

# 技術紹介

## 6 高性能エッジフィルタ・利得等化フィルタの開発

Development of High-end Edge Filter and Gain Flattening Filter

中村 則彦	Norihiko Nakamura	中央研究所	研究開発部
花園 勝巳	Katsumi Hanazono	中央研究所	研究開発部
伊藤 和彦	Kazuhiko Ito	中央研究所	研究開発部 シニアマネージャー

**キーワード** 光通信、高性能エッジフィルタ、利得等化フィルタ、イオンビームスパッタリング成膜法、多層膜、高精度透過率制御法  
**Keywords** optical communication, high-end Edge Filter, Gain Flattening Filter, ion beam sputtering deposition, multi-layer coating, high accuracy optical thickness control method

### ■ 要旨

これまで培ってきたイオンビームスパッタリング成膜法と当社独自の高精度透過率制御法の開発により、波長間隔 2.7nm（透過率 25dB と 0.3dB 間）の急峻な切り分けおよび 250nm 以上の広い透過帯域をもつ高性能エッジフィルタと、損失偏差± 0.3dB 未満で挿入損失 0.1dB 未満の優れた利得等化フィルタが実現できました。

### ■ SUMMARY

Based on our established ion beam sputtering technology and development of our original high accuracy optical thickness control method, we have completed development of the two types of high performance filters. One is the high-end Edge Filter with broad passband width more than 250nm and high isolation by wave interval of 2.7nm (between transmittance 25dB to 0.3dB). Another is the Gain Flattening Filter with insertion loss of less than 0.1dB at under ± 0.3dB loss deviation.

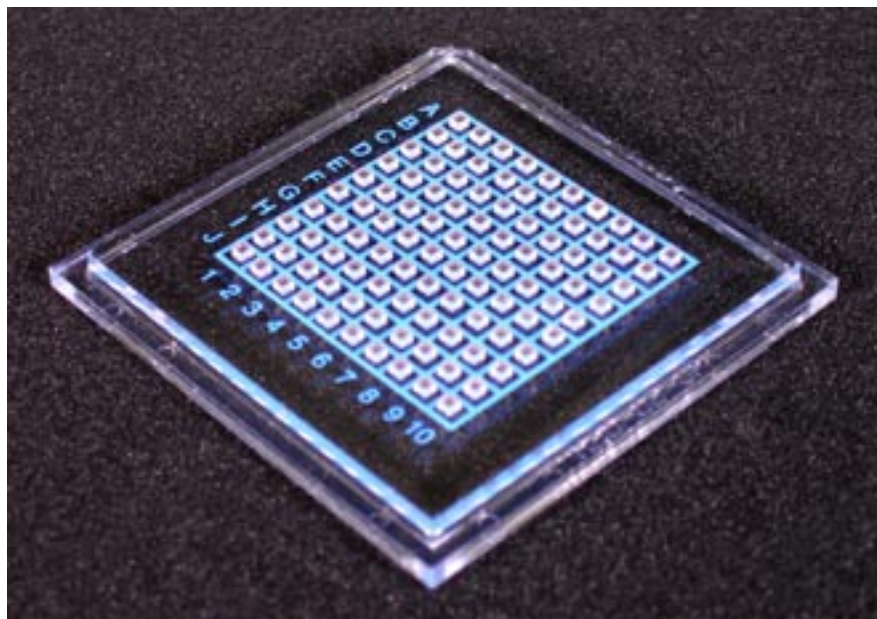


写真 1 フィルタチップの外観写真

## 1 まえがき

---

波長多重通信方式 (Wavelength Division Multiplexing : WDM) による光通信では、高密度かつ広帯域にわたる複数の波長の異なる光信号を多重化して、大容量化および高速化がはかられています。

そこでは、これら多重化された光信号を長波長側と短波長側に分離 (片方は透過帯域、他方は反射帯域) するためのフィルタが必要となります。これらの光信号は高密度かつ広帯域で多重化されているため、透過帯域と反射帯域の急峻な切り分け、広い波長帯域での低挿入損失および低波長依存性をもつ高性能フィルタが求められています。

また、減衰した複数の光信号を一括増幅するために、エルビウム添加ファイバ増幅器が用いられます。この利得波長特性は平坦でないため、利得を平坦化するために、この利得波長特性と相反する損失波長特性をもつ利得等化フィルタが必要となります。

