エタロン型光利得等化器の開発

Development of Etalon-type Gain Flattening Filter

水野一庸	西泰宏	味村裕	飯田義隆
Kazuyou Mizuno	Yasuhiro Nishi	You Mimura	Yoshitaka Iida
松 浦 寛 [*] Hiroshi Matsuura	尹 大烈 [*] Daeyoul Yoon	麻生修 ^{*2} Osamu Aso	山本敏郎 [*] Toshiro Yamamoto
虎谷智明 ^{*3}	, 小 野 義 視 ^{*3}	安 燁 *3	
Tomoaki Toratani	Yoshimi Ono	An Yo	

概 要 通信の大容量化,高速化に伴い,波長多重通信方式(Wavelength Division Multiplexing, WDM)の研究が活発に行われている。この伝送方式のキーデバイスであるエルビウム添加ファイバ 増幅器(Erbium-doped Fiber Amplifier, EDFA)には利得特性が平坦なことが求められる。利得平坦 化技術の一つに,EDFAの利得特性と相反する損失特性を有する光利得等化器を使用する方法がある。 我々は,エタロンフィルタを用いた光利得等化器において非線形フィッティングを利用した設計手法 を確立し、様々な損失特性に対し誤差の少ない設計を可能とした。また、本手法に基づいた設計によ りモジュールの試作を行い,利得平坦性に優れた特性を得ることができた。本報告では,設計手法を 解説するとともに,様々な利得特性を有する増幅器に対応する光利得等化器の試作結果についても述 べる。

1. はじめに

インターネットの普及により、光通信システムには大容量化, 高速化が求められている。従来,通信量を増大するために,ビ ットレートを増加してきたが,近年,更なる大容量化を実現す るための技術として検討されている,複数の異なる波長の光信 号を多重化して伝送する,波長多重通信方式(Wavelength Division Multiplexing, WDM)に対する期待は,ますます高ま る一方である。本方式を支えるキーデバイスの一つに,エルビ ウム添加ファイバ増幅器 (Erbium-doped Fiber Amplifier, EDFA) がある。これは,希土類イオンのエルビウムを添加し たファイバを光増幅媒質として使用し,これに,信号光とレー ザダイオードからの励起光を入射し,光励起されたエルビウム イオンに信号光を作用させて,誘導放出を起こして信号光を増 幅するものである。EDFAは, 増幅帯域が広く, 異なる波長の 光信号を一括して増幅することが可能であり, 伝送中継器の光 増幅器としてWDMには欠かすことのできないものである。

ところで, EDFAは, エルビウムイオンの発光スペクトルが 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をとる。EDFA の利得波長特性が平坦ではないことにより, 増幅された各波長

*³ 設備部 生産技術開発センター

の光信号の光出力レベルに偏差が生じることになる。一般に、 長距離光増幅中継伝送システムなどでは,光信号は多段中継さ れ,この光出力レベルの差が累積することとなる。受信器側に おいて波長分岐する際には,他の波長の信号光が雑音として作 用するため,光出力レベルが波長によって異なると多段中継さ れるほど低SN比の光信号が更に劣化することになり, 伝送可 能な距離が短くなる。また、伝送可能な帯域が狭くなることに より,チャンネルの数が減少するなどの問題が生じることにな る。したがって,各波長において等しいSN比が得られるよう に, EDFAの利得波長依存性が信号帯域内で平坦であることが 求められる。利得平坦化技術の一つに,光利得等化器を用いる 方法がある。これは, EDFA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利得の 平坦化を行う方法であり,この光フィルタのことを光利得等化 器という。

*3

今回,エタロンフィルタを用いた光利得等化器について,非 線形フィッティングを利用した設計手法を確立し,様々な利得 特性を補償する損失特性を実現することを可能とした。また、 試作したサンプルを評価した結果,設計と非常に一致した結果 が得られ,それを用いたEDFAの利得特性も良好であった。更 に,信頼性試験も実施し,光通信用光部品として十分な信頼性 を有していることも確認した。

