

## 高密度波長多重通信用波長選択フィルター

日比野 善典

インターネットの爆発的な普及に対処するため、高密度波長多重 (DWDM) システムを用いた通信回線の大容量化が米国を中心として急速に進められている<sup>1)</sup>。DWDM システムの導入は、point-to-point の幹線系から開始され、リングネットワークの市内網等へと拡大している。DWDM システムでは、通常 100 GHz あるいは 200 GHz 間隔の波長を数波から数十波合分波し、光ファイバーを伝搬させる。そのためには、レーザーダイオード (LD) やフォトダイオード (PD) 等の従来の光部品以外に、異なる波長の光信号を 1 本のファイバーに合波または分波する波長フィルター、特定波長の光信号を取出したり加えたりするアドドロップデバイス (ADM) 等の新しいフィルターが必要不可欠となった。この DWDM 用フィルターのスペクトル形状の一例を図 1 に示す。DWDM システムでは、国際電気通信連合 (ITU) の定めた周波数グリッドに合わせて各チャンネルが隣接して設定されるので、フィルターには狭帯域および高波長精度が要求される。また、システムを構築する上で、低損失、チャンネル間損失の高い均一性、広いバンド幅、高い波長分離 (クロストーク) 特性、低偏波依存性、高温度安定性等が望まれる。

これらの要求を満たすために、各種 DWDM 用フィルターが精力的に開発されている。代表的な DWDM 用フィルターとしては、干渉膜フィルターを用いたバルク型、ファイバークレーティングを用いたファイバー型、石英系ガラス導波路で構成される平面光波回路 (PLC) 型の 3 種類がある。ここでは、これら 3 種類の DWDM 用フィルターについて概説する。

### 1. 誘電体多層干渉膜フィルター

理論、作製技術とも古い歴史がある誘電体多層膜フィルターを用いて、近年 DWDM 用に  $1.55 \mu\text{m}$  帯の狭帯域なフィルターが作製されるようになった<sup>2)</sup>。DWDM 用に用いられる薄膜フィルターは、一般的な Fabry-Perot (F-P) 型干渉構造 (エタロン) を基本原理としている。F-P 干渉計は、キャビティーとその両脇のミラーで構成され、バンドパスフィルターとして動作する。DWDM 用には、ITU グリッドの波長を透過し、そのほかの波長を反射するようにする。なお、透過波長はキャビティーの長さで決まる。実際には、狭帯域な DWDM 用干渉型誘電体多層膜フィルターは、誘電体反射層で分離された 2 個以上の F-P キャビティーからなり、各層は多層の誘電体薄膜でそれぞれ形成される。

フィルター自体は、ガラス基板上にマイクロプラズマ法と呼ばれる薄膜堆積方法で 2 種類の緻密な誘電体膜を交互に積層することで作製される。波長の半分の厚さを基本ユニットとし、誘電体膜としては屈折率差の大きい  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  膜の組み合わせ等が用いられる。中心波長の温度依存性は、ガラス基板を適当に選択することで補償することが可能である。

多層キャビティーの DWDM 用フィルターのスペクトルを図 2 に示す。キャビティー数が増えると、パスバンドのトップがフラットかつ両脇がシャープに落ちるようになり、DWDM 用フィルターとして望ましい形状となる。このように、低損失 ( $\sim 0.5 \text{ dB}$ )、広いバンド幅、高いサイドローブ抑圧比 (低クロストーク) が実現可能であることがわかる。

干渉膜フィルターを用いた合分波フィルターの典型的な構造を図 3 に示す<sup>2)</sup>。DWDM システムのチャンネル数に応じた透過波長の異なる干渉膜フィルターが多段に配置さ

NTT フォトニクス研究所 (〒319-1193 茨城県那珂郡東海村白方白根 162)

