

# スラント型ファイバグレーティングを用いた利得等化器

光電子技術研究所 丹羽 敦彦<sup>\*1</sup>・二本柳 明展<sup>\*1</sup>・奥出 聡<sup>\*1</sup>・田中 大一郎<sup>\*2</sup>  
光ファイバ事業部 須藤 正明<sup>\*3</sup>

## Gain Equalizer Using Slanted Fiber Bragg Gratings

A . Niwa , M . Sudoh , A . Nihon-yanagi , S . Okude & D . Tanaka

スラント型ファイバグレーティング (SFBG) を用いることで、広帯域かつ等化偏差の小さい利得等化器を実現した。作製した広帯域SFBG利得等化器では、39nmの帯域幅で利得平坦性が0.19dBp-pという優れた特性を得た。さらにTelcordia GR-1209 coreおよびGR-1221 core準拠試験を行い、その高信頼性を確認した。

A gain equalizer with a wide operation bandwidth has been realized by using slanted fiber Bragg grating (SFBG) technology. The fabricated SFBG has superior quality of a small loss deviation of 0.19 dBp-p to the target loss spectrum over 39nm wavelength range. Moreover, the reliability tests in accordance with Telcordia GR-1209 core and GR-1221 core requirements were performed and the high reliability has been confirmed.

### 1. ま え が き

近年、インターネットの普及などにより拡大した通信需要にこたえるため、高密度波長多重 (Dense Wavelength Division Multiplexing, 以下DWDM) 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では、信号光の増幅のため、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (Erbium-doped Fiber Amplifier, 以下EDFA) が用いられるが、EDFAは比較的利得波長帯域が広い反面、波長帯域内で増幅度に波長依存性を持つという欠点がある。

DWDM伝送では多段中継増幅の場合、もっともレベルが低い信号光の品質により伝送距離が制限されるため、利得波長特性は平坦であることが望ましい。このため、EDFAの利得を平坦化する利得等化器 (Gain Equalizer, 以下GEQ) が必要となる。今後、さらに増え続ける通信需要に対応して、EDFAの利得波長帯域の拡大が要求されていることから、GEQにも等化波長帯域の拡大が求められている。

GEQとしてはこれまでに、長周期型ファイバグレーティング<sup>1)2)</sup>、エタロンフィルタ<sup>3)</sup>、誘電体多層膜フィルタ<sup>4)</sup>など各種方式が用いられてきた。今回当社は従来のGEQに比べて設計自由度が高く広帯域な等化特性が実現できるスラント型光ファイバグレーティング (Slanted Fiber Bragg Grating, 以下SFBG) を用いたGEQ (SFBG-GEQ) の開発を行い、利得等化帯域幅39nmにおいて等化偏差

(目標損失との差) 0.19dBp-pを実現した。

本報では、SFBG-GEQの動作原理、光学特性、および信頼性について述べる。

### 2. SFBG-GEQの原理

通常の短周期型FGは反射型素子であるため、GEQに適用すると、FGからの反射光がEDFAに戻ることで増幅特性に悪影響を与えたり、グレーティング内の多重反射により透過スペクトルにリップルを生じたりする。このような問題を回避するために、(1) FGからの反射光を抑制し、(2) 主に損失だけを発生させ、(3) 干渉によるリップルを抑えることが可能な、SFBG<sup>5)</sup>を利用した。

SFBGは、図1のようにグレーティング方向 (屈折率上昇がおきている面に垂直な方向) を光ファイバ軸から傾ける (スラントさせる、以後この角度をスラント角度という) ことにより、導波モードからそれと逆方向に伝搬する導波モード (反射モード) への結合を抑制し、グレーティング周期で決まる特定波長の光を後進クラッドモードへ結合させる。クラッドモードに結合した光はファイバ外に放出され、損失となるので、特定波長に損失を与える波長フィルタとして機能する。このときスラント

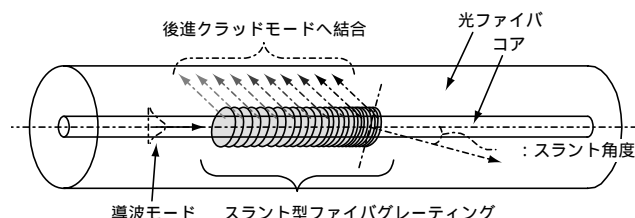


図1 SFBGの動作原理  
Operation principle of SFBG

\*1 光通信研究部

\*2 光通信研究部グループ長

\*3 光技術部

角度を最適化することで反射モードの結合は十分に小さくすることができ、従来の短周期型FGでみられた透過損失リップルを抑制できる。

最適なスラント角度を持つ短いグレーティングの透過損失スペクトル(基本スペクトル)は、図2(a)に示すようにグレーティング周期に対応した波長を中心として、ある広がりを持った分布となる。グレーティング周期が変化してもこのスペクトル形状は保持されたまま、中心波長のみが変化する。よって、グレーティングの周期が長手方向に徐々に変化するチャプドグレーティング構造を採用し、図2(b)に示すようにそれぞれの位置での屈折率変調振幅を制御することで、図2(c)に示すように所望の損失を得ることができる。

