

FTTHを支える光受動部品

金森 弘 雄

Passive Optical Components and Their Application to FTTH Networks — by Hiroo Kanamori — This paper describes technologies related to passive optical components, such as fused fiber couplers, optical filters, splitters and fiber gratings. These components have been actively deployed in FTTH (Fiber to the Home) networks. A splitter connects transmission equipment at a central office to many users, leading to economical PDS (Passive Double Star) networks. A splitter with a directional coupler circuit or an optical filter enables multiplexing of video signals. A fiber grating external cavity laser diode is suitable as an OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) light source. The light from an OTDR is coupled to the main route through such a highly integrated device as a PLC coupler or a tape fiber fused coupler to be reflected at a terminal filter that employs an optical connector embedded with a chirped fiber grating.

Keywords: FTTH, fused fiber coupler, splitter, fiber grating, PLC

1. 緒 言

光ファイバ通信は、世の中をインターネット社会に変貌させた。日本ではユーザ宅まで光ファイバが張り巡らされたFTTH (Fiber To The Home) の普及が進み、光ファイバを用いたブロードバンドサービスの契約者数は2010年3月に1500万を越えている。光ファイバ通信の3要素は「光ファイバ」、「発光素子」、「受光素子」と言われる。しかし、この3要素以外にも様々な光部品や関連技術が、光ネットワークの機能と信頼性、経済性を高め、光ファイバ通信の進化に貢献してきたことを見逃すことはできない。本報では、光電変換を伴わない所謂「光受動部品」に焦点を当て、当社での開発内容を含めた技術のポイントとFTTH光ネットワークでの活用形態を解説する。

2. 光受動部品の原理と設計、製法

2-1 ファイバ溶融型カプラ ファイバ溶融型カプラは、図1に示すように複数の光ファイバを加熱溶融させ

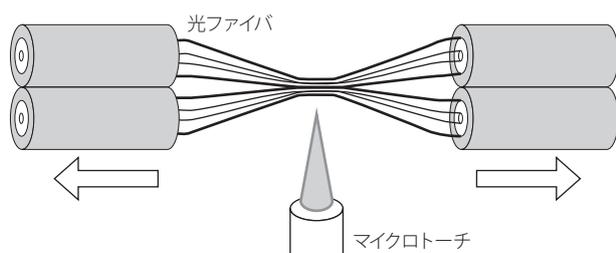


図1 ファイバ溶融型カプラ

軸方向に延伸するという簡便な方法で作製され、光信号の合流・分岐および合波・分波に用いられる代表的な光受動部品である⁽¹⁾。

光ファイバが引き伸ばされるとコア部での光の閉じ込めが弱くなり、光がクラッド全体にまで広がり融着された隣の光ファイバにも光が結合する。隣接する光ファイバ同士の構造が同一であれば（伝搬定数が等しければ）、ある伝搬距離で光は隣の光ファイバに100%結合し、さらに伝搬すると逆に元の光ファイバに光が戻る。この結合距離には波長依存性があるので、適切な溶融・延伸条件下で図2(a)に示すように特定の波長を一つの出力ファイバに、別の波長をもう一方の出力ファイバに導くことができ、分波合波機能を実現することができる。また、隣接光ファイバの構造が異なる時は、結合が100%に至らないが、波長依存性は低減する。この特性を利用し図2(b)に示すように波長

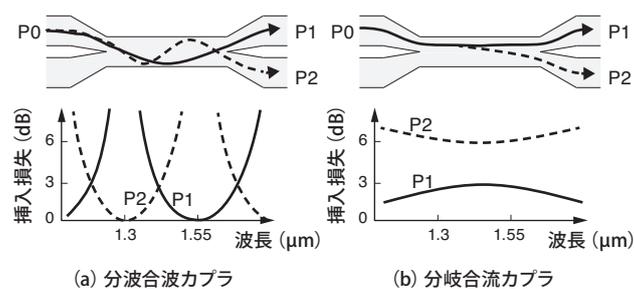


図2 ファイバ溶融型カプラの機能

依存性の少ない光の分岐合流素子を作製することもできる。

複数のファイバ溶融型カプラを用いる用途に対して、当社では図3のようにテープ心線を用いて複数のファイバ溶融型カプラを形成したテープ型光ファイバカプラ⁽²⁾を開発した。この技術は、複数のファイバ溶融型カプラを同時にできるという製造上の利点とともに、省スペース化が実現でき、さらに両端がテープ心線であることから配線や収納が容易になるという特徴がある。

