

# FTTHの映像配信サービスに向けたPLC-MZI型3波多重広帯域WDMフィルタアレイ

## PLC-MZI-Type 3-Wavelength Wideband WDM Filter Array for FTTH Video Distribution Services

奈良一孝\*      長谷川 淳一\*      津田寿昭\*  
 Kazutaka Nara      Junichi Hasegawa      Toshiaki Tsuda

**概要** 近年、FTTHが急速に普及する中、データ伝送サービスだけでなく、映像配信サービスを同時に実現するB-PONシステムが提案されている。このシステムでは、ITU-T G.983.3で国際標準化された1.31, 1.49, 1.55  $\mu\text{m}$ の新波長アサインを適用するため、これら3波長を合分波する経済的かつ高機能のWDMフィルタが必要である。特にセンターオフィス内ではこのWDMフィルタをアレイ化したコンパクトなWDMモジュールが要求される。そこで、我々は石英系PLC技術によりマッハツェンダー干渉計をベースとした新しい光回路構成を用いたPLC-MZI型3波多重広帯域WDMフィルタの8chアレイを開発し、挿入損失1.96 dB以下、損失リップル0.77 dB以下、アイソレーション32 dB以上という良好な特性が得られた。

### 1. はじめに

近年、インターネットは一般家庭にも普及し、ADSLやFTTHによる常時接続、メガクラスの伝送スピード、月額数千円といった高速かつ低価格なサービスが浸透し、ブロードバンドならではの大容量コンテンツ配信やビデオチャット等が普及しつつある。

このようなブロードバンド化に向けて、ピーク時100 Mbpsの高速データ通信と最大500chの多チャンネル映像配信を1心の光ファイバで同時に提供できるB-PON (broadband-passive optical network) システムがITU-T G.983.3にて世界標準とされた。構成例<sup>1)</sup>を図1に示す。

このシステムの特徴は新しい光波長配置により高速データ通信の送受信で使用している2つの波長に加え、更にもう1つの

光波長を重畳して、多チャンネルの映像配信を同時に視聴できる点である。通常、送受信する高速データ通信波長は下りが1.49  $\mu\text{m}$ 帯 (1.48 ~ 1.50  $\mu\text{m}$ ), 上りが1.31  $\mu\text{m}$ 帯 (1.26 ~ 1.36  $\mu\text{m}$ ) であり、EDFAの増幅帯である1.55  $\mu\text{m}$ 帯 (1.55 ~ 1.56  $\mu\text{m}$ ) で映像データの配信を行う。そのため、1心の光ファイバに高速データ通信波長と映像信号波長の3波長を同時に合分波するWDM (wavelength division multiplexing) フィルタが必要である。このWDMフィルタとして過去に、様々な検討がなされている。最も一般的なものでは誘電体多層膜フィルタを適用したもので、低損失、広帯域動作等良好な特性<sup>2)</sup>が報告されているが、特にセンターオフィス内では経済化のためにアレイ化が望まれており、その要求に対して十分ではない。

一方、アレイ化の観点では平面光波回路 (silica-based planar lightwave circuits) 技術を応用したWDMフィルタが有望である。これまでいくつかの方法が検討されている。その中の1つとして石英系PLCで形成された交差導波路の交点に誘電体多層膜フィルタを挿入したWDMフィルタ<sup>3)</sup>が検討されている。しかしながら、フィルタ挿入のためのスリット形成、並びにフィルタ挿入・固定といった工程の煩雑さがあり、やはり経済化という観点では十分でない。また特性面でも低損失・低損失リップルが実現できる半面、誘電体多層膜フィルタの特性上、反射ポートのアイソレーションが20 dB以下と不十分であるといった問題がある。

もう1つの方法としてマッハツェンダー干渉計 (Mach Zehnder interferometer : MZI) を基本としたWDMフィルタ<sup>4), 5)</sup>が検討

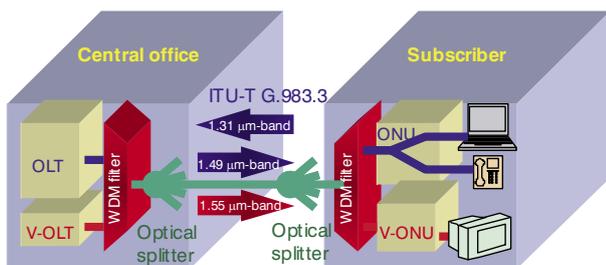


図1 B-PONシステムの構成例  
 Structure of typical B-PON system.