### 3. SFBG用光ファイバ

広帯域のGEQを実現するためには、より急峻な損失波長変化を実現する必要がある。このためには、図2(a)に示す基本スペクトル幅はできるだけ小さいことが望ましい。例えば、通常のSMファイバを用いた場合、反射が十分に抑制されるスラント角度では、基本スペクトル幅が20nmを越えるためGEQとして利用することができない。EDFAのGEQとしては、基本スペクトル幅10nm程度以下が必要とされる。そのため、コアおよびクラッドに対する紫外光感受性を最適化し、狭帯域な基本スペクトルが得られるSFBG専用ファイバの開発を行った。図3にそのファイバの基本スペクトルを示す。基本スペクトルの帯域幅は非常に狭帯域であり、より複雑な損失スペクトルが実現可能になった。基本スペクトルの帯域幅を最大損失の1/10のときの波長帯域幅として定義すると、それぞれ7nmおよび12nmとなる。

### 4. 微小リップルの低減

SFBGは反射モードへの結合を抑えているので、グレーティング内の多重反射による損失リップルは十分に小さいものの、クラッドからコアへ戻ってくる光がわずかに存在し、その干渉により0.2dBp-p程度のリップルが存在する。この値は、長距離光中継システムでEDFAとSFBG-GEQを多段に接続した場合、信号の大きな歪みの原因に

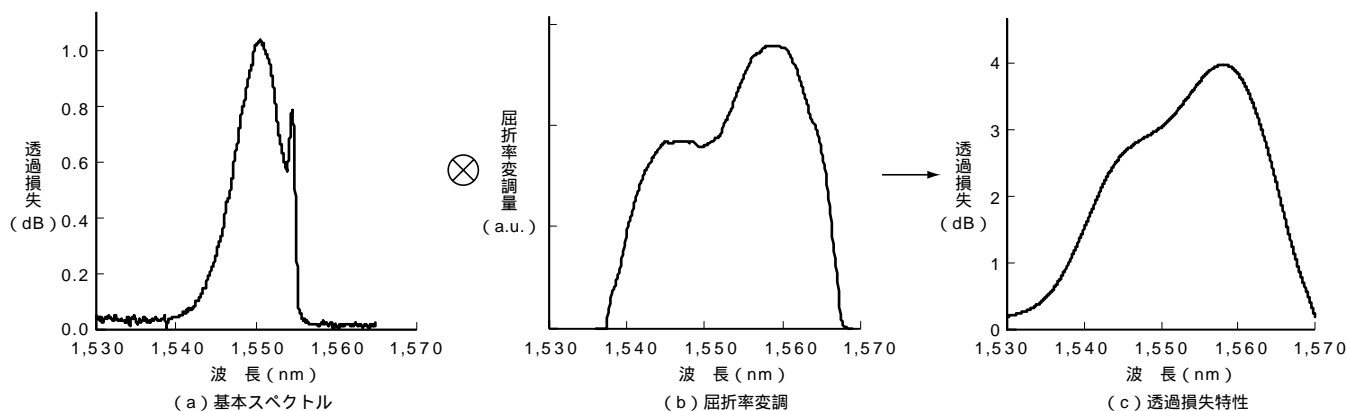


図2 SFBG-GEQ透過損失特性の制御  
Control of SFBG-GEQ transmission spectrum

なる可能性があるため低減する必要がある。そこでリップル低減の方法として、クラッド周囲を光ファイバと同程度の屈折率を持つ材料で覆い、コアに光が戻らないような構造を採用した。図4に屈折率が同程度の樹脂で覆う前後のSFBG-GEQの透過特性を示す。ファイバ周囲を覆った場合(太線)リップルがほぼなくなり、平均的な損失は変化していないことがわかる。

