

狭帯域透過フィルタチップの開発

Development of Narrow-Bandpass Filter Chip

水野 一 庸*

Kazuyou Mizuno

飯田 義隆*

Yoshitaka Iida

味村 裕*

You Mimura

阿部 拓行*

Hiroyuki Abe

西 泰宏*

Yasuhiro Nishi

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 System, WDM System）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波長合分波器（Wavelength Division Multiplexer, WDM）に求められる要求特性のひとつに，信号光と隣接信号光との抑圧比がある。伝送容量の増大により信号波長間隔が狭くなる一方で従来の抑圧比を維持するために，WDMに使用される誘電体多層膜からなる狭帯域透過フィルタ（Narrow-Bandpass Filter, NBPFF）にはMulti Cavity化され150層以上に多層化された膜構造が要求される。我々は，このような狭帯域透過フィルタを作製するために，成膜方式や膜厚制御方式を十分に最適化し，市場の要求する狭帯域透過フィルタチップの作製を可能とした。本報告では，最適化した内容を解説するとともに狭帯域透過フィルタチップ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 System, WDM System）に対する期待は，ますます高まる一方でである。本方式を支えるキーデバイスの一つに，波長合分波器（Wavelength Division Multiplexer, WDM）がある。これは，異なる波長の信号光を多重化，あるいは，多重化された信号光を波長ごとに分波する機能を有している。また，それに類するキーデバイスとしては，決められた波長の信号のみを選択的に取り出し，また，他の波長の信号に影響を与えことなく多重化させるOADM（Optical Add/Drop Module）がある。これらの波長選択デバイスは，通信ネットワークを構築するうえで必須のものであり，今後，都市間を中心とするMetro RingやAccess系を構築する際には更に重要になると予想される。

ところで，WDMやOADM等の波長選択デバイスへの要求特性には，選択波長帯の損失が小さいこととともに，他の信号波長帯との透過率比，すなわち，抑圧比が大きいことが重要となる。抑圧比が小さい場合，選択する信号光以外の信号光はノイズとなり漏話等の伝送品質を劣化させる原因となる。WDMの作製技術のひとつに，非球面レンズあるいはGRINレンズ等を用いた平行ビーム光学系に誘電体多層膜フィルタを配置する

微小光学素子技術を用いる方法がある。ここで使用される誘電体多層膜フィルタは，目的とする信号光波長帯域に透過帯域を有し，その他の波長帯域は遮断帯となる狭帯域透過型フィルタである。伝送容量の増大により信号波長間隔が狭くなる一方で従来の抑圧比を維持するために，WDMに使用される狭帯域透過フィルタにはMulti Cavity化され150層以上に多層化された膜構造が要求される。

今回，我々は，このような狭帯域透過フィルタに対する要求に対応するために，成膜方式や膜厚制御方式を十分に最適化し，市場の要求する狭帯域透過フィルタチップの作製を可能とした。本報告では，最適化した内容を解説するとともに，100 GHzと50 GHz間隔のWDMに対応する狭帯域透過フィルタチップの試作結果についても述べる。