2. 光利得等化器

EDFAの利得を平坦化するために, EDFAの利得波長依存性 と相反する損失波長特性を有する光利得等化器を挿入して利得

光技術研究所 WP プロジェクトチーム 光機能部品グループ

^{*2} 光技術研究所 WP プロジェクトチーム 光伝送グループ



光利得等化器の機能 Function of optical gain flattening filter



図3 エタロンフィルタの構成 Schematic diagram of the Fabry-Perot etalon filter

を平坦化する方法が検討されている。図1に光利得等化器の原 理を示す。等化前は,EDFAに利得波長依存性があり,伝送特 性においても光信号の光出力レベルに偏差が生じていることが わかる。光利得等化器を挿入して利得等化を行うと,EDFAの 利得波長依存性が平坦化され,光出力の偏差も改善されている。 図2は,光利得等化器を挿入したEDFAの構成の一例を示した ものである。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り,例では二段構成のEDFAの中間部に 光利得等化器が挿入されている。

これまで,光利得等化器の方式については多くの検討が行われてきた。例えば,エタロンフィルタを用いる方法^{1)~3)},誘電





体多層膜フィルタを用いる方法⁴⁾, 長周期ファイバブラッググ レーティングを用いる方法⁵⁾, マッハツェンダ型石英導波路を 用いる方法⁶⁾, スプリットビームフーリエフィルタを用いる方 法⁷⁾等が提案されている。前述のように, EDFAの利得波長依 存性は,増幅帯域内において非対称な双峰形状であり,これを 補償するための損失波長特性はこれと相反する形状となる。ま た,EDFAの利得波長依存性は,励起光源の出力特性,また, EDFのエルビウムイオンの添加量や共添加物の種類,量,更 に,EDF長により大きく左右される。

光利得等化器には,上記の理由による様々なEDFAの利得波 長依存性に対してその補償誤差を小さくできるような設計の自 由度が求められる。更には,偏光依存性損失(polarizationdependent loss; PDL)が小さく,製造安定性に優れていること が望ましい。

3. エタロン型光利得等化器

一般的に,EDFAの利得波長依存性は非対称な双峰形状を示 す。また,使用波長帯域や必要とされる利得により,光利得等 化器に求められる損失波長特性は大きく異なる。我々は,複数 のエタロンフィルタを組み合わせることにより,様々な利得波 長依存性を示すEDFAに対応した光利得等化器を設計すること



図5 エタロン型光利得等化器の原理 Principle of the etalon-type gain flattening filter

を可能とした。エタロンフィルタの特徴を述べたあと,エタロン型光利得等化器の設計原理について説明する。

3.1 エタロンフィルタの特性

エタロンフィルタは,一次元の光共振器であり,発明者の名前にちなんでファブリ・ペロー・エタロンフィルタ(Fabry-Perot etalon filter)と称される。これは,媒質をはさんで平行に配置された反射鏡間の光の多重反射による干渉現象を利用したものである。今回,我々が使用したエタロンフィルタの構成図を図3に示す。厚さ*d*,屈折率*n*の基板の両面に反射率*R*の反射膜を成膜した構成としている。

このエタロンフィルタを空気中において入射角 *θ* で光を入射 させた場合の透過特性は式(1)⁸⁾で表すことができる。

$$T(\lambda) = 10\log\left[\frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(\delta/2)}\right]$$
(1)
$$\delta = \frac{4\pi n d \sqrt{1-\sin^2\theta/n^2}}{\lambda}$$

図4にエタロンフィルタの透過特性の一例を示す。透過特性 は,正弦波状の周期的な形状となり,反射率を最適化すること によって,任意の振幅を持つエタロンフィルタを作製すること が可能である。また,厚さdを最適化することで,任意の位相