## 5. 広帯域SFBG-GEQ

### 5.1 広帯域SFBG-GEQの設計

一般的なEDFAの利得波長特性は、図5に示すような

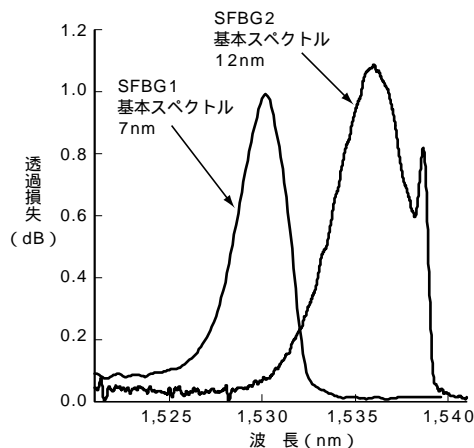


図3 SFBG用ファイバの基本スペクトル  
Fundamental spectra of two types of SFBG fiber

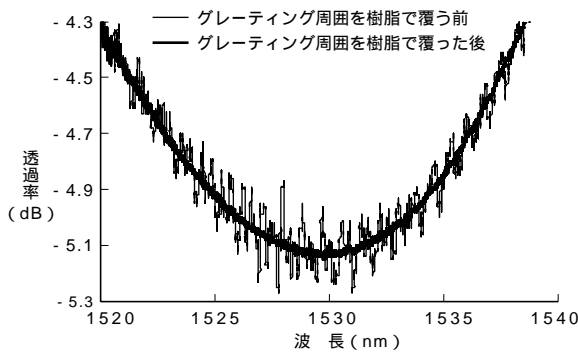


図4 微小リップルの低減  
Decrease of small ripple

1,530nm付近と1,560nm付近に2つの異なるピークを持つ。従来の帯域幅20～30nm程度のEDFAでは1,560nm帯のみを利得等化して利用していたが、より広帯域のEDFAを実現するためには1,530nm帯の増幅帯域も利用する必要がある。これら2つの帯域をすべて等化できるGEQを実現するため、それぞれの範囲を個別に等化するよう異なる2種類のSFBGを組み合わせ、図5上に示すように2つを直列に接続することで目標とする損失波長特性を実現できるように設計を行った。SFBG1には図3に示すような7nmの狭い帯域幅の基本スペクトルを持つファイバを用い、図5の1,530nm付近の急峻なピークを等化することに主眼を置いた。一方、1,560nm付近のピークは急峻ではないため、SFBG2には容易に大きな損失の得られる12nmの基本スペクトル帯域幅を持つファイバを採用した。それぞれの帯域に最適化したSFBG1とSFBG2を組み合わせることで、設計上1,528.2nm～1,567.2nmの39nmの帯域を

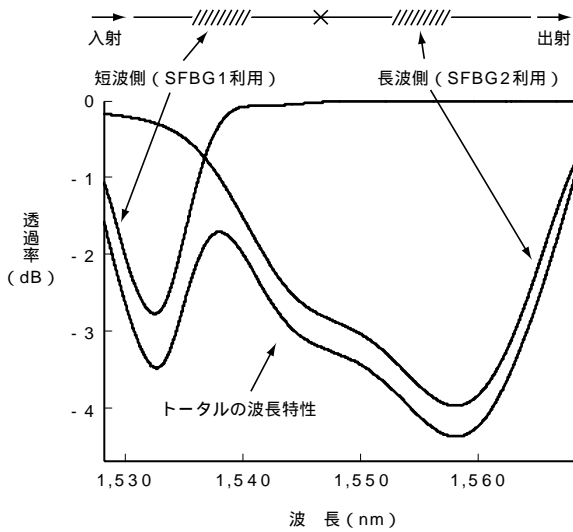


図5 広帯域SFBG-GEQ設計透過スペクトルおよび構成  
Structure and designed transmission spectrum of wide bandwidth SFBG-GEQ

0.098dBp-pで等化できるSFBG-GEQが実現できる。

### 5.2 広帯域SFBG-GEQの光学特性

作製した広帯域SFBG-GEQの透過スペクトル、目標スペクトルおよび目標からの偏差を図6に示す。得られた透過スペクトルは目標とほぼ重なっていることがわかる。偏差の最大値と最小値の差は1,528.2～1,567.2nmの範囲(39nm帯域)で0.19dBp-pであった。この値は前節で示した設計値よりも若干悪い値であるが、従来のGEQと比較して広帯域かつ低偏差である。

