

ツリウム添加光ファイバを用いた利得傾斜補償L-band エルビウム添加光ファイバ増幅器

光電子技術研究所 北林和夫*1・酒井哲弥*2

Novel Gain-slope Free Erbium-doped Fiber Amplifier for L-band Using Thulium-doped Fiber

T. Kitabayashi & T. Sakai

高密度波長多重伝送システムにおける伝送帯域の拡大には、L-band (1,565 - 1,625nm) 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.) が非常に有効である。しかし、L-band EDFAの利得平坦度は動作状態の変化や環境温度の変化によって大きく劣化する。この2つの要因のうちどちらか一方による利得平坦度劣化を補償する方法が、これまでにいくつか報告されている。われわれはそのような利得傾斜補償法と同等の性能を維持したまま、EDFAの動作状態変化と環境温度変化による利得平坦度の劣化を同時に補償できる利得傾斜補償器を開発した。

Increasing demand for large transmission capacity has been evolved the transmission systems to dense wavelength division multiplexing (DWDM) systems. To increase the capacity of the DWDM transmission systems, use of an L-band (1,565 - 1,625 nm) erbium-doped fiber amplifier (EDFA) is very effective method. The EDFAs should maintain the gain flatness even if the operating condition has changed. But the gain flatness in L-band deteriorates due to dynamic gain-tilt and temperature gain-tilt when the operating condition of the EDFA changes. To solve this problem, we propose an active gain-slope compensation technique for the L-band EDFA using a thulium-doped fiber (TDF) When the EDFA is actively compensated for the gain-slope by the TDF compensator, the EDFA keeps almost the same gain profile for the wide input power range of more than 8 dB in a wavelength band between 1,575 nm and 1,610 nm. Furthermore, the EDFA keeps a low noise figure of less than 7.5 dB.

1. ま え が き

近年の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.) 伝送システムの帯域拡大が強く要求されている。この要求を満たす新たな波長帯域の増幅手段として、L-band用 (1,565 - 1,625nm) 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.) やS-band用ツリウム添加光ファイバ増幅器などが盛んに研究されている。特にL-band EDFAはC-band EDFAで使用されている石英系のEDFをそのまま使用でき、増幅器としての様々な技術も大部分がそのまま適応できるので、帯域拡大には非常に有効な手段である。

広帯域WDM伝送システムにおいては、WDM伝送後の各WDM信号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、利得波長帯域内における利得平坦

度が非常に重要である。伝送路中の各EDFAにおいては、利得等化器を使用して利得の平坦化がなされている。この平坦化された利得は、EDFAの動作条件や環境温度が変化しても一定に保たなければならない。しかし、EDFは利得変動による利得傾斜 (Dynamic Gain Tilt, 以下DGTと略す.) と環境温度変動による利得傾斜 (Temperature Gain Tilt, 以下TGTと略す.) を有するため、動作条件が変化するとEDFAの利得波長特性に傾斜が生じ、利得平坦度は劣化してしまう。

C-band EDFAでは、TGTによる利得平坦度の劣化は少なく、DGTによって生じる利得平坦度の劣化が支配的である。DGTによる利得平坦度劣化を補償する技術は、これまでにいくつか報告されている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

一方、L-band EDFAの場合は、TGTによる利得平坦度の劣化も大きくなるため、DGTとTGTによる利得平坦度の劣化を同時に補償しなければならない。DGTあるいはTGTによる平坦度の劣化を個々に補償する技術はいくつか報告されているが、同時に補償する技術の報告はあま

*1 光通信研究部

*2 光通信研究部グループ長

りなされていない。これまでに2段構成のEDFAの段間に可変アテネータを挿入し、増幅器全体を利得一定制御⁵⁾、あるいは励起パワー一定制御⁶⁾して利得平坦度の劣化を補償する技術が報告されている。

今回、C-bandの利得傾斜補償でも使用したツリウム添加光ファイバ (Thulium-doped Fiber, 以下TDFと略す.) を用いて、DGTおよびTGTによる利得平坦度の劣化を同時に補償できる利得傾斜補償器 (Gain Slope Compensator, 以下GSCと略す.) を開発し動的利得傾斜補償を実現した。

