

利得温度補償型光利得等化器の開発

Gain-Flattening Filters with Autonomous Temperature Stabilization of Erbium Gain

味村 裕*	水野 一庸*	並木 周* ²	田代 至男* ²	江森 芳博* ²
You Mimura	Kazuyou Mizuno	Shu Namiki	Yoshio Tashiro	Yoshihiro Emori
宮澤 真理子*	津田 寿昭* ³	西山 和彦* ³	植村 康生* ³	太田 寿彦* ³
Mariko Miyazawa	Toshiaki Tsuda	Kazuhiko Nishiyama	Yasuo Uemura	Toshihiko Ohta

概要 大容量化、高速化が求められている光通信需要により、波長分割多重（WDM：Wavelength Division Multiplexing）通信方式に対する期待はますます大きくなる一方である。WDMを支えるキーデバイスにエルビウム添加ファイバ増幅器（EDFA）があり、その利得が平坦であることが求められる。しかしながら、利得等化器の損失特性やエルビウム添加ファイバ（EDF）の利得特性が温度変化に起因して変動することにより、EDFAの利得特性が温度により変化することが問題となっている。今回、波長シフトの大きい温度変化を有する長周期ファイバグレーティングに着目し、一般的な利得等化器と組み合わせることにより、広い温度範囲でEDFAの利得特性の温度変化を補償する複合型利得等化器を実現した。

1. はじめに

インターネットの普及に伴い、大容量化、高速化が求められている光通信需要に対して、近年、複数の異なる波長の光信号を多重化して伝送する波長分割多重（WDM：Wavelength Division Multiplexing）通信方式が注目され、実用に至っている。WDMシステムのキーデバイスの一つとして、エルビウム添加ファイバ増幅器（EDFA）が用いられている。EDFAは利得帯域が比較的広いため波長帯域内の複数の信号光を一括増幅することが可能な光増幅器であり、伝送中継器の光増幅器としてWDMシステムには欠かせないものとなっている。

WDMシステムにおいて、各波長の信号光のレベル偏差は伝送距離や伝送帯域の低減につながるため、EDFAの利得波長特性は信号帯域内で平坦であることが要求される。しかし、EDFAはエルビウムイオンの誘導放出による入力信号光の増幅作用を利用しているため、イオンのエネルギー準位の微細構造を反映して利得波長特性は平坦ではなく、増幅帯域内において非対称な双峰形状となる。利得を平坦化するには利得等化フィルタを使用するのが一般的であり、エルビウム添加ファイバ（EDF）の利得波長特性と相反する損失波長特性を有する光フィルタをEDFA内に挿入することでEDFAの利得の平坦化を行う。

しかしながら、利得等化器には温度による損失特性の波長シ

フトがあり、また、EDFにも利得特性の温度変化が存在するため、EDFAとしては特に1530～1535 nmの領域での温度変化が大きいことが問題となっている¹⁾。現状、EDFA全体の温度調整等による利得の安定化が検討されているが、EDFAのサイズ、消費電力の問題より、更なる技術革新を期待する声が高まっていた。

今回、波長シフトの大きい温度変化を有する長周期ファイバグレーティング²⁾に着目し、一般的な利得等化器と長周期ファイバグレーティングとを組み合わせることにより、広い温度範囲でEDFAの利得の温度変化を補償する複合型利得等化器を実現した³⁾。本稿では、利得温度補償の原理と試作結果について報告する。

2. 従来のEDFAの利得温度特性

EDFAの利得を平坦化するために、EDFの利得波長依存性と相反する損失特性を有する光利得等化器を挿入して利得を平坦化する方法が一般的であるが、光利得等化器の方式としては、エタロンフィルタを用いる方法^{4)～6)}、誘電体多層膜を用いる方法⁷⁾、長周期ファイバグレーティングを用いる方法⁸⁾、マッハツェンダ型石英導波路を用いる方法⁹⁾、スプリットビームフーリエフィルタ¹⁰⁾を用いる方法等が提案されている。

これらの光利得等化器は、一般に媒質の温度変化に起因して損失特性の波長シフトが起こる。一方、EDFの利得特性も温度により変化するが、イオンのエネルギー準位の変化に従うため、利得波長特性は温度により形が変化し、波長シフトという形では現れない。