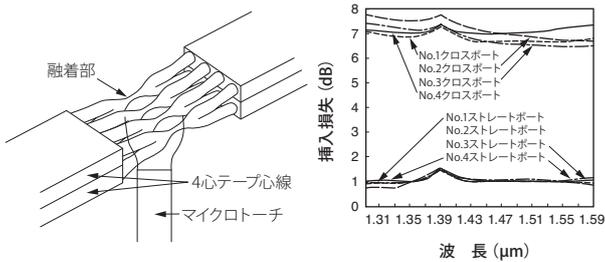


図3 テープ型光ファイバカプラ

2-2 光フィルタ 光ファイバの途中部分で特定の波長の光を選択的に取り出したり結合させる合分波素子として、誘電体多層膜を用いた光フィルタが用いられる。誘電体多層膜は透明基板上に屈折率の異なる誘電体層を多段に積層し層境界での反射光の干渉により特定の波長域の光を透過あるいは反射させるものである。光フィルタの基本構造を図4に示す。2心フェルルと単心フェルルのそれぞれ先端に分布屈折率レンズを付け対向させてコリメート光学系とし、両者の間に誘電体多層膜を配置する構成が一般的である。

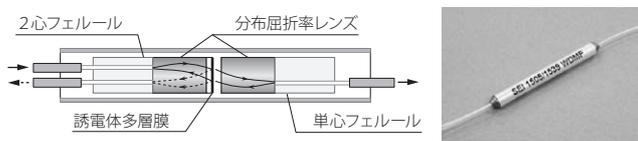


図4 光フィルタの構成

ファイバ埋め込み型光フィルタ⁽¹⁾は、基材に固定した光ファイバに切断加工で間隙を形成し、誘電体多層膜を間隙に挿入し接着固定したものである。この際、光ファイバの間隙が広がると光損失が高くなるため誘電体多層膜の基板厚は数10μmまで薄くする必要がある。図5に単心の光ファイバをV溝を有する基材に固定した例を示す。同様の

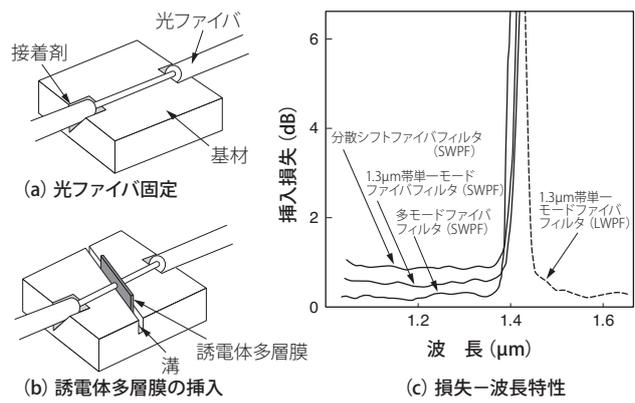


図5 ファイバ埋め込み型光フィルタ

構成で単心線の代わりにテープ心線を用いると、1枚の誘電体多層膜で複数のフィルタを形成することができる。また、光コネクタのフェルル部に溝加工し誘電体多層膜を挿入すればフィルタ機能を有する光コネクタも実現できる。

2-3 光スプリッタ 光スプリッタは、1本の光ファイバから複数の光ファイバに光信号を分岐する部品である。分岐数が4分岐程度の場合、ファイバ溶融型カプラを用いることもあるが、8分岐以上では平面光導波路（以下PLC^{※1}）が多く用いられる。図6に光スプリッタの代表的な構造を示す⁽³⁾。光回路が形成されたPLCチップに光信号を入出力結合させるために、光ファイバを整列配置したファイバアレイをPLCチップに対して光軸調心した後、紫外線硬化型接着剤で固定される。屈折率の不整合領域となる接着剤との界面で生じる反射戻り光を抑制する目的で、PLCチップとファイバアレイの端面は斜めに形成される。分岐損を除くPLCチップ部の損失は0.1dB/cm以下であり、光スプリッタ全体の過剰損失は約1dB以下に抑えられる。分岐損失均一性は1dB以下、反射減衰量は-50dB以下

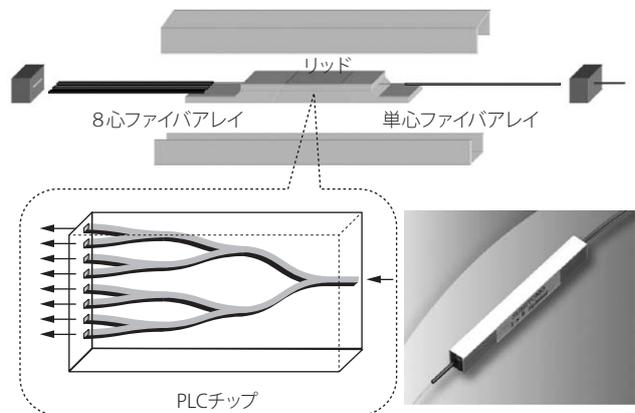


図6 光スプリッタの構造

である。なお、多心光ファイバ側のファイバアレイは、光ファイバ端面の配列寸法と光導波路端面の配列寸法をサブミクロンオーダーで高精度に合わせておくことが光スプリッタの挿入損失を低減する上で欠かせないポイントである。ファイバアレイの光ファイバ配列精度はV溝加工精度や光ファイバ外径精度、コア偏心などに依存するが、特にファイバアレイ基材がガラスなどの難削材である場合には、V溝研削加工の精度向上に高度な技術が必要となる。