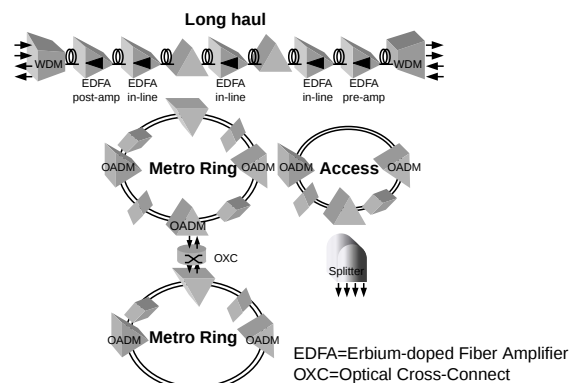


図1 光通信ネットワークの概要
Configuration of optical telecommunication network architecture

* ファイテルフォトンクス研究所 WP チーム 光機能部品グループ

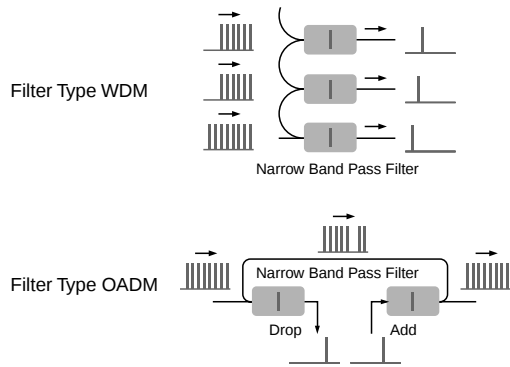


図2 WDM及びOADMの構成例
Configurations of typical WDM and OADM

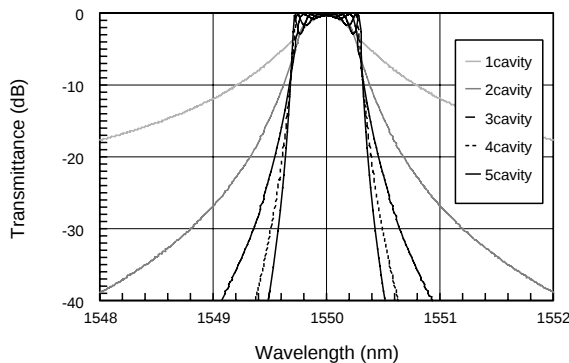


図3 Cavityの重ね合せの効果
Effect of multi cavity structure

2. 光通信ネットワークにおけるWDMとOADM

光通信ネットワークの一例を図1に示す。海底等を含む Long Haulと呼ばれる長距離網，都市間を中心とする Metro Ring，更に加入者網となる Access 系により構成されている。これらのネットワークを構成するキーテクノロジーとして，EDFA（Erbium Doped Fiber Amplifier）やOXC（Optical Cross Connect）とともにWDMやOADMのような波長選択デバイスも重要な位置をしめる。

ところで，WDMやOADM等の波長選択デバイスを微小光学素子技術で作製する場合の構成例を図2に示す。波長選択性を有する部品として狭帯域透過フィルタが使用されており，透過波長帯域の信号光だけが透過し，その他の信号光は反射される特性を利用した構成となっている。

3. 狭帯域透過フィルタ作製のための要素技術開発

これまで述べてきたように，波長選択デバイスで使用される狭帯域透過フィルタには隣接する波長との抑圧比が大きいことが要求されるが，それとともに透過波長帯域の損失も小さいことが要求される。これらの要求特性を満足するためには，Multi Cavity化された150層以上に多層化された膜構造の設計，それを精密に成膜するための成膜技術，膜厚制御技術が重要となる。特に膜厚制御技術では，今回新たに開発を行った透過率ピーク予測制御について重点的に述べる。

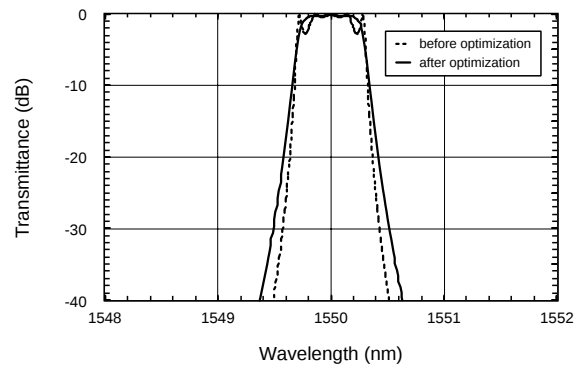


図4 構造の最適化によるリップルの低減例
Sample characteristics of optimized multi cavity structure

3.1 狭帯域透過フィルタの膜構造設計

狭帯域透過フィルタは，透過中心波長を λ_0 とした場合，光学膜厚が $1/4\lambda_0$ である異なる屈折率を有する二種類の膜から構成される。低屈折率側の膜を L ，高屈折率側の膜を H と表記した場合，最も簡単な狭帯域透過フィルタの一例を式（1）に示す。

$$Sub/(HL)^n \cdot H \cdot 2mL \cdot H \cdot (LH)^n / Air \quad (1)$$

ここで， Sub は基板を表し， Air は膜の最外層の媒質である空気を示す。 $2L$ の整数倍 m からなるCavity層を， L と H の n 回の繰り返し交互層からなるMirror層から構成されている。式（1）の構成をSingle Cavityと言い，単にCavityとも言う。しかしながら，WDMに使用する場合，広い透過帯域幅と急峻な遮断特性が要求されるため，式（1）の構成を多段にした式（2）に示すようなMulti Cavity構造とする必要がある。

$$Sub/[(HL)^n \cdot H \cdot 2mL \cdot H \cdot (LH)^n \cdot L]^k / Air \quad (2)$$

