

導波路型光波長フィルタ

岡山 秀彰

インターネット時代を担う大容量高速な光通信方式として、多くの波長に分割し、その波長チャンネルごとに信号を載せて伝送を行う波長多重（DWDMまたは、WDM: Dense Wavelength Division Multiplexing）通信が大きな進展を見せている。このような通信方式では、波長を分離するための光波長フィルタ素子が必須のデバイスとなる。光波長フィルタを実現する方法にはさまざまなタイプのあるが¹⁾、我々は量産性、光学安定性に優れた、光導波路技術を用いて開発を行ってきている。

光波長フィルタの用途

WDM通信技術においては、まず一本の光ファイバ中に束ねられた、多数の波長に載った信号を区別するために各波長を分離するための素子が必要となる。この素子の中には複数の出力ポートへ波長を個々に分離するものと、特定の波長のみを少数のポートへ取り出すものがある。後者のものは光波長フィルタのなかでも特に分波素子と呼ばれている。また、取り出す光波長が固定されているものと、可変なものがあり、後者のものは可変光波長フィルタと呼ばれている。

これら素子は、受信端で個々の波長を取り出し、あるいは送信端で多くの波長を一本の光ファイバに束ねる目的で用いられる。さらに、光アドドロップ（OADM: Optical Add/Drop Multiplexer）と呼ばれるシステムでは、伝送路の途中で特定の波長チャンネルを取り出したり、挿入したりして、より自由なネットワーク構成のシステムを構築するために用いられている。将来は、さらに柔軟に通信量の変動あるいは、障害に対応するために、分離する波長を可変的に取り出すことが可能な素子が必要となってくる。

光波長フィルタ素子の用途として、光信号の状態を制御あるいは監視するものも非常に重要になりつつある。代表的な例としては、光ファイバアンプにおける増幅率を波長に対して均一化するものがある。波長チャンネルの波長ずれ、各波長のパワーずれ、あるいはノイズを監視するための波長モニタも、WDM通信において通信容量を増

大するため波長間隔が狭くなるにつれて重要性が増しつつある。その他、信号の劣化要因となる伝送路の分散を補償する用途にも波長フィルタを適用するさまざまな試みが行われている。この記事では、光波長モニタ用にも適したものとして、沖電気工業株式会社オプティカルコンポーネントカンパニー、コーポレート研究開発本部、沖電線株式会社の協力により開発している素子を中心に説明する。

光波長モニタの方法

光波長モニタの方法としては、可変光波長フィルタを用いる方法と、波長固定の分波素子としての機能を有する素子を利用する方法の二つが主なものである。図1、図2に二つの方法を示している。図1が可変光波長フィルタによる方法であり、図2が分波素子による方法である。

可変光波長フィルタによる方法では、WDM信号の中から一つの波長チャンネルをフィルタ素子で選び出し、その信号の波長、パワーをモニタする。比較的少ない受光素子で構成されるが、波長基準が必要であり、また広帯域の波長範囲で比較的高速に選択波長を可変でき、しかも波長分解能の高い素子が必要となる。