反射特性を図7に示す。スラント角度の最適化により反射率は十分低く抑えられており、使用帯域内での最大反射率は-27dBである。その他光学諸特性を表1にまとめた。

### 6. 信頼性

SFBG-GEQのパッケージ構造として、これまでにわれわれが開発した高信頼度光カプラ、光ファイバグレーティングと同じ構造を採用した。SFBG-GEQの信頼性を確

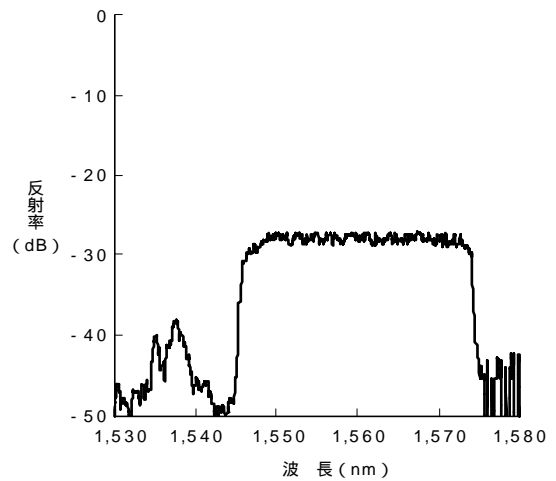


図7 広帯域SFBG-GEQの反射特性  
Reflection spectrum of wide bandwidth SFBG-GEQ

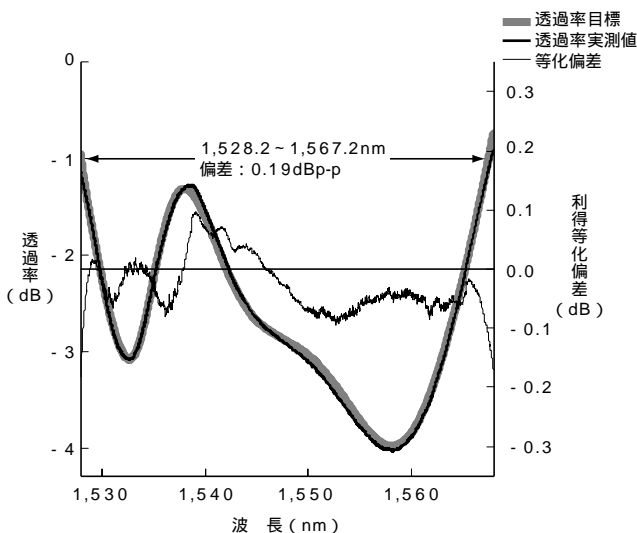


図6 作製した広帯域SFBG-GEQの透過特性および目標からの偏差  
Loss spectrum of the fabricated wide bandwidth SFBG-GEQ