2. 利得傾斜補償

利得傾斜補償にはシリカ系TDFを使用した。一般的にTDFはフロライド系TDFが1,450nmあるいは1,800nmにおける増幅媒体として知られている⁷⁾⁸⁾⁹⁾。一方、シリカ系TDFは多音子放出率が高く非輻射緩和過程が支配的であるため、利得効率が低く増幅には不適である。しかし、利得傾斜補償に使用する場合、TDFは増幅媒体ではなく吸収媒体として動作させるので、むしろシリカ系TDFのほうが好ましい。また、TDFは吸収損失の非線形性を有しており⁴⁾、TDFへの入射パワーが低いときの吸収損失は一定であるが、入射パワーが高くなると吸収飽和が生じ吸収損失が徐々に小さくなる。このとき、吸収損失の変化量が波長によって異なるので、TDFの吸収損失スペク

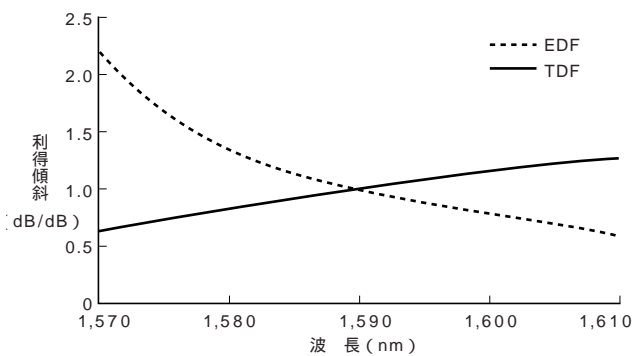


図1 EDFの利得変動による利得傾斜およびTDFの損失変動による損失傾斜
Dynamic gain-tilt of the EDF and dynamic loss-tilt of the TDF

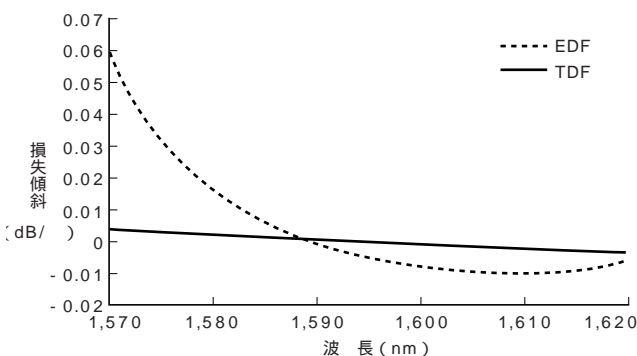


図2 温度変動によるEDFの利得傾斜およびTDFの損失傾斜
Temperature gain-tilt of the EDF and temperature loss-tilt of the TDF

トルは入射パワーによって異なった傾斜 (Dynamic Loss Tilt, 以下DLTと略す.) を持つ。また、TDFの吸収損失スペクトルは環境温度によっても変化し、環境温度によって異なった傾斜 (Temperature Loss Tilt, 以下TLTと略す.) を持っている。

図1にL-bandにおけるEDF (TDF) のDGT (DLT) を示す。ここで、DGT (DLT) は、1,590nmにおける利得 (損失) 変化量に対する任意の波長における利得 (損失) 変化量の比 (dB/dB) として定義される。例えばEDFにおいて1,590nmにおける利得が1dB変化するとき、1,570nmにおける利得が2.2dB変化したとすると、このときの1,570nmにおけるDGTは2.2となる。図1より、TDFのDLTは1,570~1,610nmにおいて波長に対してほぼ線形であることがわかる。EDFのDGTは1,580nmよりも短波長側では波長に対して線形ではないが、長波長側では線形である。したがって、EDFのDGTとTDFのDLTがどちらも波長に対して線形な波長領域である1,580nm~1,610nmにおいては、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。

一方、図2にはL-bandにおけるEDF (TDF) のTGT (TLT) を示す。TGT (TLT) は温度が1 変化したときの各波長における利得 (損失) の変化量である。図2よりEDFのTGTはL-band領域では線形ではない。しかし、TDFと組み合わせることにより、温度変化時に生じる利得波長特性の傾きをほぼ補償することができる。

3. 利得傾斜補償L-band EDFA

図3は利得傾斜補償L-band EDFAの光回路構成図である。このEDFAはEDFA₁、GSC、EDFA₂から構成されている。基本的な構成はC-bandで使用したGSCとほぼ同じ構成である⁴⁾。TDFの励起光波長はTDFが信号帯域に自然放出光を発生しないように信号帯域より長波長側で励起するのが望ましいが、今回は短波長側の1,550nmでTDFを励起した。また、TDFに吸収されずに透過してくる1,550nmの励起光がEDFAに入射すると、EDFAの利得や雑音指数に大きな影響をおよぼすので、励起光を遮断

