

ツリウム添加光ファイバを用いたEDFAの利得傾斜補償

光電子技術研究所 北林 和 大*1・酒井 哲 弥*2

Active Gain-Slope Compensation of EDFA Using Thulium-doped Fiber

T. Kitabayashi & T. Sakai

高密度波長多重伝送システムでは、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (Erbium-doped Fiber Amplifier, 以下EDFAと略す.) の利得平坦度が重要である。EDFAの利得は利得等化器を用いて平坦化されるが、EDFAの動作状態が変化するとEDFの利得傾斜により利得平坦度が劣化する。この利得平坦度の劣化をツリウム添加光ファイバを用いて補償した。このEDFAは信号波長帯域1,539nm ~ 1,564nm, 入力ダイナミックレンジ8dBにおいて利得平坦度0.5dB以下, 雑音指数6.0dB以下である。

Gain flatness over a wide signal wavelength range is essential for erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs) in modern long-haul high-dense wavelength division multiplexed transmission (WDM) systems. The gain flatness of EDFA with a passive gain equalizer deteriorates due to the gain-tilt of EDF when the operating condition of the EDFA changes, while the EDFAs should maintain the gain flatness even if the operating condition has changed. To solve this problem, we have developed an active slope compensation technique for EDFA using a thulium-doped optical fiber (TDF) as a saturable absorber. The actively gain-slope compensated EDFA with the TDF slope compensator keeps the gain profile constant for the wide dynamic range more than 8 dB with the low noise figure less than 6.0 dB in the wavelength range of 1,539 - 1,564 nm.

1. ま え が き

近年、インターネットの普及などによる急激な通信需要の増大に対応すべく、高密度波長多重 (Dense Wavelength Division Multiplexing, 以下DWDMと略す.) 伝送技術を導入した光通信システムが構築されている。このような光通信システムに欠かすことのできないエルビウム添加光ファイバ増幅器 (Erbium-doped Fiber Amplifier, 以下EDFAと略す.) には、広い利得波長帯域・高出力・利得波長帯域内における利得平坦性が要求される。特に広帯域・長距離通信では、WDM伝送後の各WDM信号波長ピークパワーのばらつきや、信号対雑音比の劣化を軽減するために、利得平坦化技術は非常に重要である。このような理由から、各EDFAにおいては利得等化器 (Gain Equalizer, 以下GEQと略す.) を使用して利得等化がなされている。利得等化には長周期ファイバグレーティング¹⁾、ディスクリットタイプフィルタ²⁾や平面光回路³⁾などが用いられるが、このような利得等化器はEDFAのある特定の動作状態の利得を平坦化するように設計される。しかし、実際の伝送路では、伝送光ファイバの損失やEDFの温度が変化するとEDFAの利得が変化してしまうため、利得波長特性に傾斜が生じ、利得平

坦度が劣化してしまう。このような課題を解決するため、いくつかの利得傾斜補償技術が報告されている。たとえば、2段構成EDFAの段間に可変減衰器⁴⁾あるいは可変利得等化器⁵⁾を用いた利得傾斜補償方法が報告されている。また、フッ化物系EDFの励起準位吸収を利用する方法⁶⁾やラマン増幅を利用した方法⁷⁾も報告されている。

今回、われわれはこれまでとは異なる新しい利得傾斜補償技術として、ツリウム添加光ファイバ (Thulium-doped Fiber, 以下TDFと略す.) を用いた利得傾斜補償器を開発し、EDFAと組み合わせて使用することで動的利得傾斜補償を実現した。

2. TDFの吸収波長特性の非線形性

ホストガラスがフッ化物系のTDFは、一般的に1,450nm帯および1,800nm帯に増幅帯域を持つ増幅媒体として知られているが、ここではシリカ系のTDFを吸収媒体として使用する。図1にシリカ系のTDFの吸収スペクトルを示す。このTDFのツリウム添加濃度は1,000ppm、ファイバ長は5mである。図1からわかるように1,700nm帯にブロードな吸収帯があり、その吸収のすそはC-band (1,530nm ~ 1,565nm) までのびている。また、EDFにおける励起波長での吸収損失は、エルビウムイオンが励起準位に遷移するに従って減少することが知られているが、TDFにおいてもEDFと同様に吸収損失の非線形性がある。この非線

