

誘電体多層膜を用いた利得等化器用フィルタチップの開発

Gain-flattening Filters Using Dielectric Multilayer Films

味村 裕*

You Mimura

水野 一庸*

Kazuyou Mizuno

飯田 義隆*

Yoshitaka Iida

増田 幸治*

Kouji Masuda

伊藤 貴広*

Takahiro Ito

西 泰宏*

Yasuhiro Nishi

概 要 ますます増大する光通信需要に対し主流となりつつある波長分割多重（WDM：Wavelength Division Multiplexing）通信方式において、エルビウム添加ファイバ増幅器（EDFA）が不可欠なキーデバイスとなっている。帯域内で非平坦なEDFAの利得を平坦化する目的で利得等化器が用いられ、現在、様々な方式が提案されている。今回我々は、誘電体多層膜を用いた利得等化器用フィルタチップを開発し、誘電体多層膜の膜設計方法や膜厚制御方式、成膜条件等を利得等化器用フィルタ成膜に最適化することにより、利得が13 dBであるEDFA用の利得等化フィルタにおいてフラットネス0.19 dB、挿入損失0.1 dB未満を実現した。

1. はじめに

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）通信方式が実用化、導入されてきている。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）が用いられる。EDFAは利得帯域が比較的広いという特徴により、波長帯域内の複数の信号光を一括増幅することが可能であり、最近では更に増幅帯域が拡大しつつある。

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。

利得等化フィルタの方式として、エタロンフィルタを用いる方法^{1)~3)}、誘電体多層膜を用いる方法⁴⁾、長周期ファイバグレーティングを用いる方法⁵⁾、短周期ファイバブラッググレーティングを用いる方法⁶⁾、マッハツェンダ型石英導波路を用いる方法⁷⁾、スプリットビームフーリエフィルタ⁸⁾を用いる方法等が提案されている。誘電体多層膜フィルタ以外は波長に対し周期的な特性をもつ複数の部品を組み合わせる必要があるが、誘電体多層膜フィルタは1つのフィルタ内の干渉により損失波長

特性を得ることが可能であることが特徴であり、挿入損失、生産性、設計自由度の面で有利である。

しかしながら、誘電体多層膜フィルタは目的損失波長特性を得るために70層以上もの多層膜を高精度で成膜することが不可欠であり、従来の成膜制御技術では不可能であった。最近になって、成膜中の成膜誤差に応じて膜厚を補正しながら成膜を行う高精度な成膜システム⁹⁾が開発され、実用に至っているが、生じる膜厚誤差が許容以上の場合には補正がうまく機能しない。また、成膜中の膜の光学特性を高精度に把握する必要があるなどの問題が残っている。

今回、前述の膜厚補正システムを利用しない高精度な位相予測膜厚制御によって、利得等化器用誘電体多層膜フィルタの成膜を実現した。本稿では、今回利用したフィルタの膜設計方法と新しく開発した膜厚制御システムについて説明し、試作結果を報告する。

2. 膜設計、成膜制御手法の改善

2.1 厚膜設計

高精度な損失波長特性をもつ誘電体多層膜フィルタを得るためには、大きく2つの方法がある。設計上の許容誤差を大きくする方法と成膜時の光学膜厚制御誤差を小さくする方法である。まず、前者について改善を試みた。

誘電体多層膜は、ガラス基板上に高屈折率物質と低屈折率物質を交互に積層する構造をもつが、設計の中心波長と呼ばれる基準波長を目的損失波長特性付近の波長に設定し、中心波長の約4分の1の光学膜厚をもつ膜を積層するのが一般的である。光学膜厚が中心波長の4分の1である膜のスタックは中心波長付近に透過遮断域、その両脇に透過帯をもつ光学特性になっており、光学膜厚を非線形フィッティングなどの手段で補正することにより目的損失波長特性に近い特性を得ることができ、通常、利得等化フィルタもこの方法で設計される。