今回、誘電体多層膜による高性能エッジフィルタおよび利得等化フィルタを開発しましたので紹介します。

## 2 高精度透過率制御法の必要性

---

当社では、これまで培ってきたイオンビームスパッタリング成膜法により、さまざまな多層膜光学素子を開発してきました。その一環として、より高精度に多層膜の膜厚制御を行うために、直接サンプル基板の光学特性をモニターし膜厚制御を行う直視型光学式膜厚計の開発を行ってきました。

図1に成膜装置の模式図を示します。イオン源から放射された高速のイオンビームがターゲット物質をスパッタし、そのターゲット粒子が基板に付着して膜が形成されていきます。このとき、チャンバー内にモニター光を入射させて、基板上的膜の透過率変化を計測することによって、高精度な膜厚制御を行います。

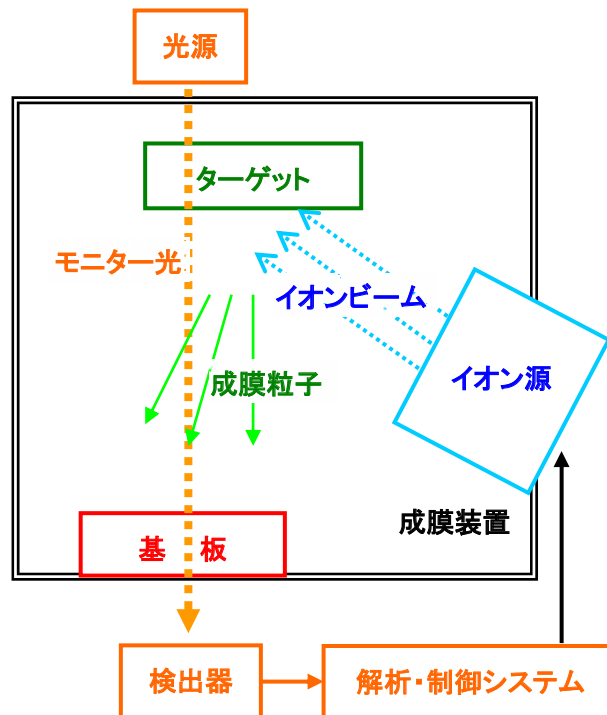


図1 イオンビームスパッタ装置と光学式膜厚計

昨年度までに開発を行ってきたバンドパスフィルタは、膜構造が周期的な構造をしています。光学式膜厚計のある波長でモニターすると、図2のような透過率変化を示し、各層の膜厚切替ポイントが極値になります。極値では透過率変化量が微小なため、高い精度で極値を検出して膜厚制御を行う極値制御法を開発してきました。この手法により、急峻な切り分けをもつ各種バンドパスフィルタの開発・製品化を行ってきました。<sup>1)</sup>

これとは対照に、エッジフィルタおよび利得等化フィルタの場合は、膜構造が周期的ではありません。このため、各層の膜厚切替ポイントは極値ではなく、図3のように任意の透過率になります。よって、ある波長でモニターしたときの透過率の絶対値で膜厚制御を行う高精度透過率制御法が必要となります。

バンドパスフィルタとエッジフィルタおよび利得等化フィルタを比較すると、表1のようになります。透過率制御の場合、極値制御の場合とは対照に成膜中の膜厚誤差の自動補正<sup>2)</sup>は働かないため、誤差が累積しやすく、誤差に対して敏感であるという特徴があります。