*1 光通信研究部

*2 光通信研究部グループ長

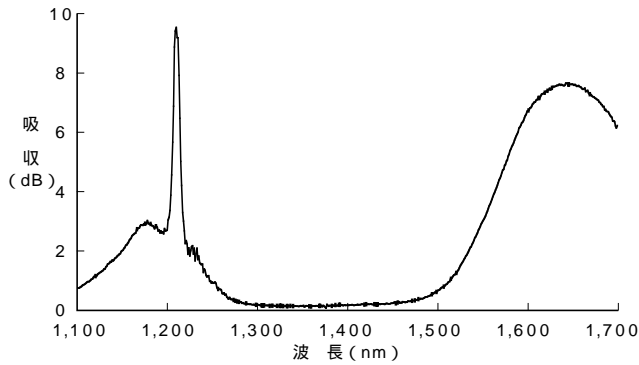


図1 ツリウム添加光ファイバの吸収スペクトル
Absorption spectrum of the silica-based Tm-doped optical fiber

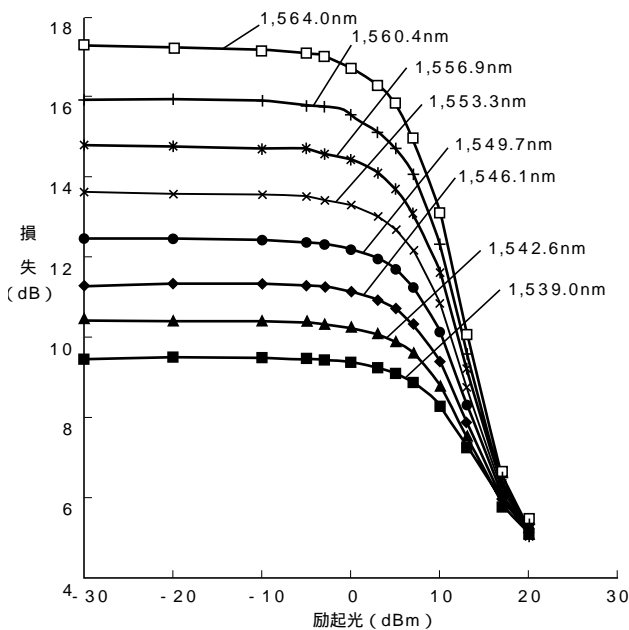


図2 ツリウム添加光ファイバの吸収飽和特性
Saturation characteristics of adsorption loss of the Tm-doped optical fiber

形性をうまく利用することで利得傾斜の補償を行うことができる。

図2にC-bandにおけるTDFの吸収飽和の様子を示す。入力信号は1,539nm～1,564nmの均等8波入力である。励起光の波長は1,610nmとし、励起光パワーを0mW～100mWまで変化させた。励起光パワーが弱い領域における吸収損失は一定であるが、励起光パワーが強くなり吸収飽和が生じはじめると、吸収損失は次第に小さくなっていく。このとき、吸収損失の変化量は波長によって異なるため、損失波長特性の傾きが変化する。このように、C-bandはEDFが利得飽和時に利得傾斜を生じると同時にTDFが吸収飽和時に損失傾斜を生じる波長帯域となっている。

図3にC-bandにおけるEDFの利得傾斜およびTDFの損失傾斜を示す。利得（損失）傾斜は、入力信号パワーあるいは励起光パワーが変化したときの1,565nmにおける利

得（損失）変化量に対する、ある波長での利得（損失）変化量の比（dB/dB）として定義する。1,530nm～1,570nmにおけるTDFの損失傾斜は、波長に対してほぼ比例しており、その傾きは0.028nm⁻¹である。一方、EDFの利得傾斜も1,538nm～1,570nmでは波長に対してほぼ比例しており、その傾きは-0.026nm⁻¹である。したがって、TDFの損失傾斜とEDFの利得傾斜がともに線形な領域では、EDFAとTDFを直列に接続し、TDFの損失波長特性の傾きを制御することでEDFの利得変化時に生じる利得の傾きを補償することができる。