2-4 ファイバグレーティング

(1) ファイバグレーティングの原理

ファイバグレーティングは、紫外線照射によるガラスの屈折率増加現象を利用し、光ファイバの屈折率を周期的に変化させたものであり、その屈折率周期に応じて短周期グレーティング(図7(a))と長周期グレーティング(図7(b))に大別される(4),(5)。屈折率周期が光の波長オーダーである短周期グレーティングは、ブラッグ回折により特定の波長 λ_B (ブラッグ波長)の光のみを選択的に反射する。ブラッグ波長 λ_B は、伝搬モードの実効屈折率 n と屈折率周期 Λ を用いて式(1)で、表される。

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、反射率 R_B はグレーティング長 L と屈折率変化量 Δn により式(2)で表すことができる。

$$R_B = \tanh^2(\pi L \cdot \Delta n \cdot \eta / \lambda_B) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで η は、伝搬光エネルギーのコア内に閉じ込められているエネルギーの割合である。1550nm帯の標準的な短周期グレーティングでは、屈折率周期 Λ は約0.5 μm であるので、グレーティング長 L が約10mmの場合、約20,000層もの屈折率周期が形成される。この多数の層の

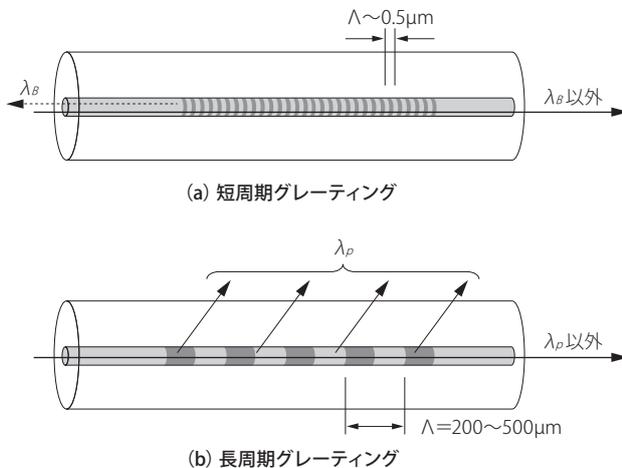


図7 ファイバグレーティングの構造

効果で、紫外線により誘起されるたかだか 10^{-3} 程度の屈折率変化 Δn でも短周期グレーティングでは図8に示すように他のフィルタ素子に無い急峻なスペクトル特性を得ることができる。

屈折率周期 L が数百 μm と長い長周期グレーティングでは、コアを伝搬してきた光の一部がクラッドモードと結合し減衰する。伝搬定数 β_{core} のコア伝搬光が伝搬定数 β_{clad} のクラッドモードと結合する効率 ϵ は式(3)で与えられる。

$$\epsilon = \frac{\sin^2\{kL\sqrt{1+(\delta/k)^2}\}}{1+(\delta/k)^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\delta = (1/2)(\beta_{core} - \beta_{clad} - 2\pi/\Lambda) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで k は結合係数である。長周期グレーティングの減衰のピーク波長 λ_p では結合効率 ϵ が最大となる $\delta = 0$ の条件を満たす。 λ_p は、コア伝搬光の実効屈折率 $n_{core} = \beta_{core} / (2\pi/\lambda_p)$ とクラッドモードの実効屈折率 $n_{clad} = \beta_{clad} / (2\pi/\lambda_p)$ を用いると、式(5)で表すことができる。

$$\lambda_p = \Lambda(n_{core} - n_{clad}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

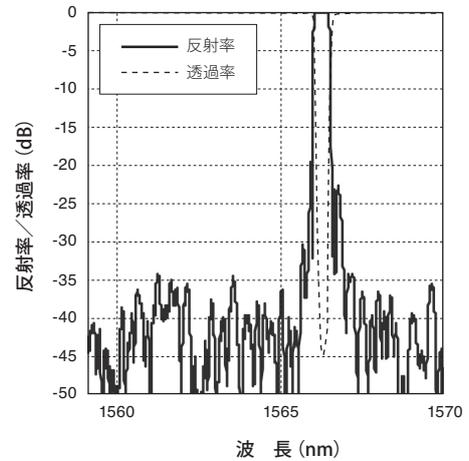


図8 短周期グレーティングのスペクトル特性例

(2) ファイバグレーティングの製法

酸化ゲルマニウム(GeO_2)が添加された石英ガラス(SiO_2)に波長240nm近傍の紫外線を照射するとガラス中の酸素欠乏欠陥であるGe-Si結合が紫外線を吸収し新たな欠陥が生成される。この時、吸収スペクトルの変化とともに屈折率が増加する。また欠陥形成に伴う密度変化も屈折率増加の要因であるとも言われている。紫外線光源としては、KrFエキシマレーザ(波長248nm)またはアルゴンイオンレーザの第二高調波(波長244nm)が多く用いられ

る。より大きな屈折率変化が必要な場合は、予め光ファイバ中に水素を数モル%という高濃度で吸収させておく手法が用いられる。例えば、常温で100～200気圧の水素雰囲気中に1～2週間保持し水素を吸収させた光ファイバに紫外線を照射することで、 $1 \sim 5 \times 10^{-3}$ の屈折率変化を得ることができる。