\* 研究開発本部 ファイナルフォトリクス研究所

されている。一般にPLC-MZI型WDMフィルタは、その光回路のみで特性を実現するため上記のように追加の工程等は必要がなく、経済化の観点では最も適した方法であると思われる。しかしながら広帯域と同時に通過帯における損失リップルの劣化や、遮断帯におけるアイソレーションの劣化が顕著であり、実用的な特性を得るためには改善が必要である。そこで本稿では、MZIを基本とした新規の光回路を提案し、その設計について詳細に述べる。更に提案する光回路を用いて低損失・低損失リップル・高アイソレーションを有するPLC-MZI型3波多重広帯域WDMフィルタ8chアレイの作製を行った結果について報告する。

## 2. 光回路構成と設計

### 2.1 PLC-MZI型広帯域WDMフィルタの構成と定式化

はじめに、提案するPLC-MZI型広帯域WDMフィルタの構成を図2に示す。同一の4つの方向性結合器と2つの異なる位相シフタからなるカスケードMZIをその出力導波路に対し、点対称に接続した光回路で構成される。

続いて、具体的な光回路設計のための定式化を行う。まず、上記のWDMフィルタ回路を図3に示すように各要素光回路に分解する。すなわち光カプラS<sub>1</sub>をその出力導波路に対し、完全点対称に接続し、その光カプラS<sub>1</sub>は、光カプラS<sub>3</sub>をその出力導波路に対し、位相部T<sub>φ1</sub>を介在させ点対称接続し、更に光カプラS<sub>3</sub>は2つの同一の方向性結合器S<sub>5</sub>と位相部T<sub>φ0</sub>とで構成されるPLC-MZIとみなす。

次に、PLC-MZI型広帯域WDMフィルタの定式化を行う。図3よりPLC-MZI型広帯域WDMフィルタは図4のように模式的に表せる。

光カプラS<sub>1</sub>を完全点対称接続した場合の伝達行列は、

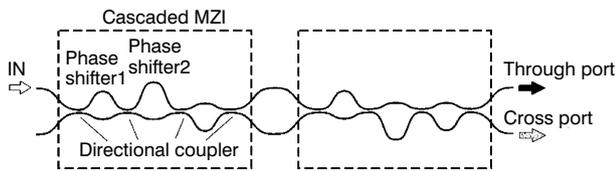


図2 提案するPLC-MZI型広帯域WDMフィルタの光回路構成 Schematic optical circuit configuration for proposed PLC-MZI-type wideband WDM filter.

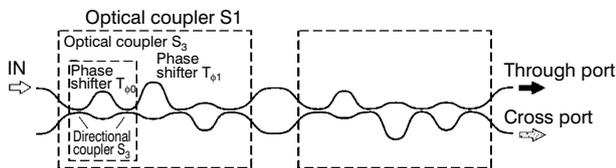


図3 PLC-MZI型広帯域WDMフィルタの各要素回路への分解 Break-down of optical circuit for PLC-MZI-type wideband WDM filter into component elements.