表1 バンドパスフィルタ と エッジフィルタおよび利得等化フィルタの比較

フィルタ	構造	光学式膜厚計	誤差自動補正
バンドパスフィルタ	周期構造	極値制御	○
エッジフィルタ 利得等化フィルタ	非周期構造	透過率制御	×

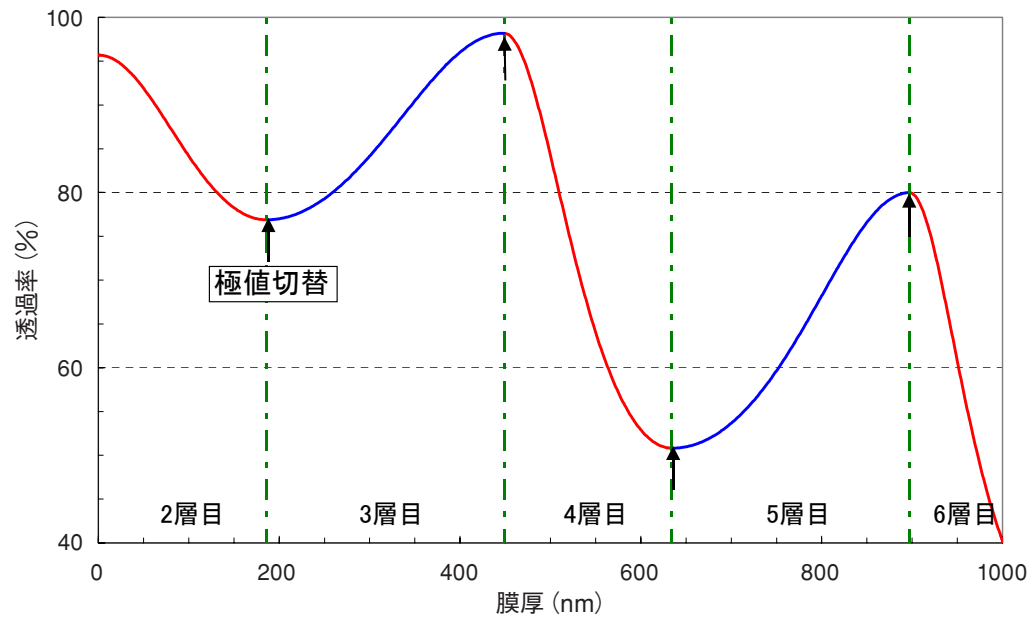


図 2 光学式膜厚計による透過率変化：バンドパスフィルタ

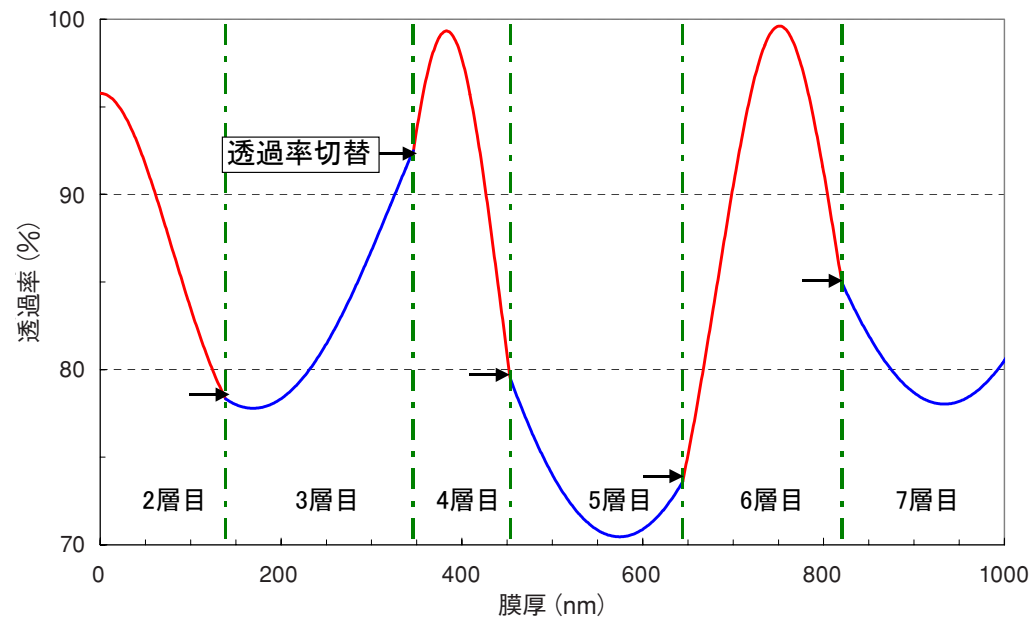


図 3 光学式膜厚計による透過率変化：エッジフィルタ

### 3 要素技術開発

この高精度透過率制御法を実現するために、図4のように、膜設計、光学式膜厚計、膜厚制御法における各要素の技術開発を行いました。そこでは、いかに精度を向上させ誤差を抑制できるか、いかに誤差に対して強くできるか、いかに発生した誤差を補正できるかが重要となります。