屈折率周期が光の波長オーダーである短周期グレーティングは、光ファイバの側面から紫外線の干渉パターンを照射することにより作製できる。代表的な製法として図9に示した二光束干渉法と位相格子法がある。二光束干渉法では、グレーティング周期 Λ と干渉角 θ および紫外線波長 λ_{UV} に式(6)の関係が成り立ち、干渉角 θ を制御することで任意の周期 Λ のファイバグレーティングを実現できる。

$$\Lambda = \lambda_{UV} / 2 \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (6)$$

位相格子法では、石英ガラス基板表面に凹凸を形成した透過型回折格子(位相格子)の+1次と-1次の回折光の干渉パターンを利用する。位相格子は、凹部と凸部で紫外線の位相を π シフトさせることで0次光の透過率を抑制している。干渉パターンの周期は位相格子周期の1/2となるため、高精度の位相格子を用いれば良好な製造再現性が期待できる。

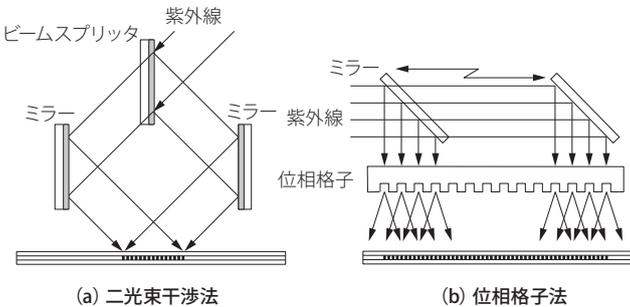


図9 短周期グレーティングの製法

屈折率周期が長い長周期グレーティングは、強度変調マスクやスリットなどで屈折率を高めたい領域にだけ紫外線を照射し製造できる。所謂、日光写真の原理である。

ファイバグレーティングを形成する紫外線誘起屈折率変化は、経時的に緩和する。その緩和量の時間依存性と温度依存性は定式化されており、製造直後の加熱エージングで強制的に緩和を進めることにより、以降の緩和が無視できる十分安定な製品を得ることができる⁽⁶⁾。

(3) 短周期グレーティングの設計

短周期グレーティングを光ファイバの長手方向に均一に

作製するだけでは、図10(a)に示すように光フィルタとしてのスペクトルの急峻性を阻害する副次ピークがブラッグ波長の両側に現れる。この副次ピークを抑圧するために、光ファイバの長手方向にグレーティング強度を滑らかに変化させるアポタイゼーションという手法が用いられる。この際、図10(b)のように単に屈折率変化量のみで分布を与えると、グレーティング中心部を挟んだ平均屈折率が等しい対称な位置同士で多重反射が生じ、反射スペクトルではブラッグ波長の短波長側にファブリ・ペロ共振モードによるピーク列が現れる。そこで図10(c)のように更に平均屈折率を均一化することにより、ブラッグ波長近傍のみが反射する急峻な反射スペクトルを得ることができる。

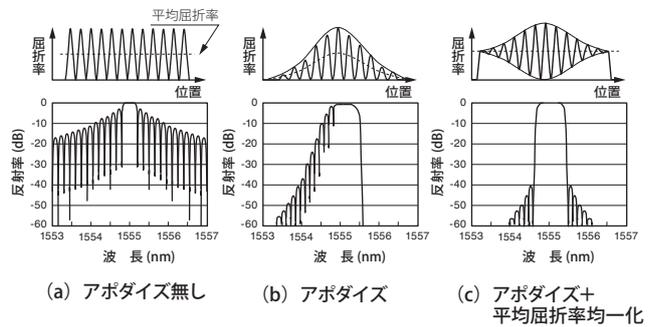


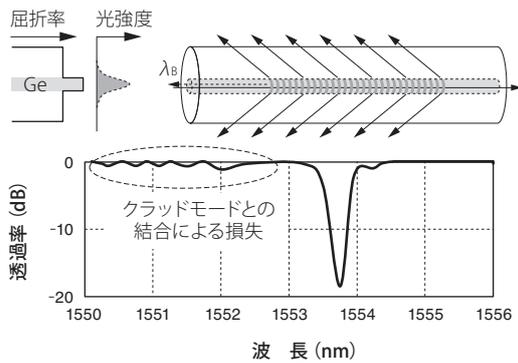
図10 短周期グレーティング反射スペクトル波形の改善

紫外線誘起屈折率変化は GeO_2 に起因するため、通常の光ファイバでは GeO_2 が添加されたコア部のみグレーティングが形成される。一方、単一モード光ファイバの伝搬モードの電界は、コアだけではなくクラッドまで広がっているため、コア/クラッド界面での回折光が逆方向に伝搬するクラッドモードと結合すると図11に示すようにブラッグ波長の短波長側に放射損失が現れる。この放射損失を抑圧するためには、コア/クラッド界面での回折を低減すればよい。即ち伝搬モードの電界分布に対し十分広いクラッド部分にも GeO_2 を添加した光ファイバを用い、クラッド部にも紫外線誘起屈折率変化を生じさせる。図11に GeO_2 添加クラッド光ファイバに形成した短周期グレーティングの透過スペクトルの一例を示す。クラッドには GeO_2 添加による屈折率上昇を相殺するため屈折率低下作用のあるフッ素(F)を添加している。