図3にCavityの重ね合せの効果について示す。重ねるごとに透過帯域幅が広がり，遮断特性も向上することが分かる。

しかしながら，単純な重ね合せた構造の場合，図3に示すように透過帯域にリップルが生じる。リップルのない特性にする場合には，各CavityのMirror層の繰り返し数，及びCavity層厚みを最適化する必要がある。図3に示した5-Cavity構造の最適化後の特性例を図4に示す。

通信システムにより求められるWDMの特性が異なるため，上記の膜構成がすべての仕様を満足することはできない。また，構成する膜の屈折率に対しても膜構成を変更することが要求される場合がある。我々は，これらの状況に対応するために，仕様に合わせた膜構成を最適化して求める設計支援ツールを作成した。

3.2 成膜方式

一般に通信用光部品には光学特性並びに機械的特性において耐環境性に優れていることが求められ，その部品である誘電体多層膜フィルタにも同様の耐環境性が求められることは言うまでもない。耐環境性を劣化させる要因の一つに膜の充填率がある。充填率が低い場合には，空隙に水分が入り込み膜の屈折率変化により光学特性が変化してしまう現象が生じることとな

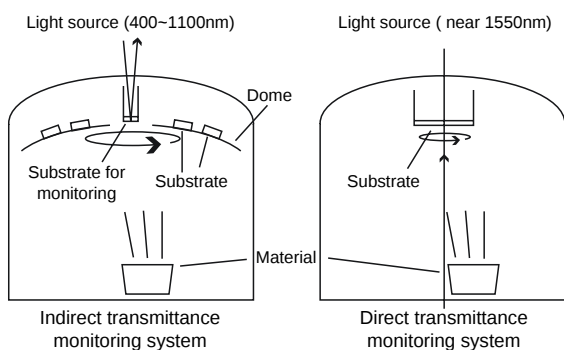


図5 間接型と直視型光学膜厚モニタ方式
Schematic of the indirect and direct optical thickness monitor methods

る。また、屈折率及び吸収係数などの光学定数や散乱要因となる膜界面の粗さ等も最適化する必要がある。成膜装置には、以上の特性を満足する膜を長時間にわたり安定して成膜することが求められる。

現在、誘電体を成膜するために様々な方式が実用化されているが、今回、我々は、イオンプロセスと真空蒸着法を併用したイオンアシスト法 (Ion-beam Assisted Deposition, IAD) を採用した。本方式は、電子ビームによる蒸発源とイオン銃によるイオン生成部を独立に制御可能な成膜方式である。成膜条件については、耐環境性を満足するとともに吸収係数及び散乱要因となる表面粗さに対しても最適化を行った。

3.3 膜厚制御技術

100 GHz 間隔で信号光を多重化するシステムで使用される WDM 用狭帯域透過フィルタの膜構成は 4-cavity から 5-cavity に Multi Cavity 化された膜構造が必要とされ、膜層数は、150 層以上となる。このような膜構造を成膜する際に求められる膜厚制御誤差を算出すると、 $\pm 0.0015\%$ のランダムな誤差が生じただけでも透過帯の損失が大きくなり、仕様を満足することはできなくなる。膜厚制御技術開発のうえで重要な直視型光学膜厚モニタと透過率ピーク予測制御について述べる。

3.3.1 直視型光学膜厚モニタ

従来、誘電体多層膜フィルタを成膜する際の光学膜厚モニタは、製品となる基板とは異なった位置にあるモニタガラス上に成膜された膜の透過率あるいは反射率変化から成膜停止のタイミングを判断する、間接型光学膜厚モニタが主流であった。しかしながら、成膜装置には膜物質の飛散分布が存在するため、製品とモニタガラス上に成膜される膜厚が異なり、あらかじめそれぞれの位置による膜厚比を求める必要があった。また、膜厚が薄い場合など、設計中心波長よりも小さい波長で制御することもあり、屈折率分散も考慮に入れる必要もあった。しかしながら、飛散分布による膜厚比、設計中心波長とモニタ波長との屈折率波長分散等は誤差要因となることが多い。今回、我々は、製品となる基板上に成膜される膜の透過率変化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透過するよう配置した。間接型と直視型光学膜厚モニタの概念図を図5に示す。

