評価した。

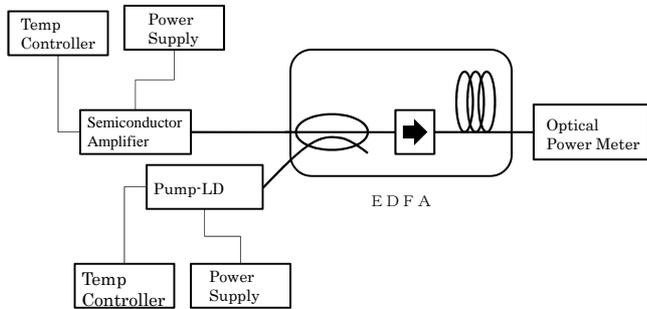


Fig.2. Experimental setup for gain characteristics measurement.

## 2.3 飽和特性

Fig.3 に飽和特性測定の実験構成を示す。入力光源には発振波長 1535 nm で単一モード発振している分布帰還型 (DFB: distributed feedback) 半導体レーザを用いた。ポンプレーザの出力を 45.3 mW に固定する。減衰器で入力光強度を変化させながら光パワーメータで出力光強度を測定した。また入力光強度も光パワーメータで測定した。バンドパス光フィルタの帯域幅は 1 nm である。

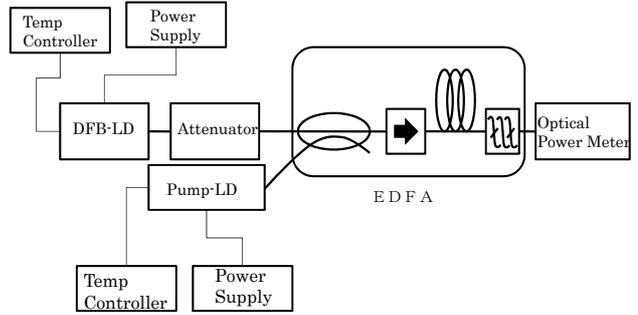


Fig.3. Experimental setup for saturation characteristics measurement.

## 2.4 時間応答

Fig.4 に時間応答測定の実験構成を示す。ファンクションジェネレータで発生させた矩形パルス信号を DFB レーザに投入して、光パルスを発生させる。DFB レーザの発振波長は 1535 nm である。ポンプレーザの出力を 45.3 mW に固定する。光パルスを EDFA により増幅した光パルスをフォトダイオードで復調し、オシロスコープで測定する。フォトダイオードに逆バイアスを加える。逆バイアスを加えることにより、フォトダイオードの感度が上昇する。入力光信号である光パルスの波高値の強度をアッテネータで変化させて測定する。パルスの周波数は 750 Hz である。

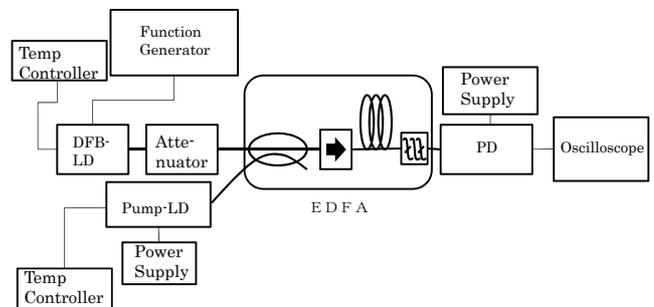


Fig.4. Experimental setup for time response measurement.

## 3. 結果および考察

### 3.1 利得特性

ポンプレーザの出力を 11.0、18.0、24.6、31.7、45.3 mW と変化させた。このときの EDFA の増幅特性を Fig.5 に示す。ポンプレーザの出力が大きくなると利得も大きくなるのがわかる。ポンプレーザの出力が 45.3 mW のとき 1530~1560 nm の間の利得は 20 dB を越えている。それ以外の範囲は急激に利得が小さくなっているのが分かる。このことから EDFA は波長依存性があり、増幅できるのは 1530~1560 nm の波長の光であることが分かる。1530 nm 付近に

ピークがある。これは  $\text{Er}^{3+}$  の誘導遷移により吸収、放出される波長が 1530 nm となるためである。増幅できる範囲が 1560 nm まで広がっているのは、Er が石英ファイバに添加されることによりエネルギー準位が広がっているためである。

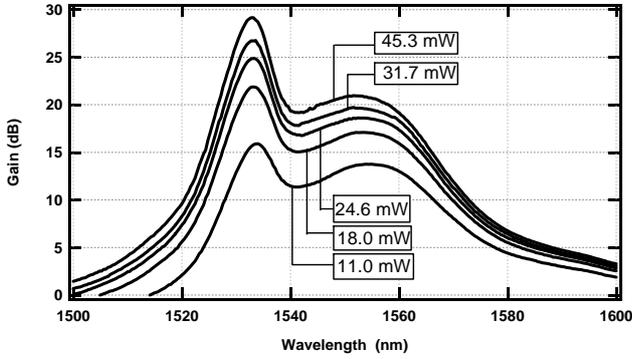


Fig.5. Gain spectra.