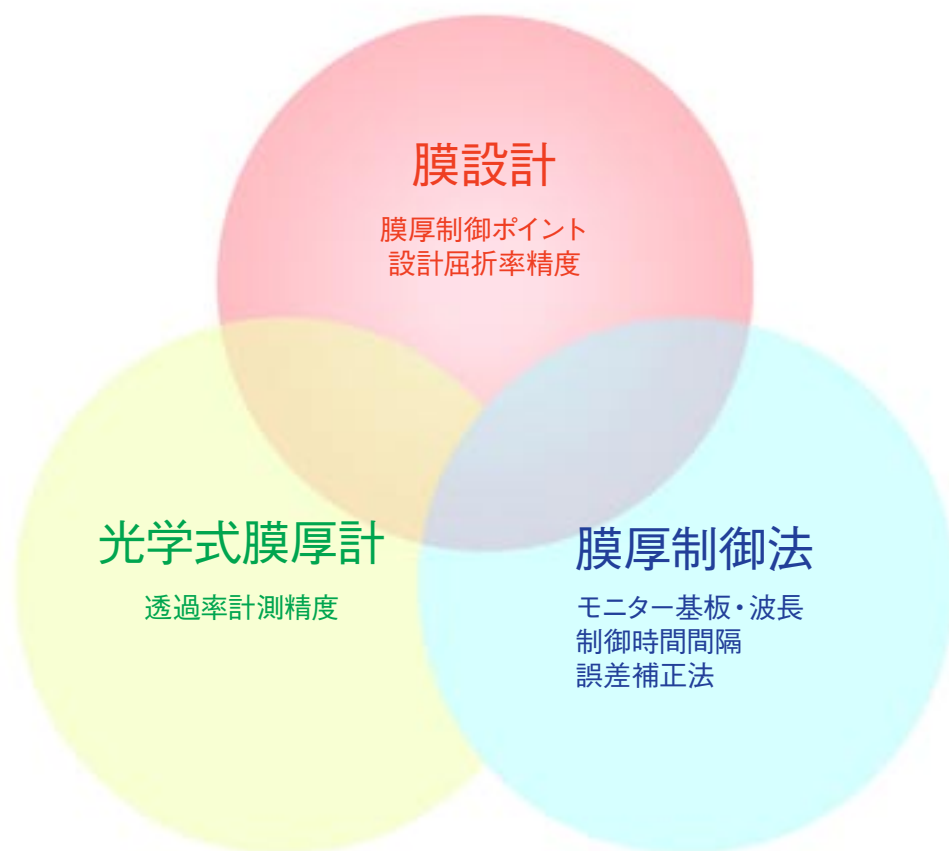


図4 要素技術の図解

#### 3.1 膜設計

誤差の自動補正が働かないこの透過率制御では、膜厚に対する透過率変化量の大きいポイントで膜厚制御が行えるように、各層の膜厚およびモニター波長を最適化し、誤差に強い膜設計を行いました。

また、極値制御の場合に比べ、膜物質のより高い設計屈折率精度が要求されます。そこで、成膜時に実際に計測を行っている光学式膜厚計での計測値をもとに解析を行い、有効数字4～5桁の高い精度の屈折率を用いて膜設計を行いました。

### 3.2 光学式膜厚計

極値制御の場合は、透過率の極値で膜厚制御を行えばよく、透過率の絶対値計測精度はあまり重要ではありません。

それに比べ、透過率制御の場合には、透過率の絶対値、S/N、長期安定性などの透過率計測精度が要求されます。光学式膜厚計の光学系を最適化することにより、S/N 比を 40dB 以上に改善し、光学式膜厚計の透過率計測精度を向上することができました。

### 3.3 膜厚制御法

光学式膜厚計でモニターする基板の種類によって、成膜中に透過率スペクトルの劣化が見られることがあります。そのため、モニター基板の選定および透過率モニター波長の最適化を行って、誤差の抑制をはかりました。

次に、制御時間間隔による光学特性のシミュレーションを行いました。図 5 に示すように、制御時間等倍よりも制御時間を 10 倍に速めたほうが、明らかに設計光学特性とのずれが小さくなるのがわかります。制御系を改善し制御時間間隔を短くし、より正確に膜厚制御を行うことによって誤差の抑制をはかりました。