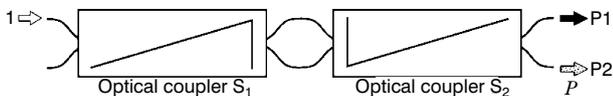


図4 PLC-MZI型広帯域WDMフィルタの回路模式図 Circuit arrangement for PLC-MZI-type wideband WDM filter.

$$S_1 = \begin{pmatrix} a & -b^* \\ b & a^* \end{pmatrix}, S_2 = \begin{pmatrix} a^* & -b^* \\ b & a \end{pmatrix}, |a|^2 + |b|^2 = 1$$

として、

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} = S_2 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} S_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^*a - b^*b \\ 2ab \end{pmatrix} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、\*は複素共役を表す。よってクロスポートの光強度、すなわちPLC-MZI型広帯域WDMフィルタの結合効率Pは、

$$|P_2|^2 = P = |2ab|^2 = 4b^2(1-b^2) = 4\eta(1-\eta) \quad (2)$$

で与えられる。ここで、ηは光カプラS<sub>1</sub>の結合効率である。

続いて、図5に光カプラS<sub>1</sub>の回路模式図を示す。

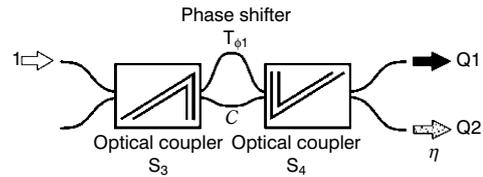


図5 光カプラS<sub>1</sub>の回路模式図 Circuit arrangement for optical coupler S<sub>1</sub>.

光カプラS<sub>3</sub>を位相部T<sub>φ1</sub>を介在させ点対称に接続した場合の伝達行列は、

$$S_3 = \begin{pmatrix} \alpha & -\beta^* \\ \beta & \alpha^* \end{pmatrix}, S_4 = \begin{pmatrix} \alpha^* & -\beta^* \\ \beta & \alpha \end{pmatrix}, |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

かつ

$$T_{\phi_1} = \begin{pmatrix} e^{-j\frac{\phi_1}{2}} & 0 \\ 0 & e^{j\frac{\phi_1}{2}} \end{pmatrix}$$

として、

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} = S_4 T_{\phi_1} S_3 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\alpha|^2 e^{-j\frac{\phi_1}{2}} - |\beta|^2 e^{j\frac{\phi_1}{2}} \\ 2\alpha\beta \cos \frac{\phi_1}{2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、φ<sub>1</sub>は位相部T<sub>φ1</sub>の位相シフト量である。よってクロスポートの光強度、すなわち光カプラS<sub>1</sub>の結合効率ηは、

$$\begin{aligned} |Q_2|^2 = \eta &= \left| 2\alpha\beta \cos \frac{\phi_1}{2} \right|^2 = 4\beta^2(1-\beta^2) \cos^2 \frac{\phi_1}{2} \\ &= 4C(1-C) \cos^2 \frac{\phi_1}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

で与えられる。ここで、Cは光カプラS<sub>3</sub>の結合効率である。

続いて、図6に光カプラS<sub>3</sub>の回路模式図を示す。

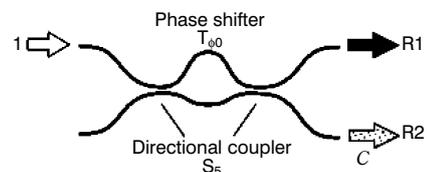


図6 光カプラS<sub>3</sub>の回路模式図 Circuit arrangement for optical coupler S<sub>3</sub>.

上記と同様に、クロスポートの光強度、すなわち光カプラS<sub>3</sub>の結合効率Cは、

$$|R_2|^2 = C = 4\kappa(1-\kappa)\cos^2\frac{\phi_0}{2} \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 $\kappa$ は方向性結合器S<sub>5</sub>の結合効率、 $\phi_0$ は位相部T<sub>φ0</sub>の位相シフト量である。

以上の議論から式(2)、(4)、(5)を用いてPLC-MZI型広帯域WDMフィルタの特性が表現できる。

### 2.2 PLC-MZI型3波多重広帯域WDMフィルタの設計

次に、PLC-MZI型広帯域WDMフィルタにより構成される3波多重広帯域WDMフィルタの設計を行う。

はじめにスルーポートに $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 、 $1.49 \mu\text{m}$ の光が出力すると設定する。式(2)より、

$$P \approx 0 \Leftrightarrow 4\eta(1-\eta) \approx 0 \Leftrightarrow \eta \approx 0 \text{ or } \eta \approx 1 \quad (6)$$