3. 利得傾斜補償器の光回路構成

図4に利得傾斜補償器（Gain-Slope Compensator, 以下GSCと略す。）を付加したEDFAの構成図を示す。EDFAは2段構成とし、その段間にGSCを挿入した。EDFA₁およびEDFA₂は通常のEDFAであり、EDFA₁には、ある一定温度および一定入力信号条件において、増幅器全体（EDFA₁+GSC+EDFA₂）の利得を平坦化するためのGEQが設けられている。GSCはTDF、励起光源、WDMカップラで構成されており、TDFは吸収スペクトル測定に用いたTDFと同じものを使用した。励起光の波長は、TDFのもつ1,700nm帯の吸収帯で信号帯域外であればどの波長でもよい。ただし、信号帯域より短波長側で励起を行うと、

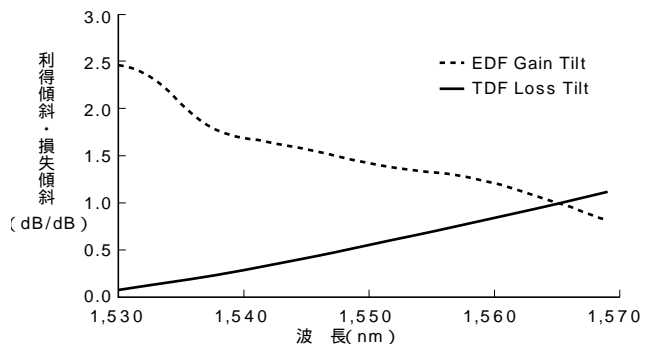


図3 EDFの利得傾斜およびTDFの損失傾斜
Gain-tilt of the EDF and loss-tilt of the TDF

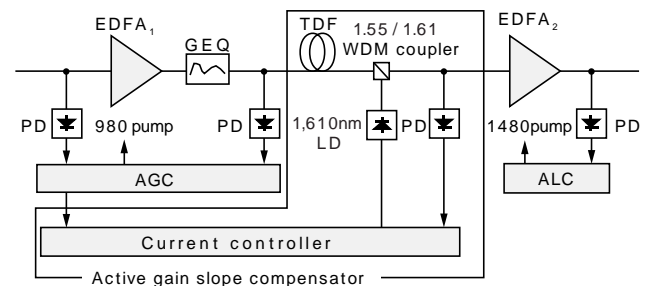


図4 利得傾斜補償器付加EDFAの光回路構成
Experimental setup for the active gain-slope compensation using TDF. The gain-slope compensator is located between two EDFAs of the two-stage amplifier.

TDFから発生する自然放光が雑音特性に影響をおよぼすので信号帯域より長波長側での励起が好ましい．ここでは励起光の波長は1,610nmとした．TDFの損失波長特性の傾きは，励起光パワーによって制御される．

4. 制御方法

GSC付加EDFAの出力信号パワーを一定に保ったまま利得傾斜補償を行うために，以下のような制御を行っている．EDFA₁は利得一定制御（automatic-gain-control，以下AGC制御と略す．）とした．これにより入力信号パワーや信号チャンネル数が変化しても雑音指数を低く保つことができる．また，EDFA₂は出力信号パワーを一定にするため出力一定制御（automatic-level-control，以下ALC制御と略す．）した．このような制御の下では，各段（EDFA₁，GSC，EDFA₂）における出力パワーは，図5に示した凡例（ ）のようにEDFA₁で増幅された後，GSCで減衰され，EDFA₂で再び増幅されて出力される．ここで，入力信号パワーが変化すると，その変化量と同じ分だけEDFA₁の出力パワーも変化する．もし，GSCによる制御を行わなければ，信号パワーは図5に示した凡例（ ）のように変化する．たとえば入力信号パワーが2dB増加したとすると，EDFA₁の出力パワーも2dB増加し，EDFA₂はALC制御されているので利得が2dB減少する．結果としてEDFの利得傾斜により増幅器全体の利得波長特性には正の傾きが生じ，利得平坦度は劣化する．2節で述べたように，1,538nm～1,570nmにおけるEDFの利得傾斜とTDFの損失傾斜は，どちらも波長に対して比例しており，その傾きは絶対値が同じで符号が逆である．EDFの利得傾斜により生じた利得波長特性の傾きを補償するためには，TDFの損失波長特性の傾きがEDFの傾きの変化を打ち消すように変化させれば良い．すなわち，TDFの損失をEDFの利得変化量と同じだけ変化させれば良い．TDFの損失波長特性は，TDFの励起光パワーによって調節できる．このような制御の下では，信号パワーは図5に示した凡例（ ）のように変化する．EDFA₂の利得減少によってEDFの利得波長特性に生じた正の傾きは，TDFの損失増加により生じる負の傾きによって打ち消される．実際にはEDFA₁がAGC制御，EDFA₂がALC制御されているので，TDFの損失変化はEDFA₂の利得変化によって自動的に補