波長基準には、波長安定化光源を利用する方法と、図1

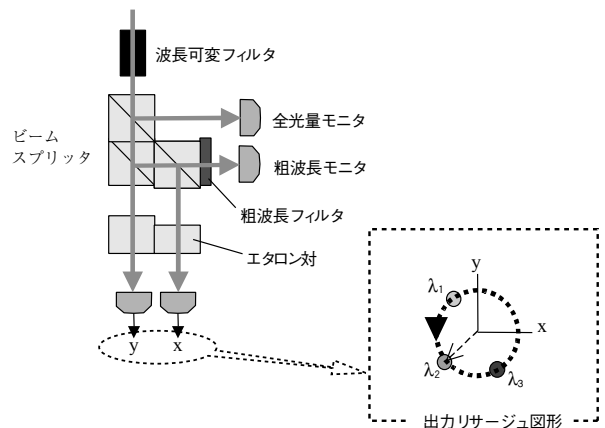


図1 波長可変フィルタを用いた波長モニタ

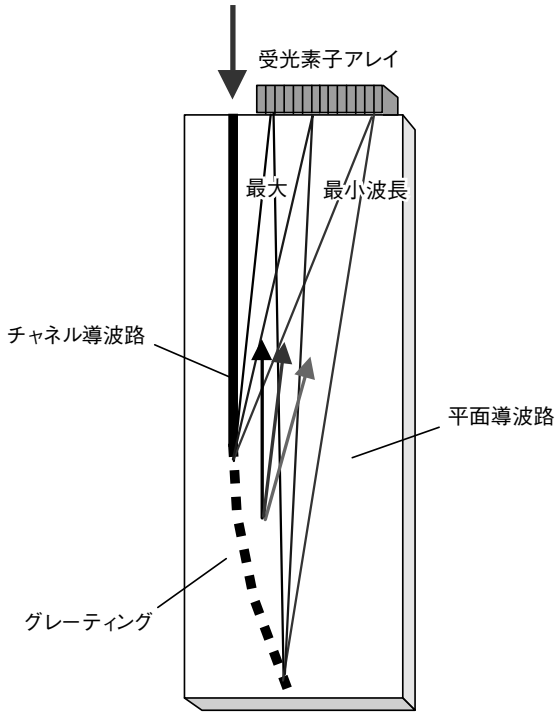


図2 分波素子を用いた光波長モニタ

に示すように、エタロン（光共振器）などを用いる方法がある。エタロンは、波長を安定化したレーザダイオードモジュールにも使用され、波長に対して周期的な光透過出力を有する。図の方法では、波長に対する光透過出力の周期が1/4波長ずれた二つのエタロンの出力を信号処理して、波長に対するリサージュ図形を得る。このリサージュ図形の角度方向により波長、動径の長さでパワーがわかる。また、薄膜フィルタ（図中での粗波長フィルタ）で波長の大まかな値を測定し、さらにビームスプリッターで分離した光で光パワーの測定が行える。アレイ配置として、単一のモジュールで複数のファイバに対応することも可能である。

一方、図2の分波素子による方法では、まず一本の光ファイバからの光を分波素子によって、波長ごとに空間的に光信号を分離する。焦点面では受光素子のアレイによって光信号の強度を測定し、どの波長成分がどの程度存在するかを検出する。可変部分が無いため、分波素子自体で波長基準に使用できる利点がある。受光素子としては、多くの受光部（エレメント）を有したものをを用いて波長分解能を上げる必要がある、受光素子が高価となる欠点がある。一般的に50GHzの波長間隔では512エレメントの素子を、25GHz間隔では1024エレメントのものが使用されている。

可変光波長フィルタの例

可変光波長フィルタは、光波長モニタ以外にもOADMを実現する際などに非常に有用な素子である。多くの研究がなされてきているが、波長を高分解能で選択できて波長可変高速性、波長可変広帯域性などを兼ね備えた素子は、実現が難しい。現在波長モニタなどで注目されているのは、マイクロマシン技術を用いて、ファブリーペロ共振器のミラー間隔を機械的に動かすタイプのものである。しかし、この方式ではミラーを機械的に動かすので高速化を求めるのが困難である。

この他、マイクロ秒台のチューニング速度と数十nmの波長可変範囲を有する音響光学効果を用いた可変波長光フィルタを当社で実現し、波長スイッチングシステムの確認実験を行った実績がある。

また、きわめて高速なチューニングが可能でしかも、光学的特性に優れたものとして、電気光学効果等を用いた導波路型の素子がある。通常、チャンネル数は電気光学効果の大きさで決定されてしまう。図3には我々の開発した素子の例として、その限界を打ち破りしかも多チャンネル同時選択が実現できる方法を示す。モード変換あるいは反射を発生させるグレーティングをブロックに分け、そのブロック中をさらに二分して、一方に全素子長にわたり空間的なグレーティング強度分布としてsin関数、もう一方にcos関数を発生する。sinグレーティングはcosに対してグレーティングの1/4周期分位置をずらす。これにより、任意の波長が空間的なグレーティング強度分布で選択可能となる。