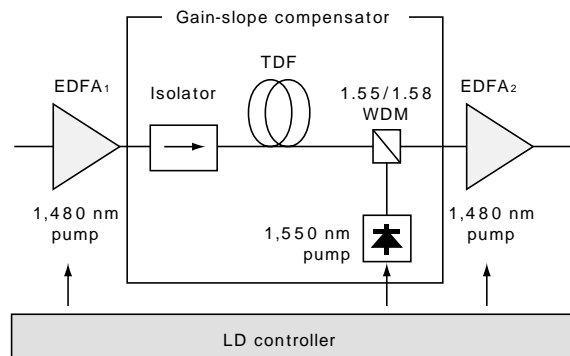


図3 利得傾斜補償器付加EDFAの光回路構成
Experimental setup for the active gain-slope compensation using TDF
The gain-slope compensator is located between two EDFAs of the two-stage amplifier .

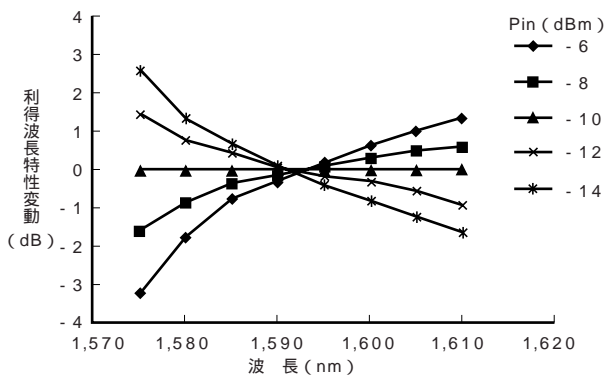
するためのアイソレータをTDFの前段に挿入している．使用したTDFはシリカ系のもので，ツリウム添加濃度1,000wt.ppm，コア径3.4 μm ，比屈折率差1.2%，長さ5mである．

信号出力パワーを保ったまま利得傾斜を補償するために，各段（EDFA₁，GSC，EDFA₂）を以下のように制御した．EDFA₁は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ように利得一定制御し，EDFA₂は出力信号パワーを一定に保つために出力一定制御した．また，GSCの損失波長特性の傾きはEDFAに生じた利得波長特性の傾きを補償するように制御した．実際にはTDFの励起パワーを変化させることで損失波長特性の傾きを調整することができる．

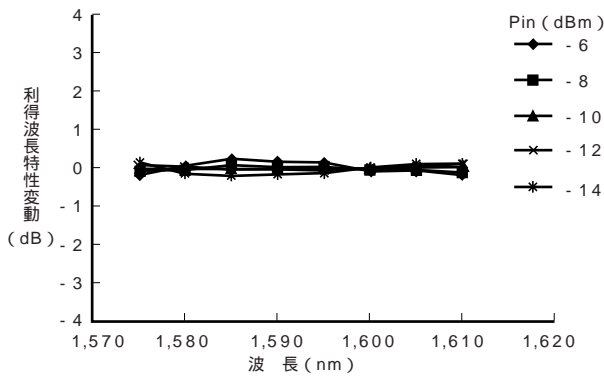
4. 増幅特性

まず，利得波長特性の測定を行った．測定は図3に示した利得傾斜補償EDFAと利得傾斜を補償しない従来のEDFAのそれぞれについて測定し比較を行った．入力信号は信号波長帯域1,575nm～1,610nmの均等8波とし，トータルパワーを-14dBm～-6dBm（ダイナミックレンジ8dB）の間で変化させ，-10dBmでの利得波長特性からの変化量を測定した．また，トータル出力信号パワーは+7dBm，測定時の温度は25℃である．

図4（a）に利得傾斜補償しない場合の利得波長特性の



(a) 利得傾斜補償なし



(b) 利得傾斜補償あり

図4 利得変動時のEDFAの利得波長特性変動

Gain characteristics of EDFA (a) without the TDF gain-slope compensator and (b) with the TDF gain-slope compensator for the input signal power of -6, -8, -10, -12 and -14 dBm

変化を示す．これより，入力信号パワーが-14dBmから-6dBmへと変化すると，利得波長特性の傾きが負から正へ変化していることがわかる．EDFA₁が利得一定制御，EDFA₂が出力一定制御されているため，入力信号パワーが変化するとEDFA₂の利得が変化する．したがって，EDFのDGTによって利得波長特性に傾きが生じ，利得平坦度が劣化する．入力信号パワーが-14dBmのときに利得平坦度が最も劣化し，劣化量は4.5dBであった．