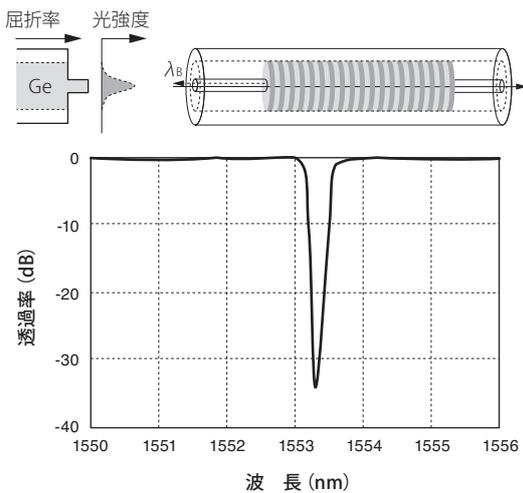
短周期グレーティングのブラッグ波長 λ_B は温度によって変化する。 λ_B の温度依存性は、式(1)より

$$\partial \lambda_B / \partial T = \lambda_B \{ \alpha + (\partial n / \partial T) / n \} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表される。式(7)の右辺第1項の α は石英ガラスの熱膨

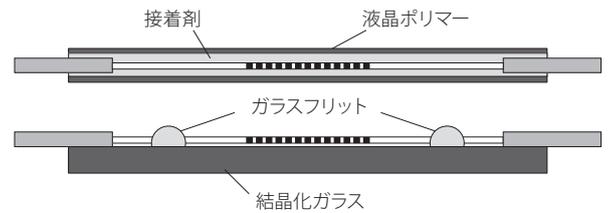


(a) 標準的な光ファイバ

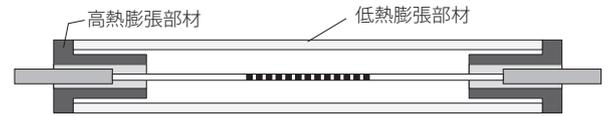


(b) GeO₂添加クラッド光ファイバ

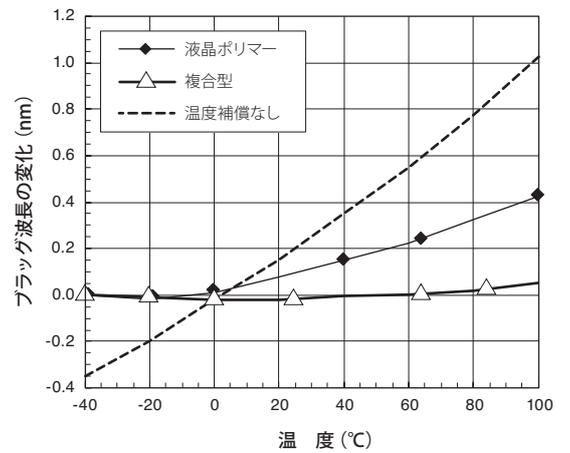
図11 短周期グレーティングのクラッドモード結合損失の抑制



(a) 負の熱膨張係数を有する基材



(b) 複合型



(c) ブラッグ波長の温度依存性

図12 短周期グレーティングのブラッグ波長の温度無依存性

張係数 ($5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$) である。第2項の $\partial n/\partial T$ は、石英ガラスの屈折率の温度依存性 ($7.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) でありブラッグ波長の温度変化の支配的要因となっている。これを解消するには、屈折率の温度依存性を相殺するよう低温ほどファイバグレーティングに高い張力が印加されるパッケージ構造が有効となる。例えば図12に示すように、負の熱膨張係数を有する分子を配向させた液晶ポリマーチューブ内にファイバグレーティングを挿入し固定する方法、同じく負の膨張係数を有する結晶化ガラス基材にファイバグレーティングを固定する手法、低熱膨張係数部材の両端に固定された高熱膨張係数部材でファイバグレーティングの両端を支持する複合型などの構造が開発されている。

3. FTTH光ネットワークでの光受動部品の役割

FTTH光ネットワークでは、局側の伝送装置 (OLT: Optical Line Terminal) が途中の光スプリッタを介して複数のユーザ側の伝送装置 (ONU: Optical Network

Unit) と結ばれる PON (Passive Optical Network) 方式が一般的に採用されている。PON方式では、局側設備と光ファイバケーブルを複数のユーザでシェアすることで経済性を高めている。前章で紹介した光受動部品がFTTHネットワークで如何に活用されているかを以下に紹介する。