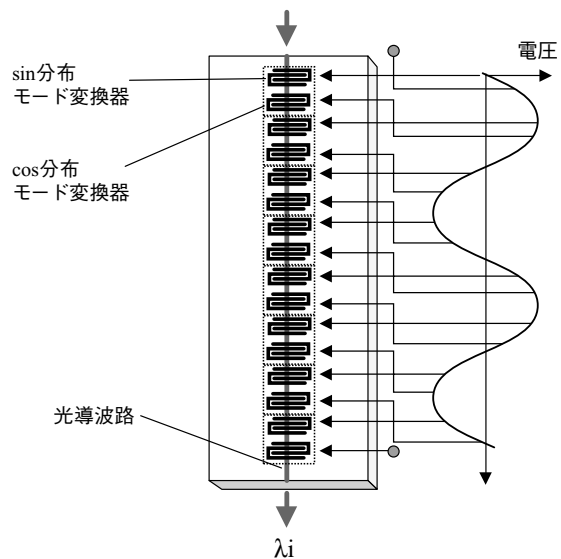


図3 プログラム型可変波長フィルタ

導波路グレーティングによる分波素子

導波路を用いた分波素子としては、レンズ形状の平面導波路を長さの異なる導波路のアレイによってつないだ構成のアレイ導波路グレーティング (AWG: Arrayed Waveguide Grating) 素子が最も有名である²⁾。波長モニタにも使用可能な素子として考えた場合には、非常に細かい波長まで分解できる能力が必要であると同時に、WDM通信に用いられる広い波長帯域、例えば40nmを単一の素子でカバーしなければならない。さらに、受光素子では感度・ノイズを確保するため、受光部を小さくするのに限界があることなどから、全体として1~2cm長ある受光部アレイ幅に対して、光の焦点を結ばせる必要が生じる。これを、小型の素子で実現する必要があるため受光素子と波長分離部の距離がとれず、収差が問題となる。AWG素子では、この要求を満たすためには導波路アレイ本数が非常に多くなり、構造の複雑さと素子の大きさで作製に不利なものとなる。この他、平面導波路中のグレーティングを用いたものがある。この構造は、入力導波路からの光を平面導波路中に放射して、平面導波路中に設けた反射面のアレイ (グレーティング) で回折させ、波長ごとに異なる焦点位置に出力導波路の先端を設ける構造をとっている。反射面の間隔を適切に配置すればレンズ無しで集光が可能である。この構造はAWGよりも単純なものの、収差の問題からやはり幅の広い受光素子に対応するのは困難である。

我々は今回、一本の導波路にグレーティングを設け、さらに平面導波路を組み合わせた構造³⁾に着目して、素子開発を行った。基本構造は、図2に示したものであり、基板上に面状に光を閉じ込めて伝搬する平面導波路と、その中に設けられた、断面で縦横方向ともに光を閉じ込めて伝搬するチャンネル導波路より構成されている。チャンネル導波路を伝搬する光は、このグレーティングによってチャンネル導波路から平面導波路内に伝搬するとともに少しずつ反射されていく。この反射光が受光素子アレイ部分で干渉するときに、波長により光路差があるため、波長ごとに異なる位置で集光される。

素子の波長分解能は、チャンネル導波路の軸を受光素子アレイに対してなるべく垂直に近づけることによって高性能化することができる。バルク素子ではグレーティングに平行に近い角度で入射する、いわゆるエッセルグレーティングの配置に相当する。

グレーティングとしては、ファイバグレーティングFBG (Fiber Bragg Grating) と同様に、紫外光による屈折率変化を利用して作製するものと、微細加工によって作製

するものの二種類がある。

紫外光によるものは、波長オーダーの微細なグレーティングの作製が可能であり、性能の良い素子が得られる。その反面、大きな屈折率変化を生じさせるには材料上の工夫が必要である。我々は、低損失な石英材料を導波路として用い、その作製条件を工夫することによって 10^{-3} 台の大きな屈折率変化を、通常行われる水素注入のような、余分のプロセスを経ずに実現している。また、チャンネル導波路を平面導波路内に埋め込む構造によって、チャンネル導波路のみに紫外光反応性を持たせて、素子作製を容易にすることができる。実際の素子作製は、石英基板にグレーティング溝を設けた光位相マスクを試料の上へ乗せ、紫外光を照射する。回折効果により、紫外光の干渉パターンを生じさせることができ、この干渉パターンにより試料中に屈折率が周期的に変化した、グレーティングパターンを形成する。

微細加工によるグレーティングでは、チャンネル導波路の形状に反射面を作りつける方法を採用している。点線状の光導波路を形成し、この点線状光導波路の間隙部界面をグレーティングとして用いる。この方法では、チャンネル導波路を形成すれば同時にグレーティングを作製でき、作製プロセスを単純化できる利点を有している。微細加工の難しさを回避するためグレーティングの間隔をある程度長くすることが望ましい。また、間隔に対する作製精度要求を緩和するために、点線状導波路構造の間隙両端に異なる角度を有する反射面を設けてグレーティングを実現している。この二つの反射面の波長ピークは異なる波長で異なった場所に形成されるため、互いに邪魔をしないような設計が可能であり、作製精度の緩和ができる。また、片方の反射面を垂直反射面としてさらに2段構成とすることでこの面での反射率を低減することも可能である。