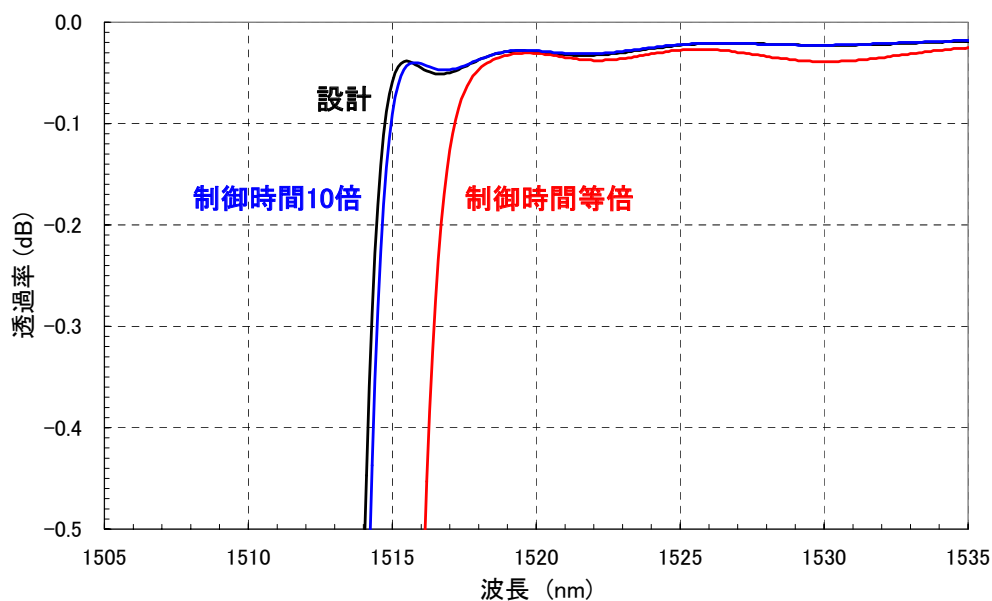


図 5 制御時間間隔による光学特性のシミュレーション

### 3.4 誤差補正法

しかし、いくら制御時間間隔を短くしてより正確に膜厚制御を行おうとしても限界があり、膜厚の誤差がかならず生じます。また、設計屈折率精度および透過率計測精度から生じる誤差などもあります。そのため、これらの誤差を補正する方法を開発しました。

成膜中に発生する誤差は、途中経過での設計光学特性とのずれという形でリアルタイムに現れてきます。成膜中に光学特性を計測し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<sup>3)</sup>があり、実用に至っています。

しかし今回、各層の実測値と計測値との透過率差  $\Delta T_p$  に注目して、比較的容易に誤差を補正する方法を開発しました。

図6に、積層により透過率差  $\Delta T_p$  がどのように変化していくかのシミュレーションを示します。より設計通りに積層されれば、透過率差  $\Delta T_p$  はより0に近く推移していきます。何も誤差補正を行わずに設計値のまま膜厚制御を行うと、積層するごとに透過率差  $\Delta T_p$  が累積されて大きくなっていき、設計とのずれが大きくなっていくことがわかります。この透過率差  $\Delta T_p$  に対して、リアルタイムに誤差補正を行うと、透過率差  $\Delta T_p$  はほぼ0近くを推移していき、より設計通りに膜厚制御されていることがわかります。

この誤差  $\Delta T_p$  の傾向および誤差補正法は、膜構造、モニター波長、成膜レートなどによって異なるため、シミュレーションを行い、それぞれに適した誤差補正法を行う必要があります。