を得ることができる。図に示すように,入射光の入射角度θを 変化させることによっても位相を変化させることができる。

3.2 エタロン型光利得等化器の原理

エタロン型光利得等化器は,振幅及び位相が異なる複数のエ タロンフィルタを組み合わせることにより,EDFAの非対称な 双峰形状を示す利得特性を平坦化するものである。図5に,複 数のエタロンフィルタを用いた光利得等化器の原理を示す。振 幅及び位相が異なる4枚のエタロンフィルタを用いることによ り,EDFAの利得特性を補償する損失特性が得られる様子が示 されている。各々のエタロンフィルタに求められる振幅と位相 を実現するためには,基板の厚みと反射膜の反射率を高精度に 管理する必要がある。

3.3 エタロン型光利得等化器の設計

EDFAの利得特性の一例を図6に示す。この例では,使用波 長範囲を1530~1560 nmとする。この使用波長範囲において, 利得特性を平坦にするためには,線(a)で示される使用波長 帯域の最小利得以上の利得特性と相反する損失特性を与えれば 良い。また,線(b)で示されるように,最小利得よりも小さ い利得以上の利得特性と相反する損失特性であっても良い。後 述するように,どの利得を基準とするかによって光利得等化器 の設計は異なり,設計時のパラメータの一つとなる。我々は, 最小利得と設計時に使用する基準利得の差をオフセットと呼ん でいる。設計は,与えられた損失波形を実現するために必要な エタロンフィルタの枚数及び各エタロンフィルタの振幅及び位 相,つまり,反射膜の反射率と基板厚み,及び,入射角度を求 めることになる。

エタロンフィルタを使用した光利得等化器の設計は,損失ピ ークを基準とする方法³⁾や,フーリエ級数を利用した方法²⁾ が提案されているが,我々は,非線形フィッティングを用いた 設計手法を確立した。例えば,n枚のエタロンフィルタを使用 して得られる光利得等化器の損失特性は式(2)で記述され る。

$$T(\lambda) = \sum_{j=1}^{n} 10 \log \left[\frac{(1-R_j)^2}{(1-R_j)^2 + 4R_1 \sin^2(\delta_j/2)} \right]$$
(2)
$$\delta_j = \frac{4\pi n d \sqrt{1-\sin^2 \theta_j / n^2}}{\lambda}$$





- 38 ---



図8 設計例(1)の誤差偏差のエタロン枚数とオフセット依 存性

Dependence of error deviation on the number of etalon filter and offset upon the etalon type gain flattening filter (1)



図9 エタロン型光利得等化器の設計例(2) Designed characteristics of the etalon type gain flattening filter (2)

我々の開発した設計手法は,エタロンフィルタの枚数及びオ フセットを固定した際に,目標特性とT(λ)との二乗誤差が最 小となるように,各エタロンフィルタの振幅及び位相の組合せ, つまり,反射膜の反射率R₁と基板の厚みd₁及び入射角θ₁の組合 せを,非線形フィッティングにより求めることにある。二乗誤 差が最小になる組合せとは,つまり,エタロン枚数とオフセッ トを固定した際に,エタロンフィルタを用いる光利得等化器と して,最も利得等化性に優れていることにほかならない。

エタロンフィルタを4枚用いた光利得等化器の設計例を図7 に示す。図中に示した設計目標特性は,オフセットを含んだ損 失特性を示している。この場合,オフセットは0.8 dBとしてお リ,設計目標特性と設計値との誤差偏差は0.2 dBであった。誤 差偏差は,エタロン枚数とオフセットに大きく依存している。 図8に,図7の場合の,オフセットとエタロン枚数をパラメー タとした誤差偏差の挙動を示す。図中の誤差偏差は,オフセッ ト及びエタロン枚数を固定して,非線形フィッティングにより 求められた誤差偏差を示している。オフセット,エタロン枚数 が増えるに従い,誤差偏差は小さくなる傾向を示した。この場 合,誤差偏差が最小となるのは,エタロン枚数が4枚,オフセ ットが1.2 dBの場合で,誤差偏差は0.1 dBであった。しかしな がら,オフセットを大きくすることは,光利得等化器の挿入損 失を増やすことになり,最終的には,EDFAの利得を減少させ