* ファイナルフォトリソ研究所 WP チーム 光機能部品グループ

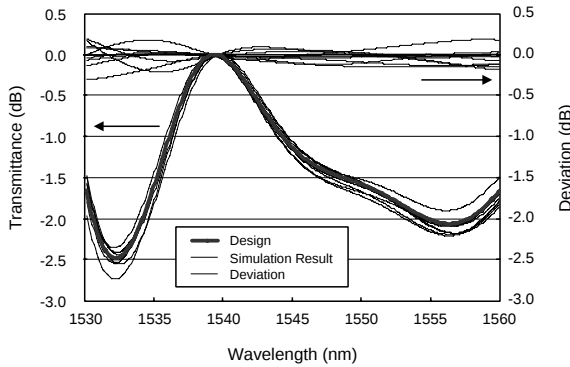


図1 成膜シミュレーションの例（試行10回）
Simulation of characteristics of gain-flattening filter

表1 各設計の評価
Evaluation of each multilayer filter design

Base optical thickness	$\lambda/4$	$3\lambda/4$	$5\lambda/4$	$7\lambda/4$	$9\lambda/4$
Number of Layers	69	42	32	26	22
Total optical thickness (as $\lambda=1550$ nm)	15.5λ	29.5λ	38.1λ	43.7λ	47.7λ
Optical thickness tolerance (Base $\lambda/4$)	0.1%	0.2%	0.5%	0.8%	1.0%
Refractive index tolerance	0.1%	0.2%	0.5%	1.0%	1.0%

光学膜厚が中心波長の4分の1である膜のスタックの遮断帯は中心波長付近に現れるが、これは往復の光路長が波長の2分の1になるためであり、ブラッグの法則により明らかである。同じように、往復の光路長が波長の2分の1波長の奇数倍になる場合に遮断帯となるが、このときの膜厚は遮断帯波長の4分の1の奇数倍である。中心波長に対し、4分の1の奇数倍の光学膜厚をもつスタックの特性は同じように中心波長付近に遮断帯、その両脇に透過帯をもつ光学特性となる。

中心波長の4分の1の1, 3, 5, 7, 9倍の光学膜厚を初期値として、それぞれ非線形フィッティングにより補正をかけて同じ利得等化フィルタを設計し、比較を行った。許容誤差については、ある標準偏差をもつランダムな膜厚誤差を与えて成膜シミュレーションを20回試行し、フラットネスの最大値が0.3 dBを越える誤差値を許容誤差とした。フラットネスとは目的損失波長特性の偏差の最大値から最小値をさし引いた値である。シミュレーションの例を図1に示す。

表1に各設計の許容誤差をまとめた。より厚い光学膜厚のスタックで利得等化フィルタの膜設計を行った場合のほうが、同じ特性を得るのに層数が少なく済む。また、より厚い光学膜厚設計ほど光学膜厚や屈折率の許容誤差が大きくなるのが分かる。その反面、より厚い光学膜厚設計ほど総光学膜厚が厚くなるが、近年の成膜装置の進歩により50 λ 程度（ $\lambda = 1550$ nmとして）まではさほど問題ではなくなっている。

膜面に対して入射光の入射角度が垂直でない場合、偏波依存性損失（PDL）が有限の値となるが、各層の光学膜厚が中心波長の4分の1の1, 3を基準とした設計について、それぞれPDL理論計算結果を図2に示す。より厚い光学膜厚のスタックのほうがPDLの値が小さくなる傾向にあることが分かる。

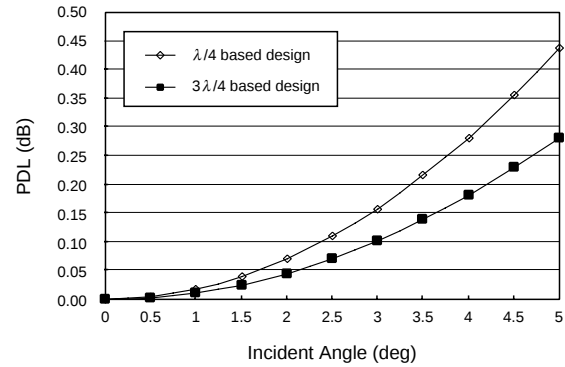


図2 $\lambda/4$, $3\lambda/4$ 基準波長設計におけるPDLの入射角度依存性
Dependence of PDL on incident angle

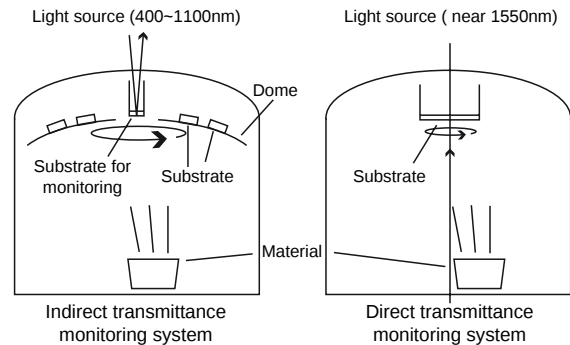


図3 間接型光学膜厚モニタと直視型光学膜厚モニタ
Schematic of the indirect and direct transmittance monitoring systems