E-mail: yhibino@iba.iecl.ntt.co.jp

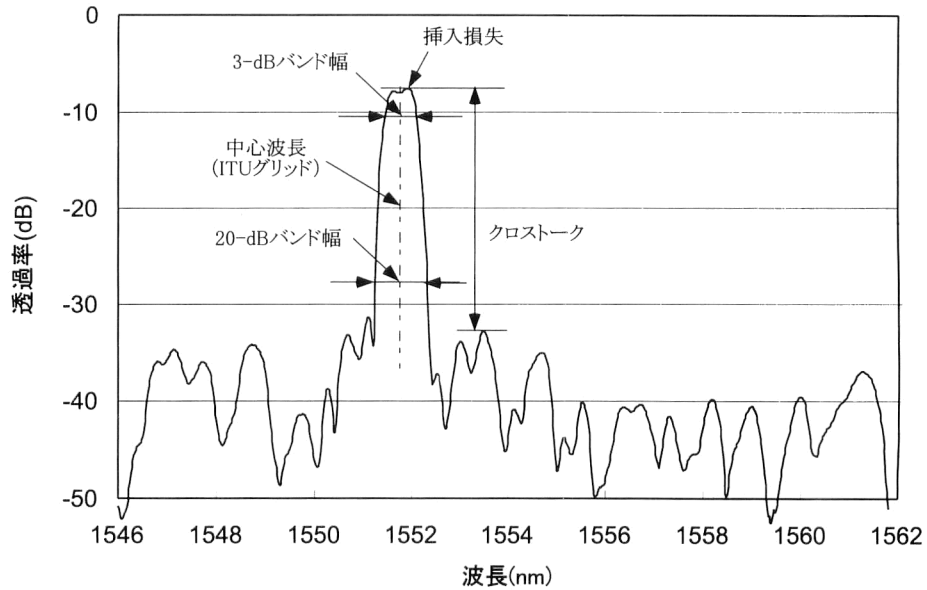


図1 DWDM用フィルターのスペクトルの典型例。

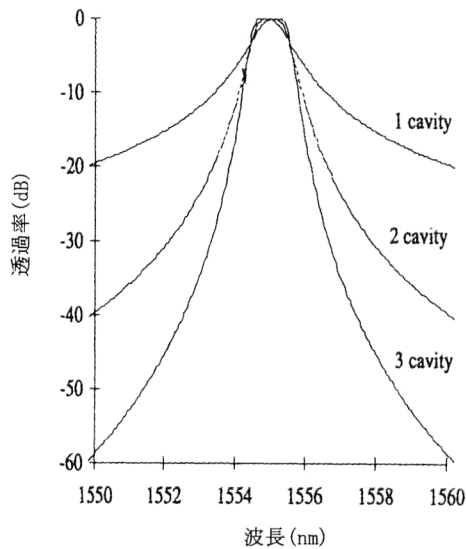


図2 干渉膜フィルターのスペクトル。

れ、その前後に、先端にセルフォックレンズをつけたファイバーを配置し、反射と透過光をそれぞれ受光することで分波する。干渉膜フィルターを用いた合分波フィルターは、低損失、良好なクロストーク、偏波無依存、温度無依存という特性を有しており、DWDM用フィルターとして有用である。しかし、波長間隔が狭くなりチャンネル数が増えると、損失の均一性、組立コストなどが課題となる。

## 2. ファイバークレーティング

GeO<sub>2</sub>を添加した石英系ガラスでは、紫外線照射により屈折率が増加する現象 (photosensitivity) が知られていた。この現象を応用して、コアがGeO<sub>2</sub>添加石英系ガラスからなる通常の光ファイバーに周期的な屈折率変調を誘起し、グレーティングを形成することが可能となった<sup>3)</sup>。ファイバークレーティング (FG) 型デバイスでは、全ファ