3-1 光信号の分岐 図13に日本における代表的な光ネットワーク構成を示す。局内に4分岐、各ユーザ近傍の架空クロージャ内に8分岐の光スプリッタが配置されている。

ITU-T⁽⁶⁾ や IEEE⁽⁷⁾ では G-PON (Gigabit-capable Passive Optical Network) あるいは GE-PON (Gigabit-ether Passive Optical Network) システムとしての最大分岐数や信号波長域が勧告されており、ユーザ宅へ1本の光ファイバを引き込む構成において光スプリッタの分岐最大数は64 (G-PON) または32 (GE-PON) まで、下り (局からユーザ) の光信号波長は1490nm帯、上り (ユーザから局) の光信号は1310nm帯となっている。下り信号に映像配信サービスを追加する際には、映像信号波長とし

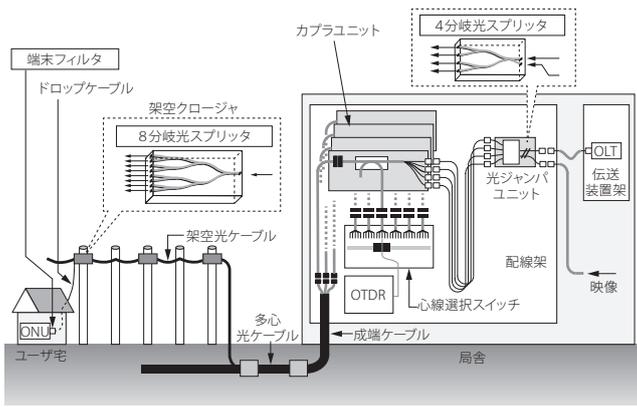


図13 FTTH光ネットワークの構成

て1550～1560nmが割り当てられている。更に1650nm帯の監視光も流れることから、この光スプリッタには1300～1650nmという幅広い波長範囲で使用されることを前提とした光学特性が求められる。なお、最大64分岐した場合には、原理的な分岐損失だけで18dBにもなる。したがって、分岐数は光線路の構成や設計上のロスバジェットを勘案して設定されている。

3-2 映像信号の合分波 前述したようにPONの上り信号と下り信号には、それぞれ1310nm帯および1490nm帯という異なる波長の光信号が使われている。それらの合分波は、伝送装置内部に実装された誘電体多層膜によって行われることが多い。一方、映像信号は、局側伝送装置とユーザ宅の途中で光ファイバに合波されるが、その合波箇所に応じた合波技術が用いられる。

光スプリッタ近傍で映像信号を合波する際には、図14に示すように、PLC型光スプリッタの光回路の初段のY分岐を2x2方向性結器に置き換え、下り信号と映像信号を別々のポートから入射することで、映像信号を合波と光信号の分機機能を同時に実現することができる。この際、映像信号入射ポートに流れる上り信号は光フィルタで遮断される。

光ネットワークの途中で映像信号を合波する場合は、図4

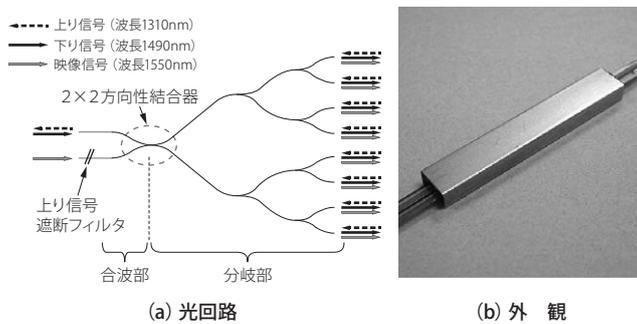


図14 合波一分岐光スプリッタ

に示した誘電体多層膜光フィルタが多く用いられている。通常、誘電体多層膜光フィルタは単車型デバイスであるが、PLCチップに誘電体多層膜を埋め込んだ高集積化映像信号合波フィルタも開発されている⁽⁸⁾。図15に、その構造を示す。共通ポートと反射ポートからなる光回路分岐部を有するPLCチップ (PLC-1) と共通ポートに対向する透過ポートを有するPLCチップ (PLC-2) の間に誘電体多層膜が接着固定されている。上り信号 (波長1310nm) は共通ポートから入射し誘電体多層膜を透過し透過ポートへ、逆に下り信号 (波長1490nm) は透過ポートから共通ポートへ伝搬する。映像信号 (波長1550nm) は、反射ポートから入射し誘電体多層膜で反射し共通ポートへ合波される。図16は、その特性例