3.3.2 透過率ピーク予測制御

ところで、狭帯域透過フィルタを作製する場合の膜厚制御方法として、成膜中の膜の透過率を透過中心波長の光によりモニ

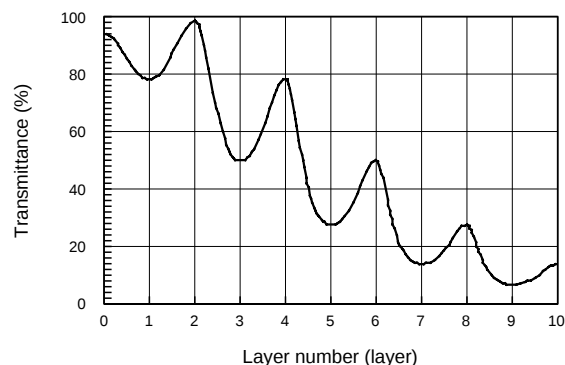


図6 透過中心波長における透過率変化の例
Sample of transmittance curve at the center wavelength

タし、 $1/4\lambda_0$ の光学膜厚ごとに現れる透過率変化のピークで成膜を停止する方法が提案されており、本方法によれば、前層で発生した膜厚誤差を自動補正する効果があるとされている¹⁾。図6に、成膜中の膜の透過中心波長における透過率変化の例を示す。 $1/4\lambda_0$ ごとに透過率のピークが現れているのが分かる。我々の試算でも、本方法によれば膜厚許容誤差は、先程述べた $\pm 0.0015\%$ から $\pm 0.2\%$ にまで許容されることが確認された。しかしながら、ピークでは透過率変化が少ないことから誤差を生じやすい。また、ピークは通過してからピークと判断できることから、真のピークを判断することは非常に困難である。そこで、我々は、透過率がピークとなる時間を誘電体多層膜フィルタの光学特性を記述する際に使用される理論式に基づいて予測する、透過率ピーク予測制御方法を開発した。

誘電体多層膜フィルタの光学特性は、下記に示す特性行列で記述される²⁾。膜界面に対して光が垂直に入射した場合、誘電体多層膜中の第 j 層目の特性行列 M_j は式 (3) の特性行列により記述される。ここで、 d_j と n_j はそれぞれ物理膜厚及び複素屈折率を表し、 λ は入射光の波長である。

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos g_j & in_j^{-1} \sin g_j \\ in_j \sin g_j & \cos g_j \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$g = \frac{2\pi n_j d_j}{\lambda}$$

N 層からなる誘電体多層膜フィルタの特性行列 M は、式 (4) に示すように各層の特性行列の総積で記述することができる。

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^N M_j \quad (4)$$

上記の行列要素 m_{11} , m_{12} , m_{21} , m_{22} を用いて透過率は式 (5) のように記述することができる。

$$T = \tau \tau^* \frac{n_0}{n_s} \quad (5)$$

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

ここで、 n_0 は膜表面に存在する媒質の屈折率、 n_s は基板の屈折率を表す。

以上から成膜中の誘電体多層膜フィルタの透過率変化を表す理論式が導出できる。既に成膜が終わっている層全体を1つの

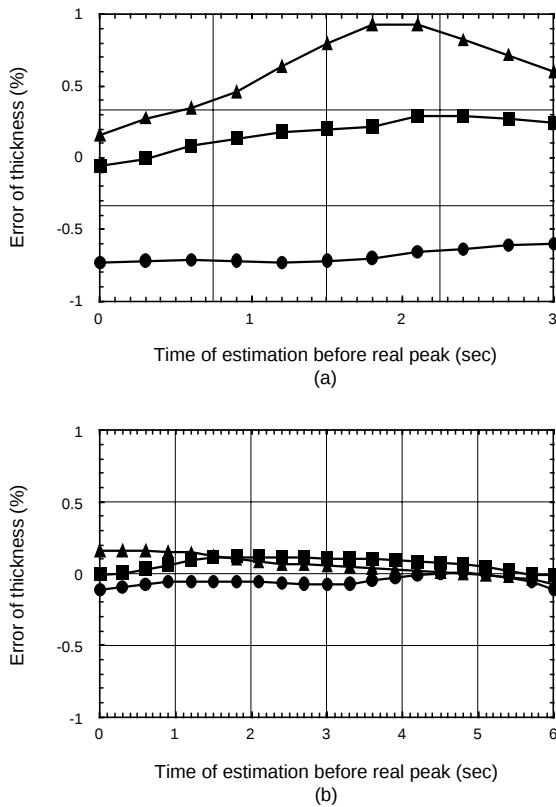


図 7 透過率ピーク予測制御による誤差の比較例
Comparison between two estimation methods for the peak in transmittance curve
(a) case of using quadratic function
(b) case of our method