図10 エタロン型光利得等化器の外観写真 Appearance of etalon-type gain flattening filter

ることになる。オフセットと誤差偏差はトレードオフの関係に あり,必ずしも,誤差偏差が最小となるオフセットがEDFAに 最適であるとは限らない。図7の場合は,上記の理由によりオ フセット0.8 dBとした設計を採用した。

このように,オフセットとエタロンフィルタの枚数は,要求 される目標特性に大きく依存する。図9に,エタロンフィルタ を1枚用いた光利得等化器の設計例を示す。この場合も,図8 のように 誤差偏差のエタロン枚数とオフセット依存性を求め, 組み合わせるEDFAに最適な設計としている。その結果,オフ セットは0 dBで,誤差偏差は0.17 dBのときが最適と判断し た。

以上のように,使用されるEDFAにより,光利得等化器に要 求される損失特性は大きく異なったものとなる。これは, EDFAの利得特性が,使用されるEDFや励起光源の出力特性, 光部品の配置に大きく依存するためである。我々は,図8に示 したように,非線形フィッティングを利用した設計手法を用い て,誤差偏差のエタロン枚数とオフセット依存性を求め,光利 得等化器が使用されるEDFAに最適なエタロンフィルタの組合 せを求めることを可能とした。本設計手法を開発することによ り,任意のEDFAに対応できる自由度の高いエタロン型光利得 等化器を実現した。

4. 試作

4.1 構成及び外観

試作した光利得等化器の外観写真を図10に示す。寸法は, ファイバの引出し部分を含めて48 mm × φ 5.5 mmである。構 成は 結合系に非球面レンズを用いた平行ビーム光学系であり, レンズ間にエタロンフィルタを配置している。

4.2 エタロンフィルタの組立て

設計で求められた各エタロンフィルタの振幅及び位相を実現 するために,エタロンフィルタの厚みや反射膜の反射率は高精 度に管理されるものであるが,実際には,ある程度のばらつき をもって作製される。特に,位相を決定する厚みについては, 最も精度が要求されるものであるが,作製限界があり,必ずし も設計値とは一致しない。厚み誤差に起因する位相誤差を調整 するために,エタロンフィルタの挿入角度を調整し,光の入射 角度を変化させて設計値と合わせることが必要である。そこで 我々は,個々の光利得等化器を組み立てる際に,実際に使用す るエタロンフィルタの特性から,最も誤差偏差が最小となる各



図11 設計例(1)の光利得等化器の試作結果 Characteristics of prototype gain flattening filter of the etalon type (1)





図12 設計例(2)の光利得等化器の試作結果 Characteristics of prototype gain flattening filter of the etalon type (2)

Results of reliability tests				
	条件			
項目		挿入損失変動 (dB)	誤差変動 (dB)	
湿度試験	85 , 85 %RH 336 hours	Avg: 0.06 Worst: 0.09	Avg: 0.08 Worst: 0.09	
振動試験	10 ~ 55 Hz, 1.52 mmp-p 3 axes 2 hours/axis	Avg: 0.06 Worst: 0.07	Avg: 0.02 Worst: 0.06	
衝撃試験	1.8 mp-p, 3 axes, 8 cycle	Avg: 0.10 Worst: 0.13	Avg: -0.08 Worst: -0.10	
低温試験	- 40 336 hours	0.04	0.05	
温度サイ クル試験	$21 \sim 76$ 42 cycles/2 weeks,	Avg: 0.09 Worst: 0.14	Avg: 0.01 Worst: 0.05	