表1 光学諸特性

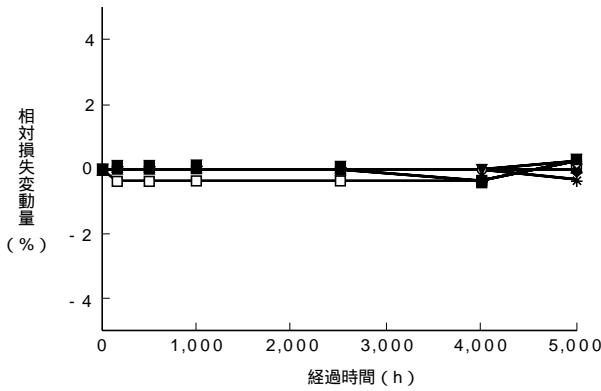
Optical characteristics

項目	数値
挿入損失	0.7 dB
PDL	< 0.1 dB
波長分散	0～0.1 ps/nm
温度特性	0.01 nm/
微小リップル	< 0.03 dB

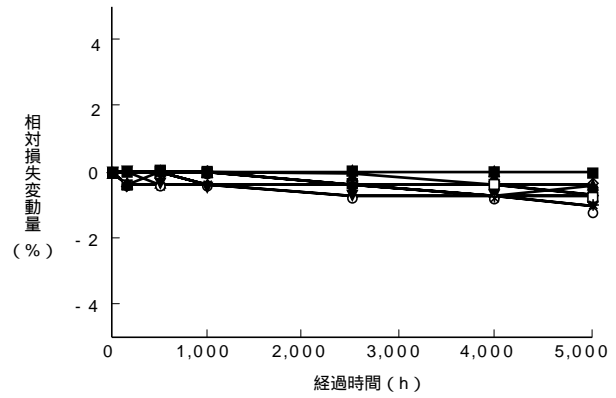
表2 信頼性試験の主な項目

Main test items of reliability test

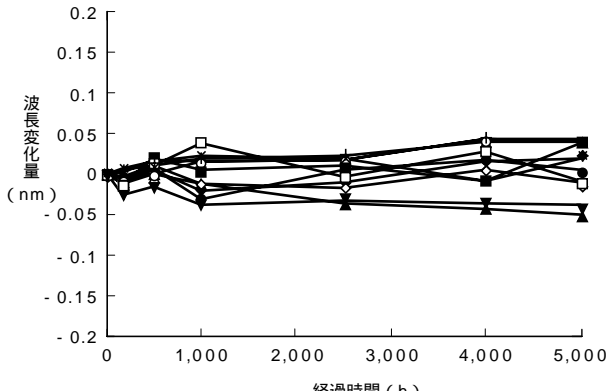
試験項目	条件
ヒートサイクル試験	75/ - 40 5,000h
高温高湿試験	75 90% R.H. 5,000h
高温試験	85 5,000h
低温試験	- 40 5,000h
振動試験	正弦波 / ランダム3軸
衝撃試験	1,000G 1ms 3軸
引っ張り試験	水平450gf / 垂直230gf



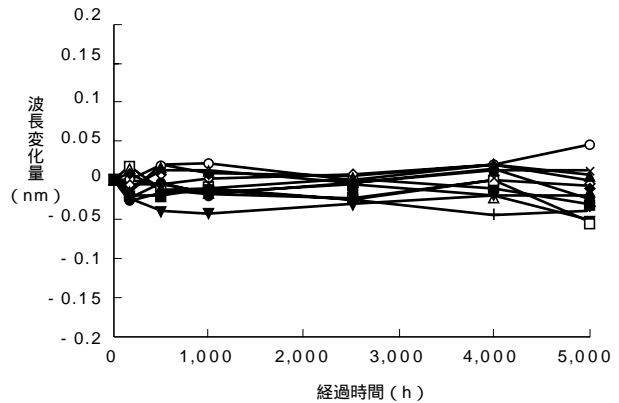
(a) 相対損失変動



(a) 相対損失変動



(b) 波長変化量



(b) 波長変化量

図8 低温試験結果  
Results of low temperature test

図9 ヒートサイクル試験結果  
Results of temperature cycle test

認するために、Telcordia GR-1221 core およびGR-1209 core準拠の試験を実施した。主な試験項目および条件を表2に示す。試験に対する評価は以下の項目について行った。

- ・最大透過損失値（初期損失に対する相対変化）
- ・最大透過損失波長（損失が最大になる波長）
- ・挿入損失

試験結果の例として、図8、図9に低温試験、ヒートサイクル試験の結果を示す。5,000時間後の最大透過損失の変動幅は±1%以内（約±0.03dB以内）であり、最大透過損失波長の変動幅は±0.05nm以内であった。これらの値はいずれも測定精度以内で、特性変動は非常に小さいことがわかる。その他の試験結果においても、特性の変動は非常に小さく、SFBG-GEQは高い信頼性を持っていることが確認できた。

### 7.むすび

スラント型ファイバグレーティングを用いて、39nm帯域の広帯域SFBG-GEQを実現した。広帯域SFBG-GEQの利得等化特性は39nmの帯域で利得等化偏差0.19dBp-pであった。実現した特性は、従来の利得等化技術と比べ広帯域かつ低偏差であり、優れた利得等化技術であるといえ

る。また信頼性の点においても、Telcordia GR-1221core およびGR-1209core準拠の試験により十分高い信頼性を持つことが確認できた。

DWDM伝送方式においては信号帯域拡大の傾向が続いており、SFBG-GEQは次世代の広帯域EDFAを実現するために必須のデバイスとなると期待される。

### 参考文献

- 1) A. M. Vengsarkar, et al.: Long-period fiber-grating-based gain equalizers, Opt. Lett., Vol.21, pp. 336-338, 1996
- 2) K. Shima, et al.: A novel temperature-insensitive long-period fiber grating using a boron-codope-germanosilicate-core fiber, Tech. Digest OFC'97, FB2, pp. 347-348, 1997
- 3) T. Naito, et al.: Gain equalizer in long-haul WDM transmission system, IEICE Trans. Electron., Vol.E81-C, 8, pp. 1293-1300, 1998
- 4) N. Shimojoh, et al.: New gain equalization scheme in WDM optical amplifier repeated transmission systems, OECC'96, Technical Digest, 17B3-3, pp. 120-121, 1996
- 5) M. J. Holmes, et al.: Physical properties of optical fiber sidetap grating filters: Free-space model, IEEE J. Selected Topics Quantum Electron., Vol.5, pp. 1353-1365, 1999