特性行列で表し、その各要素を定数とし、成膜速度と屈折率が一定であると仮定すると、物理膜厚は成膜時間に比例するため、成膜中の透過率変化を時間の関数として取り扱うことが可能となる。更に、上記の理論式から成膜中の特性行列の各要素を非線形フィッティングを用いて求めることにより、透過率がピークとなる時間を予測することが可能となった。

つぎに、我々の開発したピーク予測制御の性能について評価を行った。評価は、 $1/2\lambda_0$ の光学膜厚を成膜した際に得られるピークが判別できる透過率変化の3種類の実データを使用して行い、実際の成膜時と同様に、ピークを迎える前のデータから読み込みを行い、極値となる時間を算出し、真の極値との差を予測誤差とする方法とした。また、比較のために二次関数を理論式として利用する方法も行った。評価の結果を図7に示す。図中の横軸における原点は、真のピークの時間としている。二次関数を理論式として予測を行った場合、ピークの予測誤差にばらつきが見られた。これは、局所的な透過率変化のうねり等に左右されることによるものと考えられる。一方で、我々の理論式の場合の予測誤差は、いずれの場合にも、膜厚制御の許容誤差 $\pm 0.2\%$ であり、しかも、6秒前から、予測の変動は少なく、安定した予測ができていることが分かる。

つぎに、直視型光学膜厚モニタ方式を採用し、その際に得られる透過率変化のピークを我々の開発したピーク予測制御方式に基づいて成膜停止時間を予測することにより狭帯域透過フィルタの試作を行った。

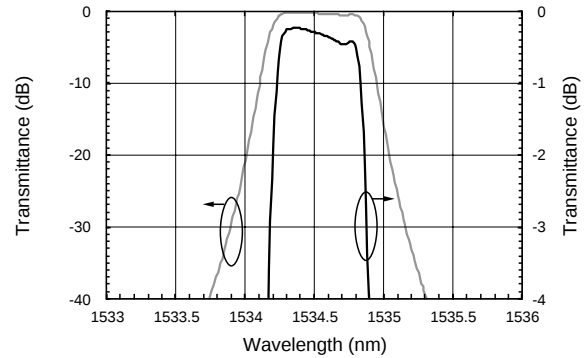


図 8 100 GHz用狭帯域透過フィルタの試作結果
Sample characteristics of narrow-bandpass filter for 100 GHz spacing WDM system

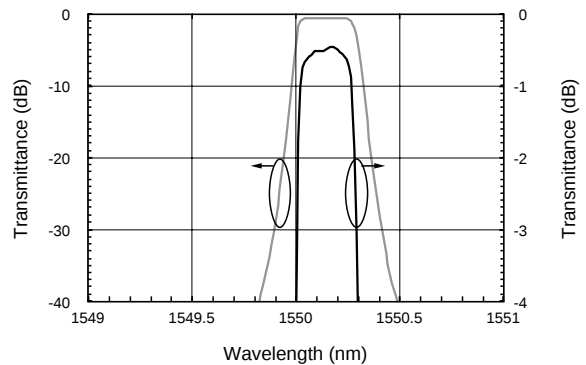


図 9 50 GHz用狭帯域透過フィルタの試作結果
Sample characteristics of narrow-bandpass filter for 50 GHz spacing WDM system

4. 試作

4.1 透過特性

試作した狭帯域フィルタの透過特性を図8と図9に示す。図8と、図9は各々、100 GHzと50 GHz間隔に波長多重されるシステムで使用される仕様に対応する膜設計としており、図8は5-cavity膜層数152層、図9は5-cavity膜層数173層である。それぞれの詳細な特性については表1にまとめた。透過帯域幅(中心波長(λ_0) ± 0.11 nm)における最大損失は、100-GHz NBPFの場合0.225 dB、50-GHz NBPFの場合0.462 dBといずれも良好な結果が得られた。透過帯域幅の目安となる、透過率のピークから0.5 dB下がった位置での幅は、100-GHz NBPFでは0.581 nm、50 GHzでは0.241 nmと十分に広い結果が得られた。リップルに関しても、0.3 dB以下であった。また、遮断特性に関しても隣接波長に対して充分な抑圧比が得られている。