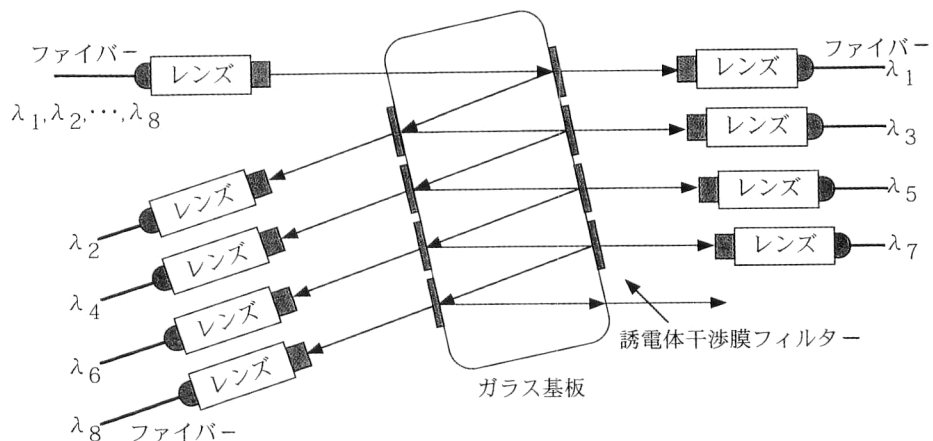


図3 干渉膜フィルターを用いた合分波デバイスの典型的な構造。

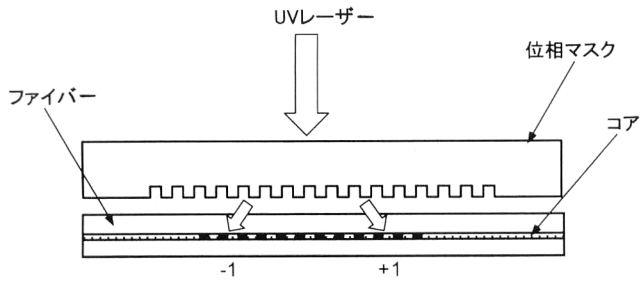


図4 位相マスクを用いたFGの作製法.

ファイバー部品を構成可能であり、低損失、偏波無依存、簡易パッケージなどが可能となる。最も一般的なグレーティングは、周期が波長の約半分程度の Bragg 反射と呼ばれるもので、導波路を伝搬する波長  $\lambda$  の光を、反対方向に進行するモードに結合させる。反射波長は  $\lambda = 2 n_e \Lambda$  で与えられる。ここで、 $n_e$  は光ファイバーの実効屈折率、 $\Lambda$  はグレーティングのピッチである。バンド幅は FG の長さ (通常数 mm~数 cm) あるいは屈折率変化量を調節することにより簡便に調節可能である。

FG の作製法では、屈折率変化を周期的に誘起するため、ファイバー側面からサブ  $\mu\text{m}$  オーダーの周期的な強度分布をもつ UV レーザー光を照射する。周期的な強度分布を形成するには、図4に示すように、位相マスクと KrF エキシマレーザー (248 nm) 等を用いた方法が簡便であり、広く用いられている<sup>4)</sup>。位相マスク法では、位相マスクとファイバーを近接できるので、空間コヒーレンスが悪いエキシマレーザーでも良好なグレーティングをファイバーに書くことができる。また、photosensitivity 効果を増感させ、屈折率変化量を大きくするために、常温高圧下で水素をファイバーに拡散させる方法が用いられる。10 MPa 程度の高圧水素中に2週間程度ファイバーを放置した後レーザーを照射すると、 $1 \times 10^{-3}$  以上の屈折率変化が得られる<sup>5)</sup>。

UV 照射による屈折率変化は、ガラス中の欠陥に起因するため、熱的に緩和し長期的にはある程度は変化量が減少する。この変化量の減少分は、屈折率変化の誘起後高温で熱処理 (エージング) をすることで除去することができる。これにより、長期的に安定な FG が作製されている<sup>6)</sup>。また、FG では、ガラスの屈折率の温度依存性により、Bragg 波長が約  $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  の割合でシフトする。この温度依存性は FG のパッケージを工夫して応力印可により補償することが可能である<sup>7)</sup>。

屈折率変調が長手方向に均一な場合、図5の点線に示すように、グレーティングの反射スペクトルに多くのサイドピークが生じ、WDM フィルターとして用いることが困

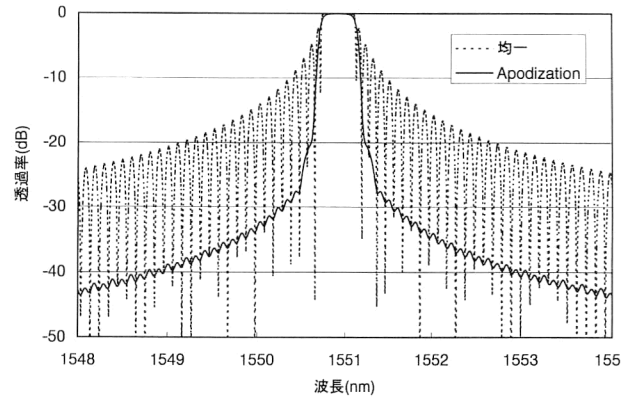


図5 FG のスペクトル.