EDFの利得特性と光利得等化器の損失特性の温度による特

* ファイテルフォトニクス研究所 WP チーム 光機能部品グループ

²⁾ ファイテルフォトニクス研究所 WP チーム 光伝送グループ

³⁾ ファイテル製品事業部 光部品部 開発1グループ

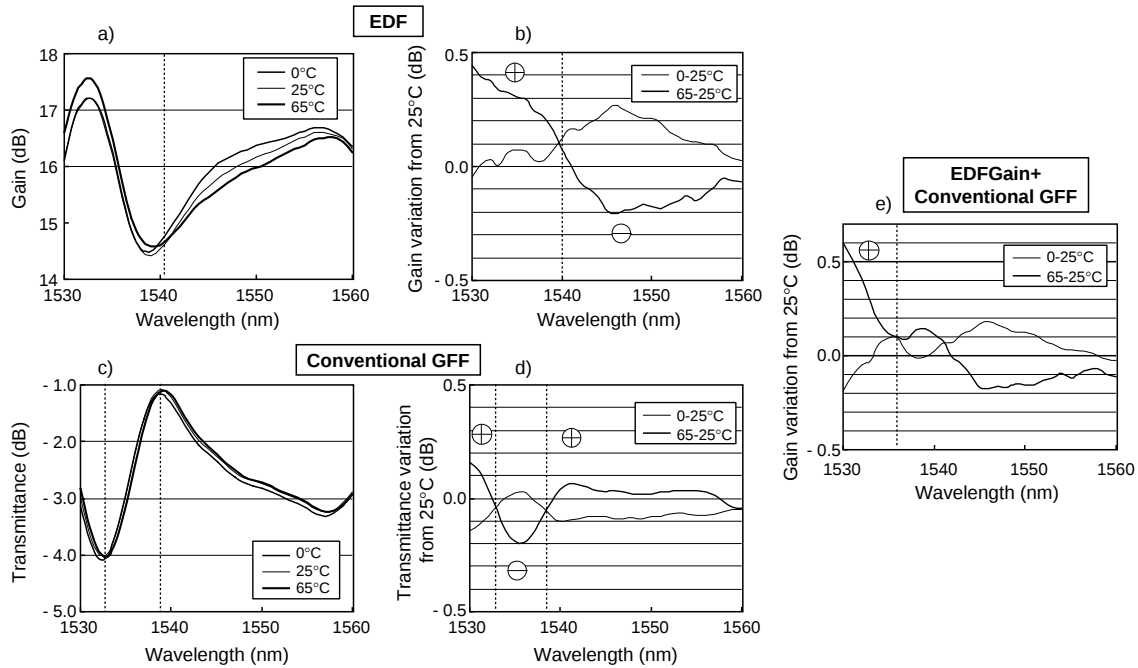


図1 EDFの利得と従来の利得等化器の温度特性
Temperature dependence of an EDF and a conventional gain-flattening filter

性変化の一例を図1に示す。ここで、温度上昇によりEDFAの利得が増大する量を温度係数と定義し、温度上昇により利得が増大する方向を正、利得が減少する方向を負とする。図1中の+は温度係数が正の波長領域を、-は温度係数が負の波長領域を示している。EDFの利得の温度係数は1540 nm以下の波長領域で正、1540 nm以上の波長領域で負となるのに対し、光利得等化器は温度上昇により長波長方向への波長シフトがみられるため、温度係数は1535 nm以下の波長領域で正、1535～1540 nmの波長領域で負、1540 nm以上の波長領域で正となる。EDFの利得と光利得等化器を組み合わせたEDFAの温度変化は、1535 nm以上の波長領域においてEDFの利得特性と光利得等化器の損失特性との温度変化が相殺されるのに対し、1535 nm以下の波長領域では温度変化が増長しあう結果となっている。(図1-e)に示す)

最近、誘電体多層膜と基板の応力を調整して波長シフトの温度変化がほぼ皆無である誘電体多層膜フィルタ型利得等化器が開発されているが、この方式ではEDFの利得の温度変化が残存するため、根本的な解決にはなっていない。また、EDFA全体の温度調整等による利得の安定化が検討されているが、EDFAのサイズや消費電力が問題となっている。

3. 長周期グレーティングによる温度補償

3.1 温度特性

長周期ファイバグレーティングを除く一般的なフィルタの温度特性は、ある波長 λ における温度 T による波長シフト量として、媒質の干渉幅 l と屈折率 n を用いて次式のように表される。

$$\frac{d\lambda}{dT} = \lambda \left(\frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT} + \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dT} \right)$$

第一項は線膨張係数に関する項であり、第二項は屈折率の温度変化に関する項であるが、一般的なガラスではどちらも正と

なり、一般的な利得等化器の温度による波長シフト量は0.010 nm/°C程度以下である。誘電体多層膜においては、誘電体多層膜と基板の応力の温度変化の項が加わり、基板の線膨張係数を調整することによりこの項を負にすることが可能であり、温度係数を限りなく0に近づけることができる。しかし、利得等化器の温度係数を0にしても、EDFの利得の温度変化が残存するため、全体として利得温度変化の小さいEDFAは実現できない。