4.2 分散特性

信号の多重化とともに伝送速度の高速化が進んだ場合、伝送品質に影響がある特性として群速度分散がある。試作を行った100-GHz NBPFの分散特性を図10に示す。透過中心波長帯域において ± 20 ps/nm以下の特性が得られた。分散特性の大きさは、透過帯域幅に依存し、分散を小さくするためには透過帯域幅を十分に広くする必要があり、今後は、損失特性だけではなく分散特性も考慮した膜構造の最適化を行う必要がある。

表1 100-GHz NBPF と 50-GHz NBPF の透過特性
Sample characteristics of narrow-bandpass filter for 100-GHz NBPF and 50-GHz NBPF

Item	100-GHz NBPF	50-GHz NBPF
Peak Loss	0.225 dB	0.462 dB
Pass Band Loss ($\lambda_c \pm 0.11$ nm)	0.380 dB	0.734 dB
Pass Band Ripple ($\lambda_c \pm 0.11$ nm)	0.148 dB	0.272 dB
Pass Band Width (@0.5 dB)	0.581 nm	0.241 nm
Pass Band Width (@25 dB)	1.146 nm	0.472 nm
Pass Band Width (@30 dB)	1.270 nm	0.524 nm

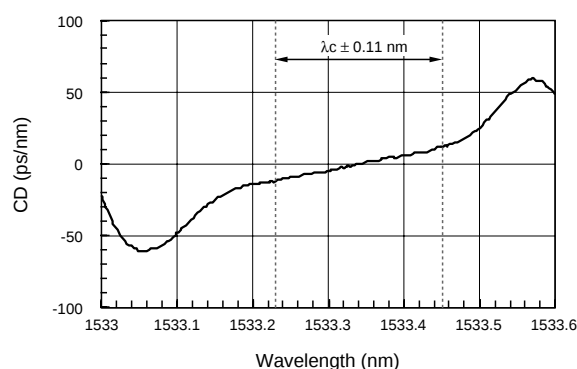


図10 100-GHz NBPF の分散特性
Chromatic dispersion of narrow-bandpass filter for 100-GHz NBPF

表2 信頼性試験結果
Results of reliability 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	σ	平均	σ
高温高湿試験	85 /85%RH, 14 days (Telcordia: GR1209)	0.035	0.024	0.006	0.003
温度サイクル試験	- 40 ~ 75 , 42 cycles	0.030	0.010	0.004	0.003

4.3 中心波長温度依存性

狭帯域透過フィルタの透過中心波長の温度特性は、基板となる硝材の熱膨張係数に依存するところが大きい³⁾。今回の試作で使用した基板材料の場合、中心波長の温度依存性は1.5 pm/Kであった。今後、本成膜プロセスに適した硝材の検討を行うことにより、更なる低減を進める予定である。

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、湿熱試験、温度サイクル試験を実施した。表2に信頼性試験の結果を示す。いずれの試験においても波長方向の変動及び透過率変動は測定誤差以内であり、十分な信頼性が得られていることが確認された。

6. おわりに

WDMやOADM等の波長選択デバイスに使用される狭帯域透過フィルタの開発を行い、膜設計、成膜装置、膜厚制御を最適化することによりその作製を可能とした。特に、透過率ピーク予測制御はピーク以外に対しても有効であり、光利得等化器用フィルタをはじめとする種々の誘電体多層膜フィルタの成膜に対しても、その有用性が発揮されと考えられる。

参考文献

- 1) R.Riehler, A.Fornier and E.Pelletier "Optical Monitoring of Thin-Film Thickness" edited by F.R.Flory, Thin Films for Optical Systems ,ibid. 57-90(1995).
- 2) 石黒, 池田他, 光学薄膜, 共立出版
- 3) H. Takahashi: Temperature stability of thin-film narrow-bandpass filters produced by ion-assisted deposition, Applied Optics, 34 (1995).