図4（b）には利得傾斜補償した場合の利得波長特性の変化を示す．GSCによって利得傾斜補償しているので入力信号パワーが変化しても利得波長特性はほとんど変化せず，利得平坦度は0.4dB以下に保たれている．ここで，完全に利得傾斜が補償されていないのは，TDFのDLTがL-band全域にわたって波長に対して線形であるが，EDFのDGTは線形でないためである．この違いが利得傾斜補償後の利得波長特性に新たな平坦度劣化を生じさせている．また，利得傾斜補償に必要なTDFの最大励起パワーは60mWであった．

また，上記と同じ条件で従来の可変減衰器（Variable Optical Attenuator，以下VOAと略す．）を用いた方法でも利得傾斜補償を行い，雑音指数とEDFA₂の励起パワーについてGSCを用いた場合との比較を行った．図5に利得傾斜補償時における雑音指数とEDFA₂の励起パワーを示す．VOAを用いる場合はEDFA₂の励起パワーは入力信号パワーによらずほぼ一定である．一方，GSCを用いた場合は入力信号パワーが大きくなるにつれて励起パワーが減少し，入力信号パワーが-6dBmのときには，VOAを用いた場合より励起パワーを0.7dB小さくできる．雑音指数に関しては，どちらの方法でも入力信号パワーが増加すると雑音指数が劣化する．これは利得傾斜を補償するためにVOAおよびTDFの損失を大きくしなければならぬためである．VOAを用いる場合はVOAの損失が波長によらず一定なので，入力信号パワーの変化と同じ分だけ損失を変化させなければ利得平坦度を保てないが，GSCを用いる場合にはTDFの吸収損失の傾きを変化させることができるので，入力信号パワーの変化量よりTDF

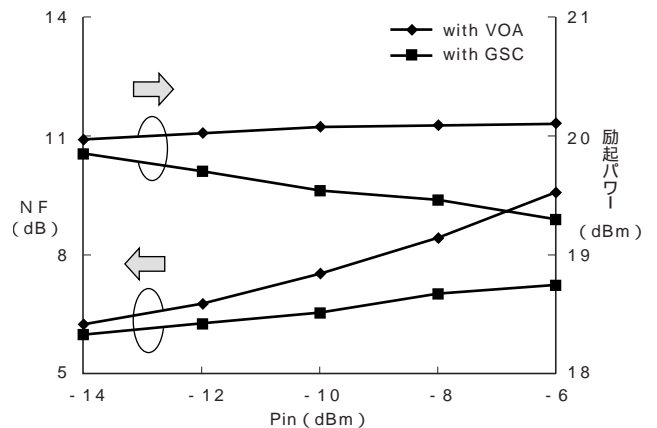


図5 利得傾斜補償時の雑音指数およびEDFA₂の励起パワー Noise figure and EDFA₂ pump power in gain-tilt compensation

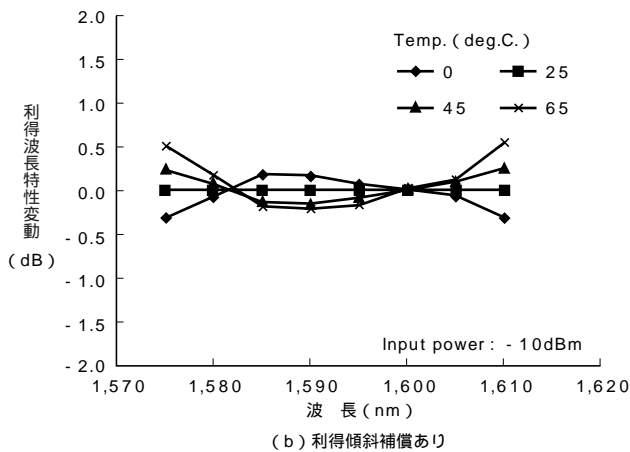
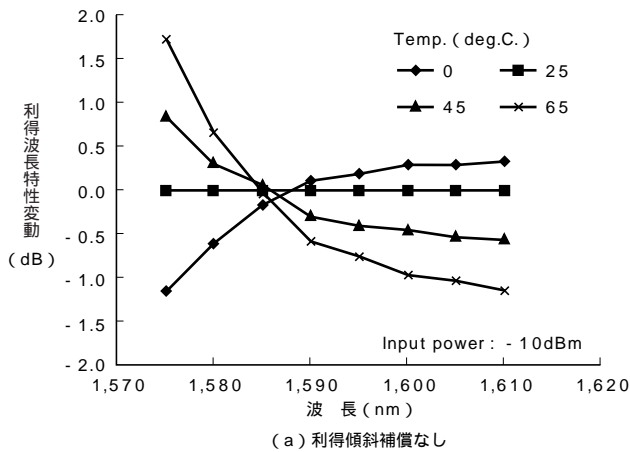