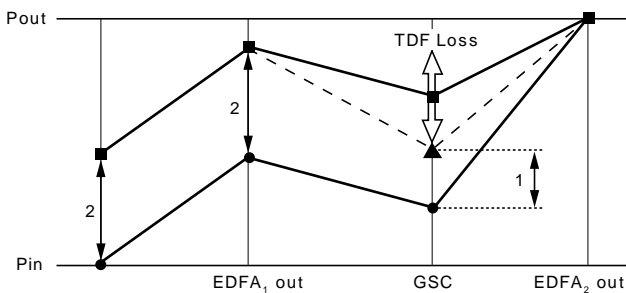


図5 利得傾斜補償器付加EDFAの各段における出力パワー Output power level diagram for the two-stage EDFA with the gain-slope compensator

償される．したがって，利得傾斜補償を行うためには，TDFの励起パワーを調整するための制御回路を付加するだけで良い．さらに，このEDFAは従来の可変減衰器を使用した利得傾斜補償方法よりも雑音指数を低く抑えることができるという利点がある．

5. 利得波長特性

図6にGSCを付加したEDFAの利得波長特性を示す．(a)は利得傾斜補償を行わなかった場合，(b)は利得傾斜補償を行った場合で，入力信号光を1,538nm～1,564nmの均等8波入力とし，入力信号パワーを変化（ダイナミックレン

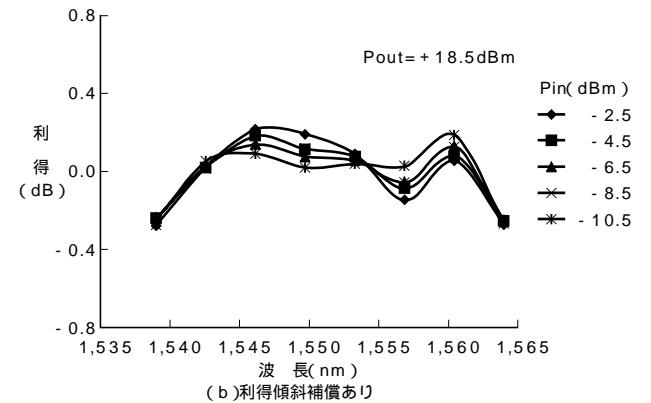
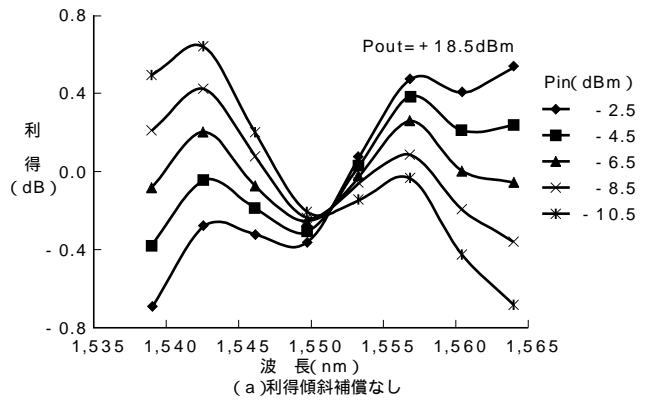


図6 EDFAの利得特性

Gain characteristics of EDFA (a) without the gain-slope compensator and (b) with the gain-slope compensator

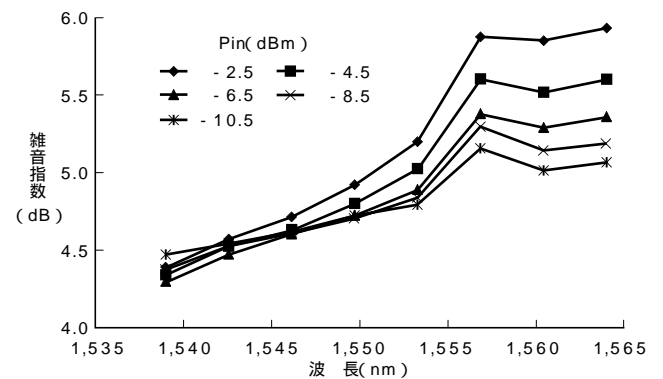


図7 利得傾斜補償器付加EDFAの雑音指数特性 Noise figure characteristics of EDFA with gain-slope compensator