### 3.2 飽和特性

測定した飽和特性を fig.6 に示す。入力光強度  $P_{in}$  が大きくなるにつれ利得は小さくなる。これを利得の飽和という。B の領域は入力光強度  $P_{in}$  が変化しても利得が平坦になっている領域とする。A の領域は B の領域を基準として 3 dB 以上利得が小さくなっている領域とする。C の領域は B の領域を基準として 3 dB 以上利得が大きくなっている領域とする。

励起光によって電子を励起することにより、下位のエネルギー準位の占有密度  $N_1$  よりも上位のエネルギー準位の占有密度  $N_2$  を大きくしている。この状態を反転分布という。反転分布が形成されている状態で信号が入ると増幅が行われる。入力光強度  $P_{in}$  が大きい場合、誘導放出により励起した電子が上位の準位から下位の準位に遷移するので、 $N_2$  は  $N_1$  に近づく。占有密度の差が小さくなると利得も小さくなる。よって入力光強度  $P_{in}$  が大きくなることにより、利得の飽和が起こる。A の領域では入力光強度  $P_{in}$  が飽和強度  $P_{sat}$  よりも大きいので利得の飽和が顕著に現れる。B の領域では、利得の飽和利得が目立たない。入力光強度  $P_{in}$  が飽和強度  $P_{sat}$  よりも十分小さいためである。C の領域では、利得は入力光強度  $P_{in}$  の減少に伴い大きくなっている。C の領域では入力光強度は微小であるため、増幅された信号は光フィルタを通して、ASE 光の寄与が大きい。このため信号は ASE 光に埋もれてしまい、見かけ上利得が大きくなっている。C の領域では信号対雑音比が悪く、実際の通信では使用できない。

EDFA は進行波型の増幅器である。このため、分布定数モデルによる解析が必要である。分布定数モデルの定常状態での利得  $G_{CW}$  の入力光強度  $P_{in}$  依存性は次のようになる。

[1]

$$G_{CW} = G_0 \exp[-(G_{CW} - 1)P_{in} / P_{sat}] \quad (1)$$

$G_0$  は未飽和利得、 $P_{sat}$  は飽和強度である。(1)式を用いて回帰分析した結果を曲線で示す。C の領域を除いて、A、B の領域はほぼ一致している。

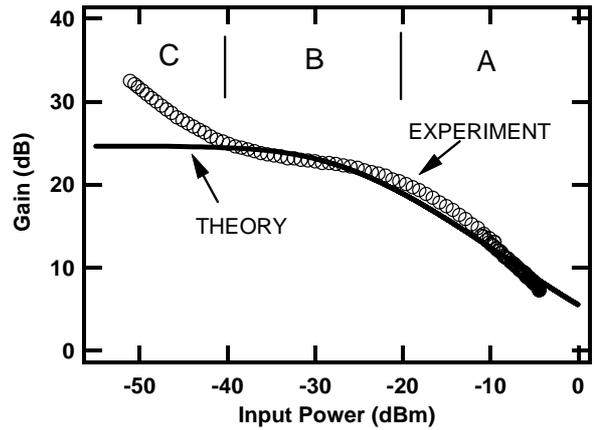


Fig.6. Saturation characteristics of EDFA.

### 3.3 時間応答

Fig.7 に入力信号波形、Fig.8 に出力信号の波形の一例をあげる。入力パルスの波高値は光強度に換算して -5.4 dBm である。時間  $t$  に関する利得  $G$  は次式で表わされる。[2]

$$G = G_{CW} + \Delta G \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2)$$

$\Delta G$  は未飽和利得  $G_0$  と定常状態の利得  $G_{CW}$  の差である。パルスの立ち上がり  $t=0$  では、利得  $G$  は  $G_{CW} + \Delta G$  となり、未飽和の利得で増幅される。その後、入力光強度に応じた飽和利得に収束していると考えられる。

Fig.7、Fig.8 から定常状態の利得を計算すると、9.0 dB となる。パルスの立ち上がりの利得を計算すると、25.1 dB となる。Fig.4 より、定常状態では入力が -5.4 dBm のとき利得は 8.8 dB であり、領域 B での利得は 24 dB である。Fig.5、Fig.6 から計算された値が Fig.5 の値とほぼ一致する。これより、パルスの立ち上がりの時、入力信号は未飽和の利得で増幅される。その後、入力光強度  $P_{in}$  飽和利得に収束することが確かめられた。

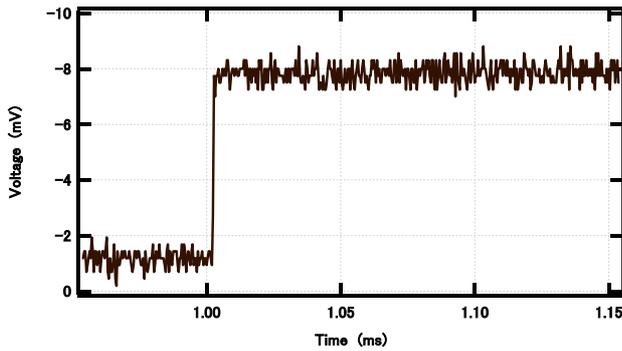


Fig. 7. Input signal.