2.2 直視型光学膜厚モニタ

成膜装置には膜物質の飛散分布が存在するため、成膜装置内の位置に応じて成膜される膜厚が異なる。より高精度な成膜の場合には、基板内の位置による膜厚分布でさえ問題となることもある。従来、光学膜厚モニタ専用の基板を成膜基板と別の位置に用意し、1層ごとに新しいモニタ基板を用いるのが光学膜厚モニタでは一般的であったが、膜厚分布を正確に把握するため、より高精度な光学膜厚制御には向かない。今回利用した成膜装置では、基板上の目的損失光学特性を得たい部分を直接モニタする直視型光学膜厚モニタ方式を採用した。モニタ光の光路は基板に垂直になるようにしてあり、透過型である。間接型と直視型の光学膜厚モニタ方式の概念図を図3に示しておく。

また、光学膜厚モニタはモニタ波長の4分の1を成膜するごとに透過率のピークが現れる透過率変化を利用して光学膜厚を制御するが、従来は成膜する光学膜厚が中心波長の4分の1程度であったため、モニタ光の波長には中心波長と比べて半分以下の短い波長を使用することが多かった。目的損失波長特性の波長域は通常中心波長付近であるが、目的損失波長特性の波長域とモニタ光の波長では屈折率が異なるため、波長分散を考慮したとしても成膜誤差の原因となり得る。

光学膜厚が中心波長の4分の2より大きい場合には目的損失波長特性の波長域を光学膜厚モニタ波長とした場合でも透過率ピークが複数現れるため、モニタ光の波長は目的損失波長特性の波長域から選択しても精度の良い制御が可能である。前述の

厚膜設計を利用して、光学膜厚モニタ波長には目的損失波長特性の波長域から選択した。

2.3 位相予測光学膜厚制御

多層膜理論¹⁰⁾について少々説明しておく。多層膜フィルタの膜表面に対して入射角が垂直であるとして、多層膜の第 j 層の特性行列 M_j は式(1)のように表される。 g_j は式(2)で表され、 d_j 、 n_j はそれぞれ第 j 層の物理膜厚、複素屈折率、 λ は入射光の波長である。

$$M_j = \begin{Bmatrix} \cos g_j & i \sin g_j / n_j \\ i n_j \sin g_j & \cos g_j \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$g_j = \frac{2\pi n_j d_j}{\lambda} \quad (2)$$

多層膜全 N 層での特性行列 M は式(3)のように各層の特性行列の総積で表され、

$$M = \begin{Bmatrix} m_{11} & i m_{12} \\ i m_{21} & m_{22} \end{Bmatrix} = \prod_{j=1}^N M_j \quad (3)$$

この要素を m_{11} 、 m_{12} 、 m_{21} 、 m_{22} とすると、多層膜の光透過率は式(4)に示すエネルギー透過率の式により与えられる。 τ は式(5)で表されるものである。ここで n_0 、 n_s はそれぞれ媒質、基板の屈折率である。

$$T = \tau \tau^* \frac{n_s}{n_0} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{2n_0}{(m_{11} + i m_{12} n_s) n_0 + (i m_{21} + m_{22} n_s)} \quad (5)$$

これら理論式から成膜中の層での透過率変化を求めることができる。既に成膜が終わっている層全体を1つの特性行列で表し、その要素を定数とすると、成膜中の層での透過率変化は物理膜厚のみの関数で表すことができる。成膜中の層内の成膜レートと屈折率が一定であるとして、物理膜厚は成膜時間に比例するため、物理膜厚を成膜時間に置き換えることが可能であり、成膜中の透過率変化を時間の関数として非線形フィッティングを用いて式の係数を求めることが可能となる。透過率変化は時間に対する周期関数となるので、正弦関数内の値を位相と呼ぶこととすると、成膜中の現在時間の位相を逐次リアルタイムに求めることができることになり、あらかじめ理論式から求められる、成膜を停止すべき位相に達した時間に成膜を終了することにより、成膜を停止する位相によらず高精度な制御が可能となった。

前述のように厚膜設計と直視型光学膜厚モニタとを同時に用いた場合、モニタ光の波長において透過率ピークが複数現れるため、位相予測光学膜厚制御方式と組み合わせてより高精度な成膜が可能となる。