ジ8dB)させたときのEDFAの利得波長特性である。また、トータル出力信号パワーは+18.5dBmとした。利得傾斜補償を行わない場合には、入力信号パワーが変化すると利得波長特性に傾きが生じ、利得平坦度が0.4dBから1.4dBまで劣化する。しかし、利得傾斜補償を行った場合、利得波長特性はほとんど変化せず、利得平坦度は0.5dB以下で一定に保たれている。利得波長特性にわずかに変化があるのは、図3に示したEDFの利得傾斜およびTDFの損失傾斜が完全に波長に比例していないためで、これらのわずかな違いにより生じるものである。この違いが原因で生じる利得平坦度の劣化は0.1dB程度である。また、TDFの損失を制御するために、1,610nmの励起光パワーを変化させているが、最大でも53mWという少ない励起光パワーで利得傾斜補償を実現している。

図7には雑音指数特性を示す。雑音指数の最悪値は5.9dBであり、入力レンジ8dBにおけるその劣化は1.0dBであった。従来の可変減衰器を用いた利得傾斜補償法と比較すると、この雑音指数の劣化は格段に少なくなっている。可変減衰器は損失波長特性を変化させずに損失の大きさだけを変化させて利得傾斜を補償する。一方、GSCは損失の大きさが変化すると同時に損失波長特性の傾きも変化する。したがって、利得傾斜を補償するときのGSCのトータル損失は、可変減衰器に比べて低く抑えることができ、雑音指数の劣化も少なくできる。一般的にEDFAの雑音指数は短波長側において悪くなるが、図7では長波長側で悪くなっている。これは、入力信号パワーが高くなるとTDFの損失を増やさなければならず、長波長域での損失が大きくなるためである(図2参照)。また、1,557nmにおける雑音指数のピークはGEQの損失ピークによるものである。

6.むすび

TDFを用いて、これまで考案されていた利得傾斜補償法とは異なる、新しい利得傾斜補償法を提案し、その有

効性を確認した。波長帯域1,538nm~1,564nm、入力ダイナミックレンジ8dBにおいて利得傾斜補償を実現し、そのときの雑音指数は6.0dB以下であった。また利得傾斜補償に必要なTDFの励起パワーは最大でも53mWであった。

参考文献

- 1) R.P. Espindola, J. W. Sulhoff, A. A. Abramov, J. B. Judkins, Y. Sun, A. K. Srivastava, C. Wolf, D. J. DiGiovanni and A. M. Vengsarkar: Temperature-insensitive long-period grating filter for gain-flattened EDFA, Proc. OAA'98, MB3, pp.19-22, 1998
- 2) R. A. Betts, S. J. Frisken and D. Wong: Split-beam Fourier filter and its application in a gain-flattened EDFA, OFC'95, Paper TuP4, pp.80-81, 1995
- 3) K. Inoue, T. Kominato and H. Toba: Tunable gain equalization using a Mach-Zehnder optical filter in a multistage fiber amplifier, IEEE Photonics Technol. Lett., Vol.3, pp.718-720, 1991
- 4) Y. Sugaya, S. Kinoshita and T. Chikama: Novel configuration for low-noise and wide-dynamic-range Er-doped fiber amplifier for WDM systems, OAA '95, Technical Digest, pp.158-161, 1995
- 5) T. Naito, T. Terahara, N. Fukushima, N. Shimojoh, T. Tanaka and T. Suyama: Active gain-slope compensation in large-capacity, long-haul WDM transmission system, OAA'99, Paper WC5, pp. 36-39, 1999
- 6) M. J. Yadlowsky: EDFA without dynamic gain-tilt using excited-state trapping, OAA'98, Technical Digest, pp. 24 - 27, 1998
- 7) M. Takeda, S. Kinoshita, Y. Sugaya and T. Tanaka: Active gain-tilt equalization by preferentially 1.43 μ m- or 1.48 μ m-pumped Raman amplification, OAA'99, OSA TOPS Vol.30, pp.101-105, 1999