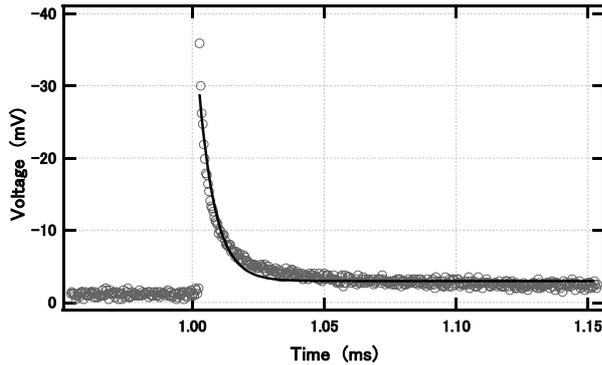


Fig. 8. Output signal ( $P_{in} = -5.4$  dBm).

矩形パルスの波高値が-34 dBm の出力信号を Fig.9 に示す。Fig.9 では立ち上がりから 1 dB 減少している。Fig.4 を見ると、入力光強度が-34 dBm のとき理論曲線では 0.7 dB 利得飽和が起きている。EDFA は進行波型の増幅器であり、EDF の長さ方向において、光強度が指数関数的に増加する。入力光強度が小さいときでも、利得飽和が無視できないことがわかる。

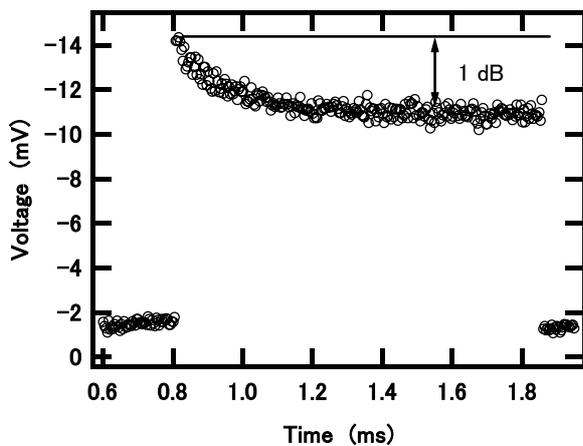


Fig. 9. Output signal ( $P_{in} = -34$  dBm).

(2)式を用いて回帰分析を行うと、Fig.8 での時定数  $\tau$  は 7.3  $\mu$ s であり、Fig.9 では 146  $\mu$ s であった。時定数  $\tau$  は次式

で表わされる。[2]

$$\tau = \frac{1}{\frac{1}{t_{sp}} + W} \quad (3)$$

$t_{sp}$  は自然放出の寿命時間、 $W$  は誘導遷移確率で入力光強度  $P_{in}$  に比例している。Fig.10 に時定数と入力光強度の関係を示す。(3)式を用いて回帰分析をした結果を曲線で示す。実験結果と、回帰分析の曲線がほぼ一致していることがわかる。このことから入力光強度が大きくなると、自然放出より高速な誘導放出の寄与が大きくなり、時定数が短くなることがわかる。

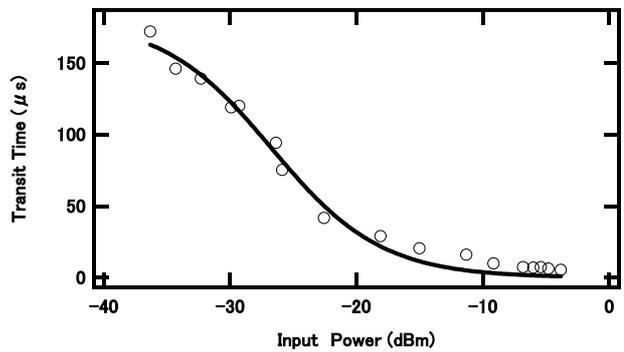


Fig.10. Transit time as a function of the input power.

#### 4. 結言

今回、EDFA の飽和特性と時間応答の測定を行った。飽和特性の測定では、利得飽和が顕著な領域、入力光強度が変化しても利得が平坦になっている領域、ASE 光の寄与が大きい領域の 3 つの領域に分けられた。時間応答では、パルスの立ち上がりで、未飽和の利得が得られ、その後、入力光強度に応じた飽和利得に収束していくことがわかった。入力光強度が小さくても、利得の飽和は無視できない。パルスの出力波形から時定数を評価した。入力光強度が大きくなると、自然放出より誘導放出の寄与が大きくなり、時定数は小さくなることがわかった。

#### 参考文献

[1] Govind P. Agrawal and N. Anders Olsson, "Self-Phase Modulation and Spectral Broadening of Optical Pulses in Semiconductor Laser Amplifiers", IEEE Journal of Quantum Electronics. Vol. 25, No. 11, 1989.

[2] 黒川 隆志：光機能デバイス，共立出版株式会社，2004