一方、長周期ファイバグレーティングの温度特性は、中心波長 λ_c における温度 T による波長シフト量として、グレーティングのピッチ Λ 、ファイバの導波モードの実効屈折率 n_{core} 、 m 次のクラッドモードの実効屈折率 n_{cladm} を用いて次式のように表される¹¹⁾。

$$\frac{d\lambda_c}{dT} = (n_{\text{core}} - n_{\text{cladm}}) \frac{d\Lambda}{dT} + \Lambda \left(\frac{dn_{\text{core}}}{dT} - \frac{dn_{\text{cladm}}}{dT} \right)$$

線膨張係数に関する第一項については一般的な利得等化器と同程度の大きさであるが、導波モードとクラッドモードの実効屈折率の温度依存性に関する第二項については、一般的な利得等化器の $\lambda/n \sim 1 \mu\text{m}$ に対して $\Lambda \sim 100 \mu\text{m}$ であるため、長周期ファイバグレーティングの温度係数は大きくなる。一般的なファイバでグレーティングを形成した場合、長周期ファイバグレーティングの温度による波長シフト量は0.050 nm/°C程度であり、一般的な利得等化器と比べて大きくなっている。通常は温度係数を減らすために、ファイバに添加物を加えたり¹¹⁾、温度補償パッケージを用いるが、今回はEDFA全体の利得の温度変化を補償するために、温度係数の大きい長周期ファイバグレーティングをそのまま使用する。

3.2 長周期グレーティングによる温度補償の原理

EDFAの利得の温度補償には、利得の温度変化が問題となる1535 nm以下の波長領域で負の温度係数を有するフィルタが必

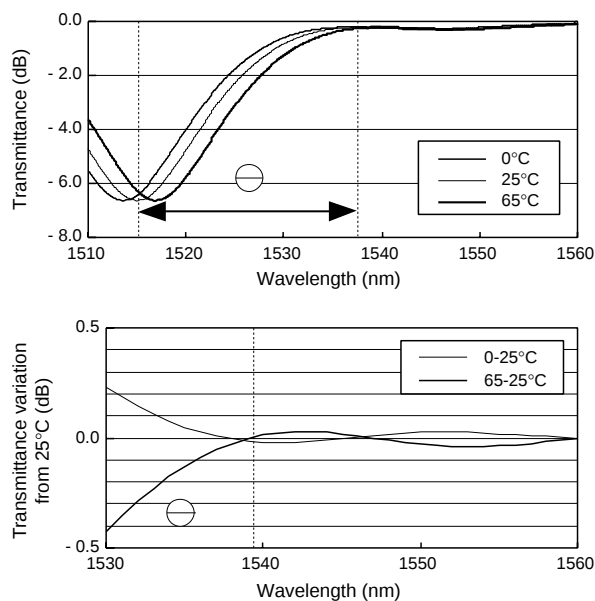


図2 長周期ファイバグレーティングの温度特性
Temperature dependence of a long-period fiber grating

要であるが、通常、フィルタの温度による特性の波長シフトは長波長方向であるため、1535 nm以下の波長領域で光利得等化器の損失特性とは逆のスロープの特性を有するフィルタが必要である。この逆のスロープの特性を有するフィルタとして、温度係数が大きい長周期ファイバグレーティングを温度係数が小さい一般的な利得等化器とを組み合わせることにより、EDFAの利得特性の温度変化を補償することが可能となる。

光利得等化器の損失特性と逆のスロープの特性を有するフィルタを温度補償のために用いる場合、利得の平坦化には利得等化器により温度補償のためのフィルタの分も含めて利得補償を行わなければならない。長周期ファイバグレーティングは温度係数が大きいので、逆のスロープ特性として傾きが少ないフィルタで温度特性の補償が可能であり、利得等化器の利得補償分は少なくなる。図2に長周期ファイバグレーティングの特性の一例を示す。1530 nmにおいて25～65の温度補償分0.4 dBを実現するために、透過損失は1 dB程度で十分であることが分かる。

長周期ファイバグレーティングを用いた温度補償EDFAの各部件の特性は図3のとおりである。EDFAの利得平坦化には、EDFの利得波長依存性と相反する損失から長周期ファイバグレーティングの損失分を差し引いた損失特性を利得等化器にもたせる必要がある。EDFAの利得特性の温度変化を補償するために用いる長周期ファイバグレーティングは1530 nmにおける損失が1 dB程度であるため、利得等化器の損失特性は、単独で利得等化器を構成する場合に必要な損失特性と比べて大きくは変わらない。