図6 利得変動時のEDFAの利得波長特性変動

Gain characteristics of EDFA (a) without the TDF gain-slope compensator and (b) with the TDF gain-slope compensator for the temperature of 0, 25, 45 and 65

の損失変化量は小さくてすむ。したがって、GSCを用いる場合の雑音指数の劣化はVOAを用いる場合よりも小さい。入力ダイナミックレンジ8dBにおいてGSCで利得傾斜補償した場合の雑音指数の最悪値は7.2dBであった。

次に、入力信号パワーを-10dBmとしトータル利得を保ったまま環境温度を0 から65 まで変化させ、25 での利得波長特性からの変化量を測定した。図6 (a) は利得傾斜補償しなかった場合、図6 (b) はGSCを用いて利得傾斜補償した場合の測定結果である。利得傾斜補償しない場合には図2に示したEDFのTGTのために利得波長特性が変化する。利得平坦度は最悪値で2.8dBまで劣化している。一方、利得傾斜補償した場合の利得平坦度は0.8dB以下に保たれている。このとき、利得傾斜補償に必要なTDFの励起パワーは、入力信号パワー-14dBm、温度65 のときに最大となり、150mW必要であった。雑音指数に関しては入力信号パワー-6dBm、温度65 のときに最大となり、7.5dBであった。

5.むすび

TDFの吸収飽和特性を利用したL-band EDFAの利得傾斜補償方法を提案し、EDFAの利得変動による利得傾斜と温度変動時による利得傾斜による利得平坦度の劣化を同時に補償した。信号波長帯域1,575nm~1,610nm、入力ダイナミックレンジ8dBにおいて従来の利得傾斜方法と同等の性能を実現し、かつ温度レンジ65 においても利得傾斜補償を実現した。また、EDFAの励起パワーは従来の利得傾斜方法より低減できることを確認した。

参考文献

- 1) 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
- 2) M. J. Yadlowsky : EDFA without dynamic gain-tilt using excited-state trapping, OAA'98, Technical Digest, pp. 24-27, 1998
- 3) H. Hatayama, C. Hirose, K. Koyama, N. Akasaka and M. Nishimura : Variable attenuation slope compensator (VASC) using silica-based planer lightwave circuit technology for active gain slope control in EDFAs, OFC2000, WH7, 2000
- 4) T. Kitabayashi, T. Aizawa, T. Sakai and A. Wada : Active gain-slope compensation of EDFA using thulium-doped fiber as saturable absorber, IEICE Transactions, Vol. E84-C, No.5, pp.605-609, 2001
- 5) J. Nakagawa, K. Isshiki, K. Shimizu, N. Suzuki and K. Motoshima : 1580-nm band erbium-doped fiber amplifier employing novel temperature compensation technique, OFC2000, WG-3, 2000
- 6) M. Suzuki and S. Shikii : The gain equalizing method of Erbium doped fiber amplifiers for C-band and L-band, IEEE/LEOS Annual Meeting 12th, ThJ2, 1999
- 7) S. Aozasa, H. Masuda, H. Ono, T. Sakamoto, T. Kanamori, Y. Ohishi and M. Shimizu : 1480-1510nm band Tm-doped fibre amplifier with high power conversion efficiency of 42%, Electron. Lett., Vol. 37, No.19, pp.1157-1158, 2001
- 8) T. Kasamatsu, Y. Yano and T. Ono : Laser-diode pumping (1.4 and 1.56 μm) of gain-shifted thulium-doped fibre amplifier, Electron. Lett., Vol. 36, No.19, pp.1607-1609, 2000
- 9) R. M. Percival, D. Szebesta, C. P. Seltzer, S. D. Perrin, S. T. Davey and M. Louka : 1.6- μm Pumped 1.9- μm Thulium-Doped Fluoride Fiber Laser, IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 31, No. 3, pp.489-493, 1995