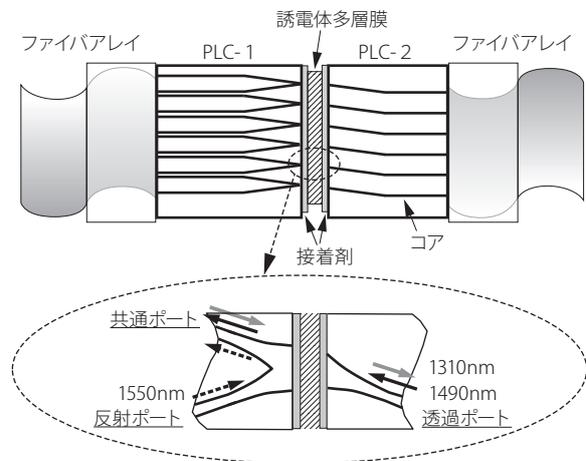


図15 高集積PLC型光フィルタ

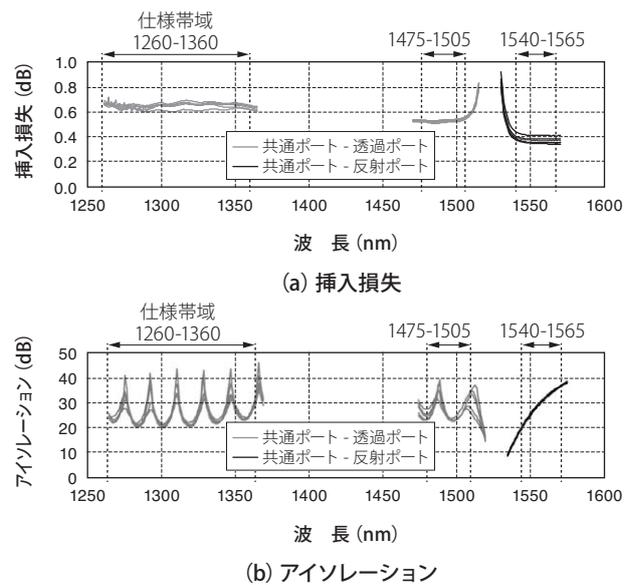


図16 高集積PLC型光フィルタの特性例

である。これまでに6心の光フィルタ素子がPLCチップに集積されたとの結果が報告されている⁽⁸⁾。

3-3 光監視システムのための光受動部品技術 光ネットワークを保守・監視のための監視光（波長1650nm帯）は、図13に示すように局内に設置されたOTDR^{*2}から心線選択スイッチ、カプラユニットを介して本線の光ファイバに導かれる。カプラユニット内には監視光を合流するPLC型光カプラあるいはファイバ溶融型光カプラが収納されている。局内設備では、非常に多くの光ファイバを制限された空間内に高密度で収納することが必要なことから、PLC型やテープ型光ファイバカプラのような高集積化に適した多心型光部品が主流となっている。このOTDR用光源および端末フィルタにはファイバグレーティングが活用されている。

ファイバグレーティングを半導体レーザーの外部共振器ミラーに適用することで半導体レーザーの発振波長の安定化や発振スペクトル線幅の制御が可能となる。その基本構成を図17に示す⁽⁸⁾。半導体光増幅器（SOA: Semiconductor Optical Amplifier）チップの後端面と短周期グレーティング間で共振器が構成され、SOA発振波長はグレーティングのブラッグ波長によって固定される。OTDR用途の場合は、干渉ノイズを抑えるためにスペクトル幅をあえて広げることがある。スペクトル幅を広げるためには、グレーティング長をできるだけ短くする、或いはグレーティング周期をファイ

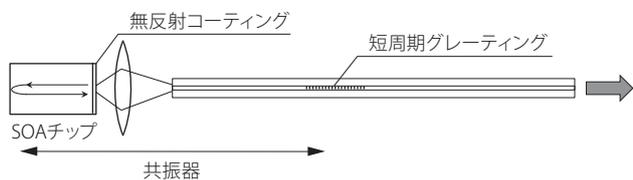


図17 ファイバグレーティング外部共振器レーザー

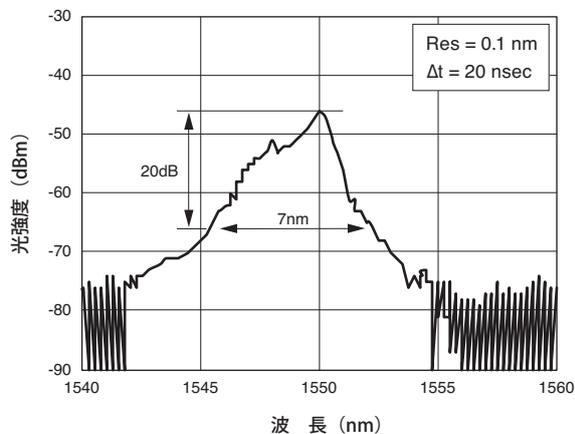


図18 ファイバグレーティング外部共振器レーザーの出力スペクトル

バ長手方向に徐々に変化させたチャープグレーティングを用いる等の手法がある。図18にはチャープグレーティングを用いた外部共振器レーザーの出力スペクトルの例を示す。20dBダウンの線幅は7nmまで拡大されている。