難である。このサイドピークを除くためには、apodization と呼ばれる手法で、長手方向にガウス型等の屈折率変調の分布を形成する。具体的には、中央付近で屈折率変調を高くし、両側に向けて屈折率変化の振幅を減少させるようにする。この apodization 手法により、図5の実線に示すように、サイドピークを抑圧することができ、良好なフィルター特性が得られる<sup>8)</sup>。

FG を用い、サーキュレーターと組み合わせる、あるいはマッシュツェンダー干渉計 (MZI) を構成する<sup>9)</sup> 等により DWDM 用の狭帯域なフィルターを構成することができる。これらの構成では、Bragg 波長のチャンネルが反射され、それ以外の波長のチャンネルは透過する。FG 型フィルターは単体では低損失な ADM フィルターとして用いられ、MZI 等のユニット構造を多段に重ねることで多チャンネルの合分波フィルターを構成することができる。

### 3. アレイ導波路 (AWG) 型波長フィルター

PLC 型 DWDM フィルターとしては、AWG が最も広く用いられている。特に、石英系ガラス導波路で構成された AWG は、光学特性も良好であり、長期安定性にも優れ、大量生産も可能という特徴を有している<sup>10)</sup>。図6に Si 基板上の AWG の構成を示す。AWG は入出力導波路、長さの異なる多数の導波路からなるアレイ導波路、および2つのスラブ導波路から構成される。入射導波路からスラブ導波路に入る光は、回折により広がり、同位相でアレイ導波路に入射し、伝搬する。隣り合うアレイ導波路では光路長が  $\Delta L$  ずつ異なるようになっているので、アレイ導波路の出力端では、波長に依存した位相差が生じる。したがって、アレイ導波路からの出力光は同位相条件が成立する位置で干涉効果により強度を強め合う。いい換えれば、波長に依存して特定の位置に集光する。各波長に対応した集光位置に出力導波路を配置することにより、波長合分波フ

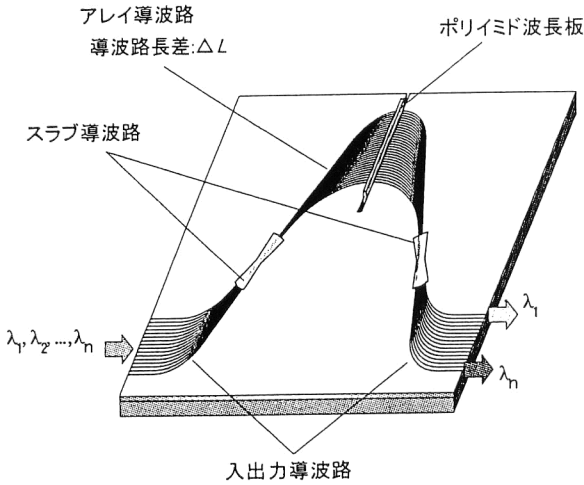


図6 AWG型光合分波フィルターの構成。

ィルターを構成することができる<sup>11)</sup>。以上のAWGの動作原理において、スラブ導波路とアレイ導波路部分は、それぞれレンズとバルクの回折格子と同一の働きをする。また、AWGでは、アレイ導波路中央の溝に厚さ20 $\mu\text{m}$ 程度のポリイミド1/2波長板を挿入し、Siとガラスの熱膨張係数の差による偏波依存性を解消している。

石英系光導波路の作製方法として、光ファイバーの作製方法の応用である火炎堆積法(FHD: flame hydrolysis deposition)とLSI作製で用いられる反応性イオンエッチング(RIE: reactive ion etching)を組み合わせた方法がある。FHD法は、導波路形成に必要な低損失な数 $\mu\text{m}$ の厚膜ガラスを堆積することに適している。堆積されたガラス膜にフォトリソグラフィにより導波路パターンを形成し、RIEにより精密にコアを形成することができる。基板には、通常高品質で安定なSi基板が用いられる。

石英系ガラス導波路からなるAWGの典型的なスペクトルを図7に示す。図7は、16チャンネル、100GHzの波長間隔のAWGにおける各ポートのスペクトルをまとめて示したものである。AWGでは、導波路をフォトリソグラフィにより精密に作製することができるので、各チャンネルにおける波長精度、損失の均一性は良い。クロストークもすべてのチャンネルで-35dB程度が得られる。また、バンド幅を広げるために、スラブ導波路へ入射する導波路形状を調節してスペクトル形状をフラット化している<sup>12)</sup>。

また、石英系ガラス導波路のAWGでは、中心波長は約0.01nm/ $^{\circ}\text{C}$ の温度依存性がある。これは、主にガラスの屈折率の温度依存性によるものである。このため、通常のAWGではPLC基板温度を一定に保つために、ペルチェ素子等の温度制御機構がパッケージに組み込まれている。一方、最近では、AWGの温度依存性を解消する方法