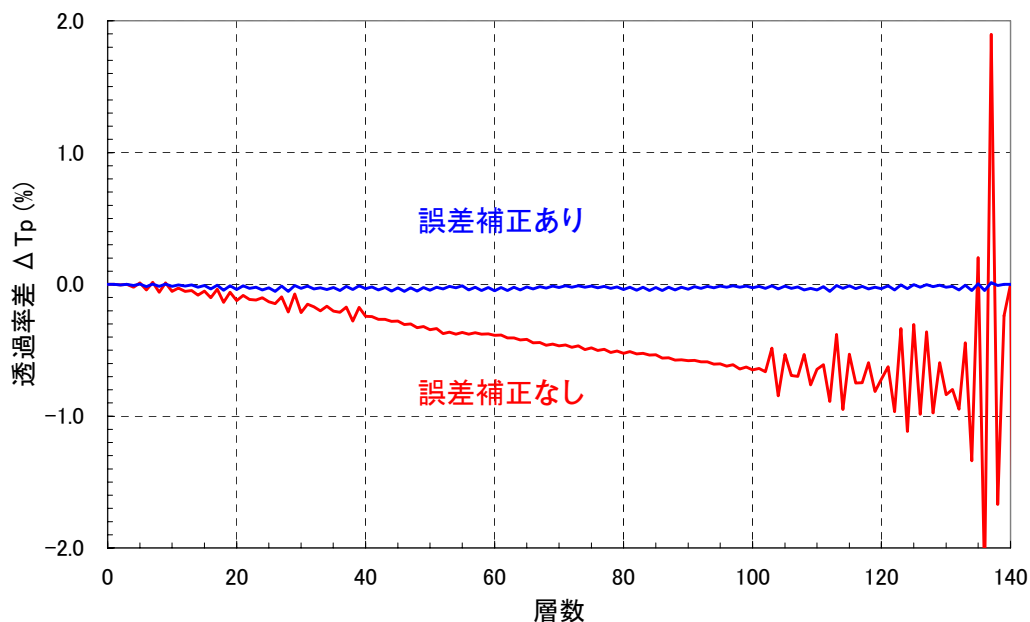


図6 積層による透過率差  $\Delta T_p$  のシミュレーション



## 4 高性能エッジフィルタ

エッジフィルタは、短波長側と長波長側を切り分ける用途に使用されます。短波長側を透過し長波長側を反射するのが SWPF (Short Wavelength Pass Filter)、短波長側を反射し長波長側を透過するのが LWP (Long Wavelength Pass Filter) となります。エッジフィルタは、帯域の切り分けがより急峻で透過帯域幅がより広いほど、作製の難易度が高く、性能の高いフィルタになります。

図7に、今回開発した高精度透過率制御法により作製した高性能エッジフィルタ、SWPFとLWPの光学特性を示します。波長間隔 2.7nm (透過率 25dB と 0.3dB 間) の急峻な切り分けと 250nm 以上の広い透過帯域幅を実現することができました。また、透過帯域での挿入損失および波長依存性も小さく、設計通りの高性能エッジフィルタができました。

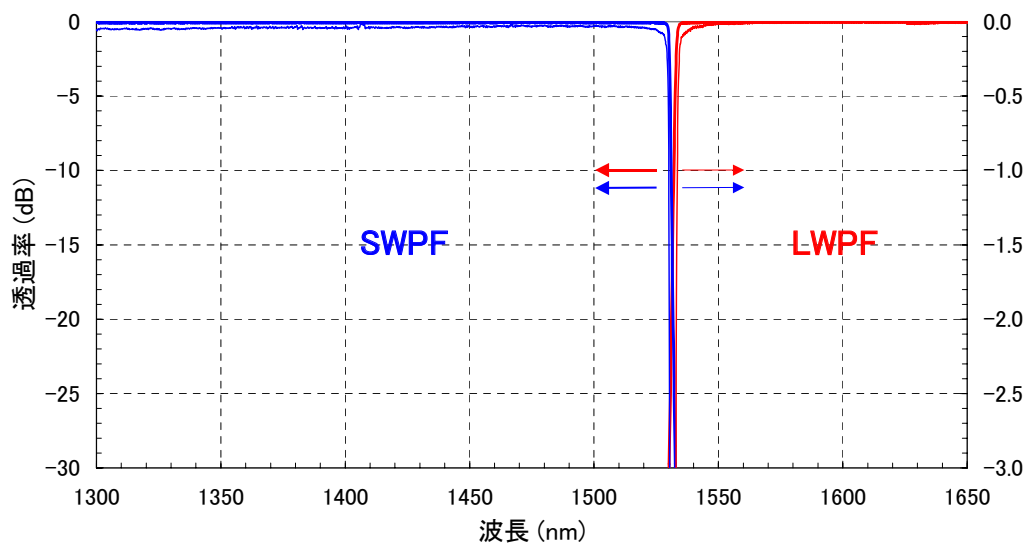


図7 高性能エッジフィルタの光学特性



## 5 利得等化フィルタ

利得等化フィルタは、光増幅器の利得波長特性と相反する損失波長特性をもつフィルタで、図8の目標波形のような光学特性が要求されます。実測値と目標波形との透過率差を示す値として、損失偏差が定義されています。波長に対する透過率変化が急峻なほど難易度の高いフィルタとなり、損失偏差が小さいほど優れたフィルタとなります。