チャンネル導波路の形状と、グレーティングの反射面間ピッチは、レンズを用いずとも集光するように新たに考案した特殊な設計を行っている。受光素子アレイのかなり幅の広い範囲で位相誤差 (収差) が生じないようにするために、複数の最適集光位置が設けられている。これにより、集光レンズを用いることなく広範囲の波長で光が集光される。

図4には得られた特性の一例 (UVグレーティング) で主ピークに関するものを示す。作製条件、入射位置によっては高次モードによる副ピークが見られる。作製した素子の大きさは受光素子アレイの幅1.5cmに合わせてある。長さは6cmとした。波長分解能を比較するための指数である分散すなわち、波長変化に対する集光スポット位置

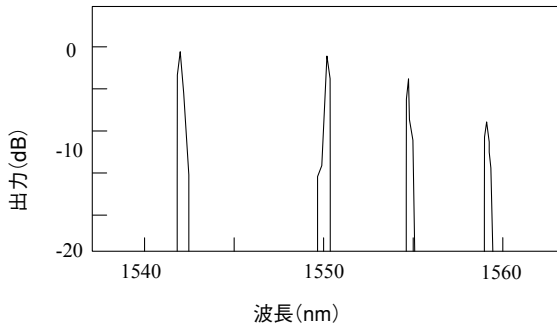


図4 分波素子出力の例（2mm間隔の出力位置での波長）

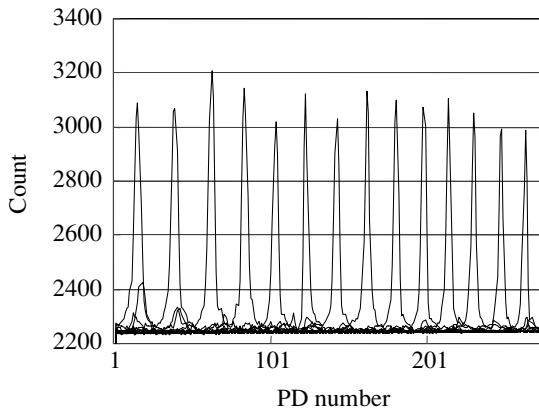


図5 PDアレイよりの出力例（波長1546nmより約1nm間隔）

変化は最大 7.5×10^5 を得た。この値は、一般的な分光素子に対して一桁近く優れている。グレーティング長約5mmでスポットサイズは長径で40ミクロン程度、0.2nm離れた光を分離することが可能であった。偏光依存性はプロセスの工夫により0.1nm以下のものも得られた。消光比として25dB程度のものも得られている。設計使用波長範囲は35nmである。使用波長範囲45nmも素子を数ミリ増加する程度で実現できる。受光素子アレイと組み合わせでモジュール化したものでは、-30dBmの変調波長光源よりの光に対して波長1nmあたり約15画素で分光でき、出力として3Vの信号を得ることができた。図5には点線状光導波路素子での例を示す。モジュールの大きさは幅3cm、長さ8cm程度である。

波長モニタに使用する素子は波長に対する特性が、通信用の分波素子に比して厳しいものが要求される。この技術により、通信用の素子としても高性能なものを実現されることが期待される。

まとめ

光波長フィルタの用途を述べ、我々が今までに開発を行っている導波路型素子に関して紹介した。可変光波長フィルタ、分波素子ともに波長の細分化に伴いこれからますますWDM光通信システムの中で重要になっていくものと考えられる。当社においてはこの他のタイプの光波長フィルタについても鋭意積極的な開発に努め、将来的システム実現を目指している。◆◆

参考文献

- 1) G. Sauve: 40Gビット/秒への高速化が光合波器の主役交代を巻き起こす, 日経エレクトロニクス, 2001年11月19日号, p.124
- 2) 鈴木扇太: アレイ導波路回折格子(AWG)デバイスの展開, O plus E, vol.24, No.4, pp.409-414, 2002年
- 3) H.Okayama and T.Ushikubo: Design of wavelength demultiplexer using multi-reflection-mirrors positioned along a waveguide, Tech.Digest CLEO/Pacific Rim, Paper P2-1, 2001

筆者紹介

岡山秀彰: Hideaki Okayama.オプティカルコンポーネントカンパニー 研究開発部 主任研究員