が得られる。

まず $\eta \approx 1$ の場合を考える。この場合、式(4)より、 $4C(1-C) \approx 1$ かつ $\cos^2(\phi_1/2) \approx 1$ を同時に満たす必要がある。今、 $4C(1-C) \approx 0.99$ 、 $\cos^2(\phi_1/2) \approx 0.99$ と設計値から各パラメータが1%ずれた場合を考えると、 $\eta \approx 0.98$ となり設計値より2%ずれることになる。

次に $\eta \approx 0$ の場合を考える。この場合、式(4)より $4C(1-C) \approx 0$ または $\cos^2(\phi_1/2) \approx 0$ のどちらかを満たせばよいが、これらを同時に満たす場合はより安定な特性が得られる。例えば $4C(1-C) \approx 0.01$ 、 $\cos^2(\phi_1/2) \approx 0.01$ 、と設計値から各パラメータが1%ずれた場合でも、 $\eta \approx 0.0001$ となり、設計値より0.01%とほとんどずれを生じないことが分かる。更にこの効果は、波長による $\eta$ の変化を鈍くすることになり帯域が拡大される。以上より第1の条件として $\eta \approx 0$ すなわち、

$$\left. \begin{array}{l} 4C(1-C) \approx 0 \\ \text{かつ} \\ \cos^2\left(\frac{\phi_1}{2}\right) \approx 0 \Leftrightarrow \phi_1 \approx (2m+1)\pi \\ @\lambda = 1.31 \mu\text{m}, 1.49 \mu\text{m} \end{array} \right\} \quad (7)$$

が得られる。続いて、式(7)の前半の $4C(1-C) \approx 0$ を考える。式(6)同様 $C \approx 0$ または $C \approx 1$ が得られるが、上記の議論から $C \approx 0$ を選択する。ここで、3波多重広帯域WDMフィルタの設計を行う場合、特に $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ で $\pm 50 \text{ nm}$ の非常に広帯域が要求される。そこで今回、 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ に限り、 $C \approx 0$ を満たすように設定し、この波長域における広帯域化を促進する。すなわち、式(5)から第2の条件として、

$$\left. \begin{array}{l} 4\kappa(1-\kappa) \approx 0 \\ \text{かつ} \\ \cos^2\left(\frac{\phi_0}{2}\right) \approx 0 \Leftrightarrow \phi_0 \approx (2n+1)\pi \\ @\lambda = 1.31 \mu\text{m} \end{array} \right\} \quad (8)$$

が得られる。続いて、式(8)の前半の $4\kappa(1-\kappa) \approx 0$ から、 $\kappa \approx 0$ または $\kappa \approx 1$ が得られる。この場合は、どちらを使用してもかまわないが、一般に方向性結合器は結合部長の長尺化に伴い作製誤差に弱くなることから、ここでは $\kappa \approx 0$ を選択する。

以上から、スルーポートに対する設計条件を整理すると、

$$\left. \begin{array}{l} \cos^2\left(\frac{\phi_1}{2}\right) \approx 0 \Leftrightarrow \phi_1 \approx (2m+1)\pi \\ @\lambda = 1.31 \mu\text{m}, 1.49 \mu\text{m} \\ \cos^2\left(\frac{\phi_0}{2}\right) \approx 0 \Leftrightarrow \phi_0 \approx (2n+1)\pi \\ @\lambda = 1.31 \mu\text{m} \\ \kappa \approx 0 \\ @\lambda = 1.31 \mu\text{m} \end{array} \right\} \quad (9)$$

を同時に満たすことが条件となる。ここで $m, n$ は整数である。

次にクロスポートに $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ の光が出力すると設定する。式(2)から

$$P \approx 1 \Leftrightarrow 4\eta(1-\eta) \approx 1 \Leftrightarrow \eta \approx 0.5 \quad (10)$$