図8に、今回作製した利得等化フィルタの光学特性および損失偏差を示します。1532nmから1538nm間の急峻な透過率変化をもつ難易度の高い目標波形に対し、損失偏差±0.3dB未満で挿入損失0.1dB未満の利得等化フィルタが実現できました。写真1にフィルタチップの外観を示します。

高精度透過率制御法により、波長帯域を切り分けるフィルタのみならず、任意の光学特性をもつフィルタの作製が可能になりました。

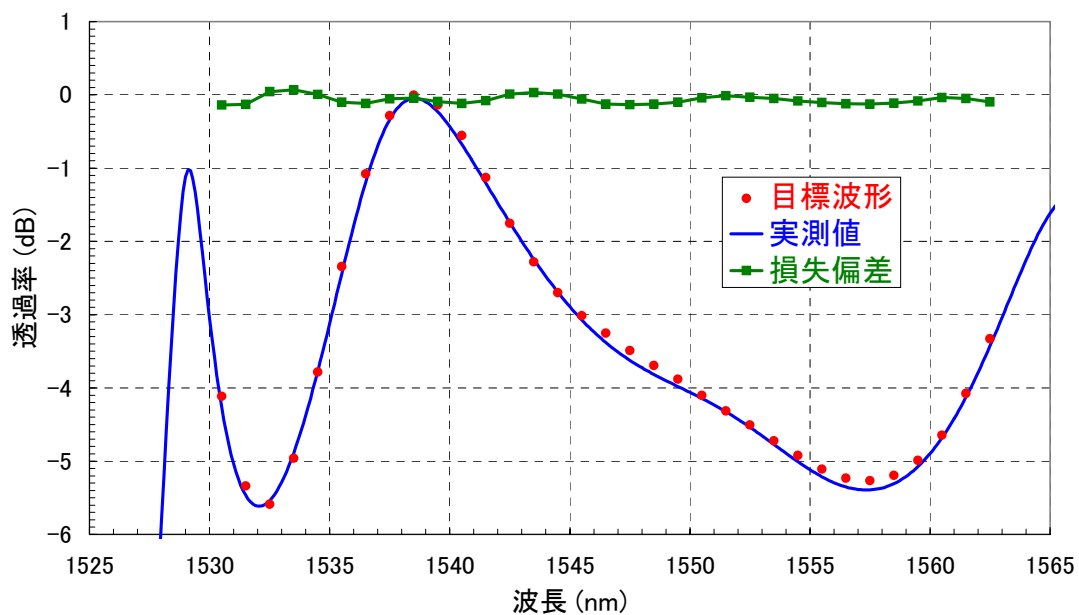


図8 利得等化フィルタの光学特性

## 6 むすび

膜設計、光学式膜厚計、膜厚制御法の各要素技術において、誤差を抑制する、誤差に強くする、誤差を補正することにより、高精度透過率制御法を開発し、実際のフィルタ成膜に適用しました。

これにより、波長間隔 2.7nm（透過率 25dB と 0.3dB 間）の急峻な切り分けおよび 250nm 以上の広い透過帯域をもつ高性能エッジフィルタと、損失偏差± 0.3dB 未満で挿入損失 0.1dB 未満の優れた利得等化フィルタが実現できました。

今回開発した高精度透過率制御法の精度をさらに上げることにより、より急峻なエッジフィルタ、より損失偏差の小さい目標波形通りの利得等化フィルタなどの作製が可能となります。

### [参考文献]

- 1) 伊藤和彦 ほか：“高性能光学多層膜の光通信分野への応用,” 航空電子技報, No.24,p36 (2001)
- 2) H. A. Macleod, E.Pelletier: “Error compensation mechanisms in some thin-film monitoring systems,” OPTICA ACTA, vol.24, No.9, pp.907-930 (1997)
- 3) B. T. Sullivan, J. A. Dobrowolski et al. : “Manufacture of complex optical multilayer filters using an automated deposition system,” ISSP '97, p.589 (1997)