信頼性試験結果

表1



10~80 %RH

図13 エタロン型光利得等化器を内蔵したEDFAの利得特性 Gain spectrum of the EDFA with etalon-type gain flattening filter

エタロンフィルタの挿入角度の組合せを,再び非線形フィッテ ィングを利用して計算することにより最適化し,作製する光利 得等化器の誤差偏差を小さくすることを可能とした。これによ ってエタロンフィルタの作製ばらつきに依存しない,安定した 誤差偏差が得られるようになる。

また,反射減衰量及びエタロンフィルタ間での多重反射の問 題については,あらかじめ,設計時に挿入角度を最適値に設定 し,更に,組み立て時に行う入射角度の最適化の際にも充分配 慮することにより回避できた。

4.3 試作結果

図11と図12に、図7と図9に示した設計を元に試作を行っ た結果を示す。各々の図において、(a)は組み合わせたエタ ロンフィルタの損失特性を、(b)は偏波依存性損失を示す。 実際は,これに平行ビーム光学系の損失が付加されて光利得等 化器の損失特性となる。図11の場合,(a)に示された損失特 性と設計目標特性との誤差偏差の平均は,0.27 dBであった。 また,図12の場合は,平均0.2 dBと,いずれも設計値と良く 一致する結果を示した。それぞれの図において,(b)に示す ように偏波依存性損失については,いずれの試作でも低い値を 示した。また,反射減衰量に関しても,45 dB以上得られてい ることを確認した。

5. 信頼性試験

光学部品に必要とされる信頼性について確認するため,湿度 試験,振動試験,衝撃試験,低温試験,温度サイクル試験を実 施した。表1に信頼性試験の結果を示す。いずれの試験におい ても損失及び誤差の変動は0.2 dB以下であり,充分な信頼性が 得られていることが確認された。

6. 光利得等化器と組み合わせた EDFA の特性

図13に,エタロン型光利得等化器と組み合わせたEDFAの 利得特性を示す。使用波長帯域である1530~1560 nmの帯域 において利得偏差が0.32 dBであった。また,この平坦性は 1565 nmまで確保されており,広帯域に平坦な利得特性が実現 されている。

7. おわりに

エタロンフィルタを用いた光利得等化器の設計において,非 線形フィッティングを利用した設計手法を確立し,任意の利得 波形に対して,それを補償する損失波形を得るためのエタロン フィルタの枚数とオフセットの関係を明らかにし,各エタロン フィルタに要求される厚みと反射率を求めることを可能とし た。また,組み立て時に,エタロンフィルタの作製誤差を補う ように挿入角度の調整を行うことにより誤差偏差が小さい光利 得等化器を作製することを可能とした。上記の設計手法及び組 み立て方法を用いて試作を行ったところ,設計と極めてよく一 致し,優れた等化特性を示す結果が得られた。偏波依存性損失 や反射減衰量に関しても実用上充分な結果が得られた。更に, 試作した光利得等化器を用いて,広帯域で利得平坦性に優れた EDFAが作製可能であることも確認した。

また,試作した光利得等化器の信頼性試験を実施し,光通信 に使用される光部品として十分な信頼性を備えていることを確 認した。

参考文献

- 1) 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, B-759.
- 2) 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,pp.19-24,1996.
- 3) T. Naito et al.;"Gain equalizer in long-haul WDM transmission system", IEICE Trans. Electron., Vol.E81-C, No.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) P. F. Wysocki et al.;"Erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating", OFC'97, PD2, 1997.
- 6) H. Toba et al.,"Demonstration of optical FDM based self healing ring network employing arrayed-waveguide-grating ADM filters and EDFAs", ECOC'94, pp.263-266, 1994.
- 7) J. W. Arkwright et al.,"Custom designed gain-flattning filters with highly reproducible spectral characteristics", OAA'99, ThD18-1, 1999.
- 8) A. Yariv; "Optical Electronics in Modern Communications", Oxford University Press, 1997.