監視光がユーザ宅まで届いていることが確認できるよう、ユーザ宅の端末には監視光を反射する端末フィルタが設置される。端末フィルタは、監視光がユーザ宅の伝送装置（ONU）に届かぬよう遮断する機能も有している。当初、端末フィルタとしては、ONUに光ファイバを繋ぎこむSC型光コネクタ内のフェルールに溝加工し誘電体多層膜を挿入・接着固定したファイバ埋め込み型光フィルタが用いられていたが、FTTHネットワーク建設の本格化以降は、ファイバグレーティング内蔵光コネクタが取って代わった。ファイバグレーティング内蔵光コネクタ⁽¹⁰⁾の構造を図19に、その透過/反射特性例を図20に示す。監視光の波長変動を考慮し反射/透過帯域幅を広げるために、ファイバグレーティングにはチャープグレーティングが用いられる。ファイバグレーティングはコネクタのフェルール内に挿入され接着固定される。ファイバグレーティングは90%以上の高い反射率を容易に実現できるとともに、製造性/経済性の面でも誘電体多層膜に比べ有利である。さらに最近では、ファイバグレーティングを内蔵した現地付けコネクタが端末フィルタの主流となっている。

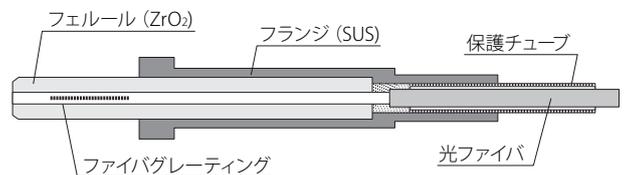


図19 ファイバグレーティング内蔵光コネクタ

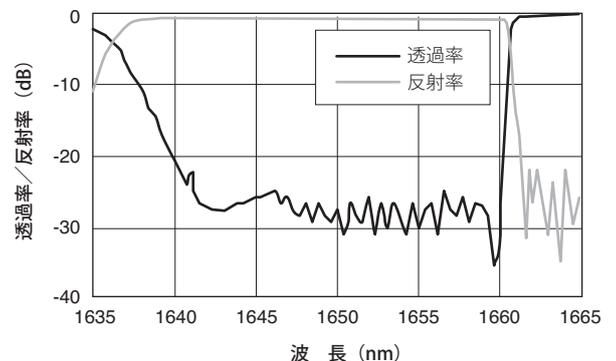


図20 1650nm帯遮断ファイバグレーティング内蔵光コネクタの透過/反射スペクトル特性

4. 結 言

光受動部品について技術の要点とFTTHネットワークでの活用形態について紹介した。光受動部品の活躍の場としては、FTTHネットワークとともに、幹線系光ネットワークがある。1980年代末から1990年代半ばにかけて、光ファイバ増幅器と高密度波長多重方式の出現は、幹線系光ネットワークに革新的な性能向上をもたらした。これらの実用化においても光受動部品の果たした役割は大きい。今後とも光受動部品の重要性は変わらない。低コスト化と信頼性という命題に格闘しつつ、新たな技術開発に取り組んでいきたい。

執 筆 者

金森 弘雄 : シニアスペシャリスト
光通信研究所 主幹
光通信用光受動部品およびサブシステム
製品の開発に従事



用 語 集

※1 PLC

Planar Lightwave Circuit : 石英ガラスやシリコン基板表面に形成した石英系光透過性膜にフォトリソグラフィやドライエッチングといった半導体プロセス技術を利用して光回路を形成したもの。

※2 OTDR

Optical Time Domain Reflectometer : 光ファイバ端からパルス光を入射し、光ファイバの長手方向の各点より反射した光が戻って来るまでの時間とそのパワーから、光ファイバの損失の分布を測定する装置。

参 考 文 献

- (1) 福岡真澄、部龍彦、菅沼寛、服部知之、重松昌行、滝本弘明、「光ファイバ型受動素子の開発」、住友電気、第136号、pp.60-67、(Mar. 1990)
- (2) 石黒洋一、笹岡英資、小林勇仁、守屋知巳、瀬村滋、横田弘、脇之園敏行、山田義明、坂田康夫、「テープ型光ファイバカプラー」、住友電気、第145号、pp.16-19 (Sep. 1994)
- (3) 金森弘雄、「FTTHを実現する光受動部品技術」、OPTRONICS、No.297、pp.135-139 (Sep. 2006)
- (4) 金森弘雄、「ファイバグレーティング」、電子情報通信学会誌、Vol.82、No.7、pp.731-739 (Jul. 1999)
- (5) 井上享、岩島徹、酒井和明、伊藤達也、角井素基、榎本正、金森弘雄、「WDM伝送用ファイバグレーティングの開発」、SEIテクニカルレビュー、第152号、pp.30-35 (Mar. 1998)
- (6) ITU-T G.984.1/ITU-T G.984-2
- (7) IEEE Std802.3ah-2004
- (8) 春本道子、島川修、高橋健一郎、佐野知巳、片山誠、「1心3波多重FTTH用多チャンネルWDMフィルタの開発」、SEIテクニカルレビュー、第170号、pp.6-10 (Jan. 2007)
- (9) M. Shigehara, A. Inoue and H. Maki, "Wavelength Stabilized and Narrow Bandwidth Light Source for OTDR," OECC'97 Tech Dig., 9D1-3, pp.210-211 (Jul. 1997)
- (10) 松浦一郎、酒井和明、井上享、金森弘雄、牧久雄、「1.65μm光遮断ファイバグレーティング内蔵SCコネクタ」、信学総大、B-10-23 (Sep. 1998)