長周期ファイバグレーティングの損失特性の温度変化は1540 nm以下で短波長側に向かってより大きくなるため、従来問題となっていた1535 nm以下の波長領域でEDFAの利得の温度補償が可能となる。また、1540 nm以上の波長領域では、長周期ファイバグレーティングの損失特性の温度変化が少ないため、従来、EDFの利得特性の温度変化と利得等化器の損失特

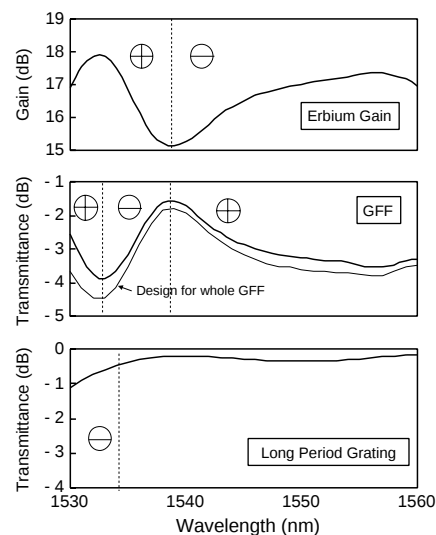


図3 長周期ファイバグレーティングを用いた利得等化器の特性
Characteristic of a gain-flattening filter with long-period fiber grating

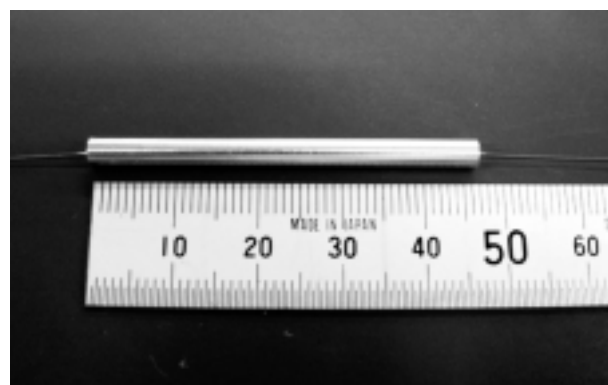


図4 長周期ファイバグレーティングモジュールの外観写真
Appearance of long-period fiber grating module

性の温度変化が相殺している領域には影響ないが、利得等化器には相殺効果のために温度による若干の波長シフトがあるままのほうがよい。

4. 試作

4.1 外観

利得温度補償型利得等化器に用いた長周期ファイバグレーティングモジュールの外観写真を図4に示す。寸法は47 mm × φ3.5 mmである。利得等化器の外観・大きさは長周期ファイバグレーティングモジュールと同じである。

4.2 EDFAの構成

試作に用いた利得温度補償EDFAの構成を図5に示す。光利得等化器はEDFと直列につないで利得等化を行うのが一般的であるが、今回は二段構成のEDFAの中間部に利得等化器と長周期ファイバグレーティングを直列にして挿入した。作製したEDFAの利得は13 dBである。