最近主流となりつつある成膜中の成膜誤差に応じて膜厚を補正しながら成膜を進めるシステムは、成膜バッチごとに誤差の生じる層や量が異なり、成膜バッチ間の再現性が比較的良好でない。また、誤差補正に高精度な屈折率などの光学定数が必要のため、光学定数の見積もりに誤差が合った場合、補正が不正確になる可能性もある。一方、位相予測光学膜厚制御方式は誤差

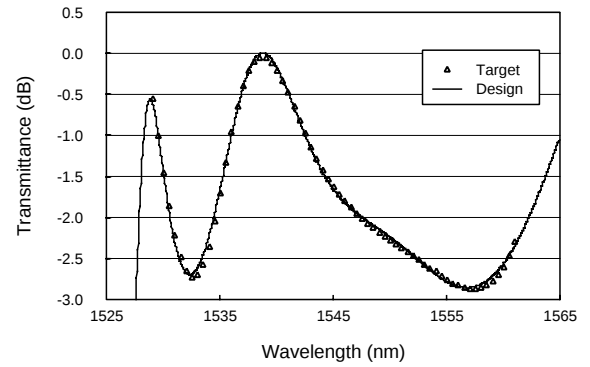


図4 利得等化フィルタの設計特性
Characteristics of designed gain-flattening filter

を極力生じさせない状態のまま精度よく成膜を進める方式であるため、高精度であること以外にも再現性が良いという利点もある。

3. 試作

3.1 試作仕様と方法

利得が13 dBのEDFAに用いられる利得等化フィルタの試作を行った。膜設計は $3\lambda/4$ を基準膜厚とした設計を使用し、層数は44層である。目的損失波長特性と設計特性のプロファイルは図4に示したとおりであり、目的損失波長特性に対し、設計特性のフラットネスは0.18 dBである。

光学膜厚制御は光源にハロゲンランプを用いた直視型光学膜厚モニタ方式で行った。モニタ波長には制御に影響を受けにくい波長を各層ごとに1530 ~ 1562 nmの範囲内から選択した。また、各層の成膜終了のタイミングは位相予測光学膜厚制御方式で行ったが、シャッタの反応時間などを考慮して誤差が少なくなるように若干のタイミング補正を行った。

成膜はIAD (Ion-Assisted Deposition) 法により行った。基板温度やイオン銃などの成膜条件は最良の膜質が得られるように最適化しており、また、各層の成膜開始直後から成膜レートが安定する条件で成膜を行った。

3.2 外観

試作した利得等化フィルタチップとこのチップを用いた利得等化フィルタモジュールの外観写真を図5に示す。利得等化フィルタチップの寸法は2.0 mm × 1.4 mm × 1.0 mmt、利得等化フィルタモジュールの寸法は48 mm × φ6 mmである。

3.3 試作結果

図6に試作結果を示す。目的損失波長特性に対するフラットネスは0.19 dB、挿入損失は0.1 dB未満であった。25 ~ 70 °Cの温度範囲においてフラットネスの変動量は0.01 dB程度である。温度による波長シフトについては、狭帯域バンドパスフィルタにおける手法¹¹⁾を適用して、基板の熱膨張係数を選択することにより調整することが可能である。PDLについてはほぼ設計から予測される値が得られている。

3.4 信頼性試験

温度、湿度の環境下における試験として、高温高湿試験 (Telcordia 1209: 85 °C, RH85 %, 14日, Telcordia 1221: 85 °C, RH85 %, 2500時間)、温度湿度サイクル試験 (Telcordia 1209:

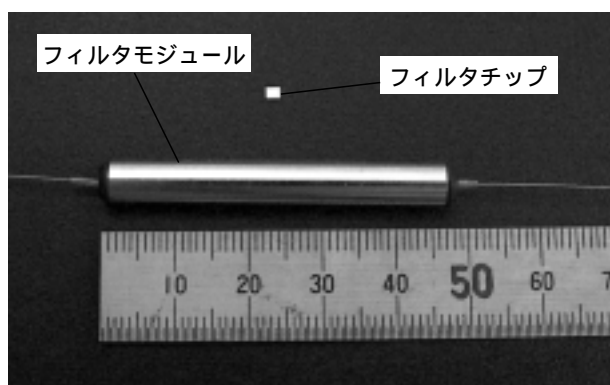


図5 利得等化フィルタチップとモジュールの外観写真
Appearance of a gain-flattening filter chip and module

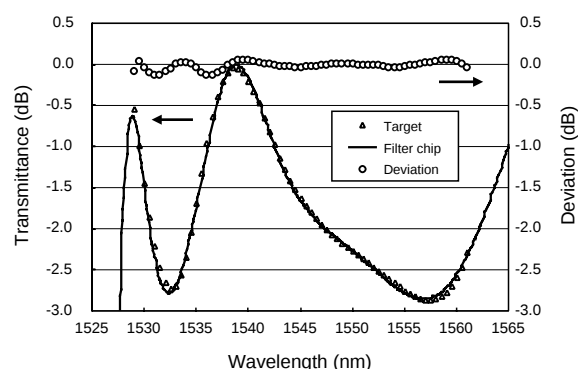


図6 利得等化フィルタの試作結果
Characteristics of actual gain-flattening filter

表2 各環境試験結果
Results of Telcordia environment tests

試験項目	試験条件	最小挿入損失変動量(dB)		波長シフト量 (nm)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
高温高湿試験	85 /85%RH , 14 days (Telcordia: GR1209)	0.019	0.016	0.013	0.010
高温高湿試験	85 /85%RH , 2500 hrs (Telcordia: GR1221)	0.040	0.024	0.020	0.007
温度湿度サイクル試験	- 40 ~ 75 , 50 cycles	0.023	0.018	0.003	0.003
温度湿度サイクル試験	- 40 ~ 75 , 500 cycles (Telcordia: GR1221)	0.022	0.011	0.018	0.003
高温放置試験	85 , < RH40% , 2500 hrs (Telcordia: GR1221)	0.085	0.009	0.024	0.012
低温放置	- 40 , 2500 hrs (Telcordia: GR1221)	0.050	0.018	0.038	0.011
煮沸試験	100 Water , 10 min	0.036	0.031	0.018	0.014

- 40 ~ 75 , 50 サイクル , 250 時間 , Telcordia 1221: - 40 ~ 75 , 500 サイクル , 2500 時間) , 高温放置試験 (Telcordia 1221: 85 , RH < 40 % , 2500 時間) , 低温放置試験 (Telcordia 1221: - 40 , 2500 時間) 煮沸試験 (100 Water , 10 分) の各試験をそれぞれ 10 チップずつ実施した。試験前後における最小挿入損失の変動量と波長シフトの平均値は表2のとおりである。各環境試験における特性変化や波長シフトは問題のないレベルである。

4. おわりに

従来の成膜制御技術では、誘電体多層膜フィルタによる利得等化器用フィルタの成膜は困難であったが、今回、厚膜設計を用い、位相予測光学膜厚制御を導入することにより、利得が 13 dB の EDFA に用いられる利得等化フィルタとして目的損失波長特性に対するフラットネス 0.19 dB を実現した。温度、湿度の各環境試験にも合格している。

誘電体多層膜フィルタによる利得等化器用フィルタの用途は EDFA に限ることはなく、ラマンアンプなどにも利用可能である。また、今回開発した厚膜設計と位相予測光学膜厚制御を用いた高精度な誘電体多層膜フィルタ成膜技術は、利得等化フィルタ以外のエッジフィルタ、バンドパスフィルタなどに応用可能である。WDM 通信においては信号帯域がますます広がる一方で、今後の種々のフィルタ需要にも十分応じられる技術である。

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，(1995)，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 (1996)，19-24.
- 3) T. Naito et al. : Gain equalizer in long-haul WDM transmission system, IEICE Trans. Electron., Vol.E81-C, 8(1998)，1293-1300.
- 4) N. Shimojoh et al. : New gain equalization scheme in WDM optical amplifier repeated transmission systems, OECC'96, Technical digest, 17B3-3(1996)，120-121.
- 5) P. F. Wysocki et al. : Erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating, OFC'97, PD2(1997) .
- 6) O. Gautheron et al. : Optical gain equalization with short period fiber gratings, ECOC'97, WE2C-1(1997) .
- 7) 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.
- 8) J. W. Arkwright et al. : Custom designed gain-flattening filters with highly reproducible spectral characteristics, OAA'99, ThD18-1 (1999) .
- 9) B. T. Sullivan, J. A. Dobrowolski et al. : Manufacture of complex optical multiplayer filters using an automated deposition system, ISSP '97, 589(1997)
- 10) 石黒，池田 他：光学薄膜，共立出版
- 11) H. Takahashi. : Temperature stability of thin-film narrow-bandpass filters produced by ion-assisted deposition, Applied Optics, 34(1995) .