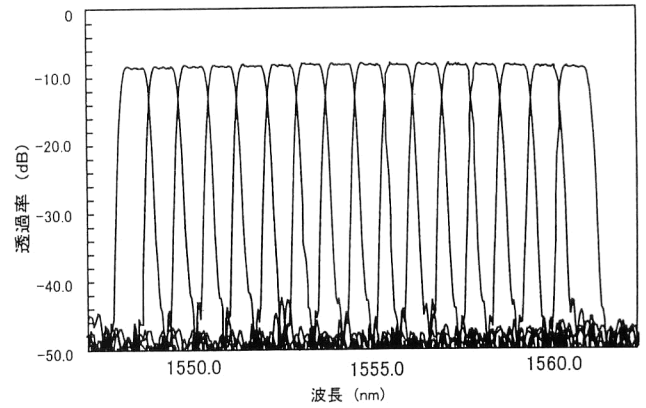


図7 16チャンネル、100GHzの波長間隔のAWGスペクトル。

として、石英ガラスと逆符号の屈折率温度依存性を有する樹脂を導波路の一部に充填する方法も開発されている<sup>13)</sup>。

以上のように、AWGでは損失、クロストーク等の光学特性がチャンネル数にそれほど依存しないという特徴があり、多チャンネル化が容易である。現在までに、128チャンネルで25GHz波長間隔のAWGが実現されている<sup>14)</sup>。

3種類のDWDM用フィルターについて概説した。各フィルターは、チャンネル数にも依存するが、基本的に次の特徴を有している。フィルター型：低損失、ワイドバンド、低クロストーク。ファイバー型：低損失、広いバンド幅制御性。PLC型：高いチャンネル間均一性、簡便な多チャンネル化等である。DWDMシステムは、ネットワークの基盤となりつつあり、今後、適用領域の拡大、チャンネル数の増加が進展すると考えられる。このため、DWDMシステムのキー部品のひとつであるフィルターには低コスト化、高性能化が要求される。これに応えるためには、個々のフィルター特性を向上させることはもちろんであるが、各種フィルターの特徴を生かした組み合わせにより、低コストで、高性能なDWDM用フィルターが構成されることが考えられる。

## 文 献

- 1) I. P. Kaminow: "A wideband all-optical WDM network," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, **14** (1996) 780-799.
- 2) M. A. Scobey and D. E. Spock: "Passive DWDM components using MicroPlasma optical interference filters," *OFC '96 Technical Digest* (1996) pp. 242-243.
- 3) G. Meltz, W. Morey and W. H. Glenn: "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Opt. Lett.*, **29** (1989) 823-825.
- 4) K. O. Hill, B. Maro, F. Bilodeau, D. C. Johnson and J. Albert: "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.*, **62** (1993) 1035-1037.

- 5) P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi and W. A. Reed: "High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibers," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 1191-1193.
- 6) T. Erdogan, V. Mizrahi, P. J. Lemaire and D. Monroe: "Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings," *J. Appl. Phys.*, **76** (1994) 73-80.
- 7) G. W. Yoffe, P. A. Krug, F. Ouellette and D. Thorncraft: "Temperature-compensated optical-fiber Bragg gratings," *OFC '95 Technical Digest* (1995) pp.134-135.
- 8) B. Maro, S. Theriault, D. C. Johnson, F. Bilodeau, J. Albert and K. O. Hill: "Apodized in-fiber Bragg grating reflector photoimprinted using a phase mask," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 223-225.
- 9) D. C. Johnson, K. O. Hill, F. Bilodeau and S. Faucher: "New design concept for a narrowband wavelength-selective optical tap and combiner," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 668-669.
- 10) 河内正夫: "プレーナ光波回路デバイス", *信学論 (C-I)*, **J81-C-I** (1998) 311-321.
- 11) M. K. Smit and C. van Dam: "Phaser based WDM devices: Principles, design and applications," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, **2** (1996) 236-250.
- 12) K. Okamoto and A. Sugita: "Flat spectral response arrayed-waveguide grating multiplexer with parabolic waveguide horns," *Electron. Lett.*, **32** (1996) 1661-1662.
- 13) Y. Inoue, A. Kaneko, F. Hanawa, H. Takahashi, K. Hattori and S. Sumida: "Athermal silica-based arrayed waveguide grating multiplexer," *Electron. Lett.*, **33** (1997) 1945-1946.
- 14) Y. Okamoto, K. Syuto, H. Takahashi and Y. Ohmori: "Fabrication of 128-channel arrayed-waveguide grating multiplexer with 25 GHz channel spacing," *Electron. Lett.*, **32** (1996) 1474-1476.

(1999年11月5日受理)