4.3 試作結果

図6に試作の結果を示す。長周期ファイバグレーティングの周期は400 μmであり、クラッドモードの次数は4次である。

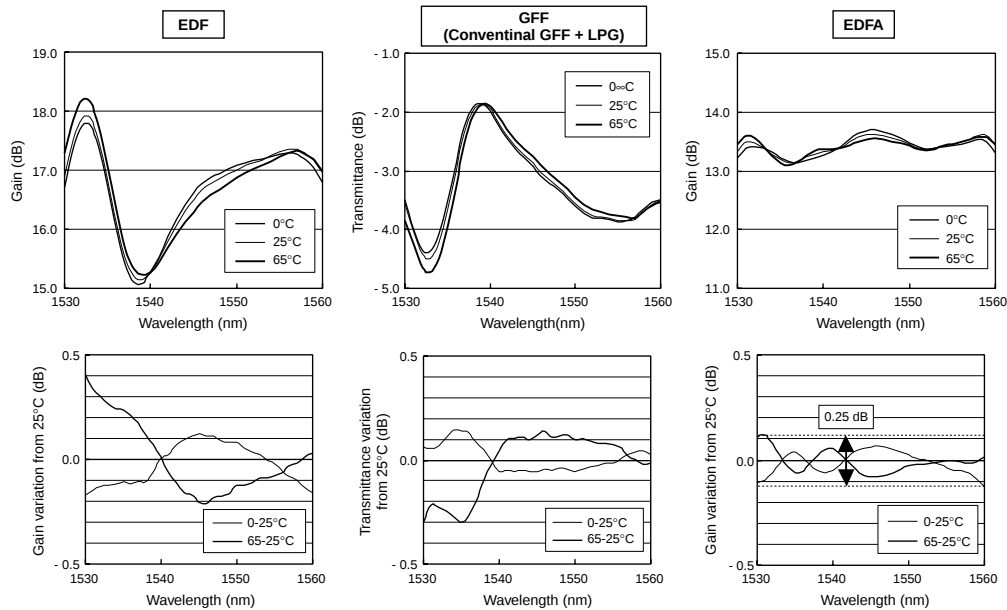


図6 利得温度補償型光利得等化器の試作結果
Characteristics of an EDFA using prototype gain-flattening filter
with autonomous temperature stabilization of Erbium gain

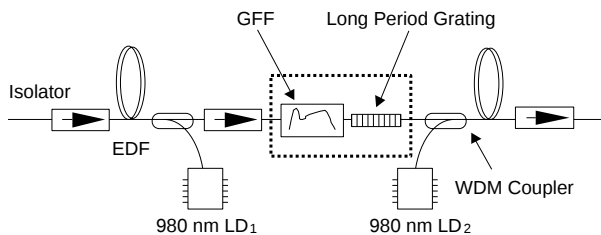


図5 利得温度補償EDFAの構成例
Configuration of autonomous temperature stabilized
EDFA

利得等化器の温度による波長シフト量は $0.006 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ ，長周期ファイバグレーティングの温度による波長シフト量は $0.050 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ である。

図6の利得等化器は利得等化器と長周期ファイバグレーティングを組み合わせた複合型利得等化器の損失特性を示しており，EDFの利得の温度変動に対して逆の温度変動をしているのが分かる。特に，EDFAの利得の温度変化が問題であった 1535 nm 以下の波長領域での特性が改善しており，利得の温度変化は $0 \sim 65$ の温度範囲で補償前の 0.79 dB に対して 0.25 dB であった。また，利得平坦度は $0 \sim 65$ の温度範囲においていずれの温度においても 0.60 dB 以下であった。

また，利得が 26 dB であるEDFAについても試作を行い，EDFA全体の利得の温度変化が $0 \sim 65$ の温度範囲で 0.45 dB という結果が得られている。

5. おわりに

従来，問題となっていたEDFの利得特性や利得等化器の損失特性の温度変化に起因するEDFAの利得の温度変化について，一般的な利得等化器と，温度係数の大きい長周期ファイバグレーティングとを組み合わせることにより，広い温度範囲で

EDFAの利得の温度変化を補償する複合型利得等化器を実現した。

2種類のEDFAにおいて複合型利得等化器の試作を行い，長周期ファイバグレーティングによる温度補償の効果を確認した。 $0 \sim 65$ の温度範囲でのEDFAの利得の温度変動は，利得が 13 dB のEDFAで 0.25 dB ，利得が 26 dB のEDFAで 0.45 dB であり，利得の温度変化の少ないEDFAが作製可能であることを確認した。

参考文献

- 1) N. Kagi et al. : J. Lightwave Tech. Vol. 9, 2 (1991), 261.
- 2) A. M. Vengsarkar et al. : J. Lightwave Tech. Vol. 14, 1 (1996), 58.
- 3) T. Tsuda et al.: "Gain-flattening filters with autonomous temperature stabilization of Erbium gain", OAA '2000, OWA 4-1.
- 4) 武田 他：エタロンフィルタによる光増幅器の利得平坦化，1995 信学秋季全大，(1995)，B-759.
- 5) 奥野 他：波長多重伝送用光ファイバ増幅器と光利得等化器，信学技報，EMD96-42 (1996)，19-24.
- 6) T. Naito et al. : Gain equalizer in long-haul WDM transmission system, IEICE Trans. Electron., Vol.E81-C, 8 (1998)，1293-1300.
- 7) N. Shimojoh et al. : New gain equalization scheme in WDM optical amplifier repeated transmission systems, OECC'96, Technical digest, 17B3-3 (1996)，120-121.
- 8) P. F. Wysocki et al. : Erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating, OFC'97, PD2 (1997).
- 9) H. Toba et al. : Demonstration of optical FDM based self healing ring network employing arrayed-waveguide-grating ADM filters and EDFAs, ECOC'94, (1994)，263-266.
- 10) J. W. Arkwright et al. : Custom designed gain-flattening filters with highly reproducible spectral characteristics, OAA'99, ThD18-1 (1999).
- 11) 島 他：温度無依存型長周期ファイバグレーティング，フジクラ技報，92 (1997)，11.