が得られる。ここで、式(4)、(5)、(9)、(10)より

$$\left. \begin{array}{l} \kappa \approx \frac{1}{2} \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{C}{\cos^2(\phi_0/2)}} \right\} \\ @\lambda = 1.55 \mu\text{m} \end{array} \right\} \quad (11)$$

が得られる。ここで、

$$\left. \begin{array}{l} C \approx \frac{1}{2} \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{0.5}{\cos^2(\phi_1/2)}} \right\} \\ @\lambda = 1.55 \mu\text{m} \end{array} \right\} \quad (12)$$

で与えられる。

以上をまとめると、式(9)から $\phi_1 = 23\pi, 21\pi$ (各 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}, 1.49 \mu\text{m}$ )が得られる。ここで位相部T<sub>φ1</sub>の導波路長を $\Delta L_1$ 、コアの等価屈折率を $n_{\text{eff}}$ とすると位相シフト量 $\phi_1 = (2\pi/\lambda)n_{\text{eff}}\Delta L_1$ と表されるので、これより $\Delta L_1 = 10.87 \mu\text{m}$ と求められる。同様に、位相部T<sub>φ0</sub>の導波路長 $\Delta L_0$ とすると、位相シフト量 $\phi_0 = (2\pi/\lambda)n_{\text{eff}}\Delta L_0$ と表されるので、式(8)から $\Delta L_0 = 3.18 \mu\text{m}$ と求められる。これらの位相シフト量の値と式(11)、(12)より、 $\kappa = 0.008, 0.026, 0.040$ (各 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}, 1.49 \mu\text{m}, 1.55 \mu\text{m}$ )を有する方向性結合器を選択した。

続いて、求めた回路パラメータを元に計算したPLC-MZI型3波多重広帯域WDMフィルタの波長特性を図7に示す。

この図より、 $1.31 \mu\text{m}$ 帯、 $1.49 \mu\text{m}$ 帯の光がスルーポートに、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の光がクロスポートに出力され、かつ $1.31 \mu\text{m}$ 帯で広帯域動作を実現していることが分かる。更に、各帯域において、低損失リップル特性が得られていることが分かる。

### 2.3 高アイソレーション化の設計

上記の結果より、提案した新規光回路を用いることにより広帯域かつ低損失リップル動作が実現できた。しかしながら各帯域でのアイソレーションを見てみると、 $15 \sim 20 \text{ dB}$ 程度と必ずしも十分でないことが分かる。そこで、図8に示す光回路構成を用いることにより高アイソレーションを実現することを検討した<sup>5)</sup>。まず、スルーポート、クロスポートともに同一のPLC-MZI型広帯域WDMフィルタを2回通過するダブルパス構成を採用した。

ダブルパス構成を用いた波長特性の計算結果を図9に示す。

この図より、 $1.31 \mu\text{m}$ 帯、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯いずれも $35 \text{ dB}$ 以上の

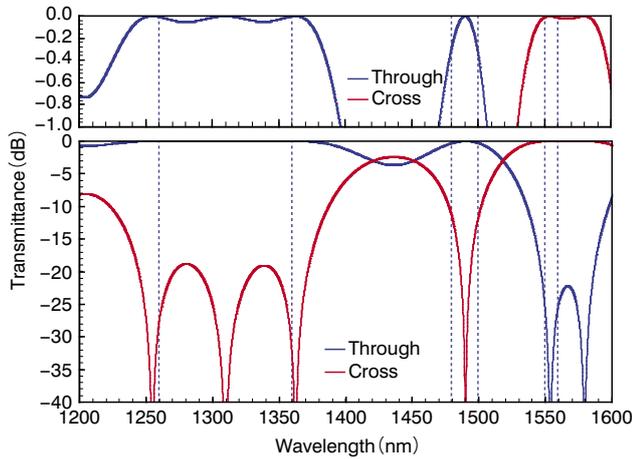


図7 PLC-MZI型3波多重広帯域WDMフィルタの波長特性計算結果  
Calculated wavelength response of PLC-MZI-type 3-wavelength wideband WDM filter.

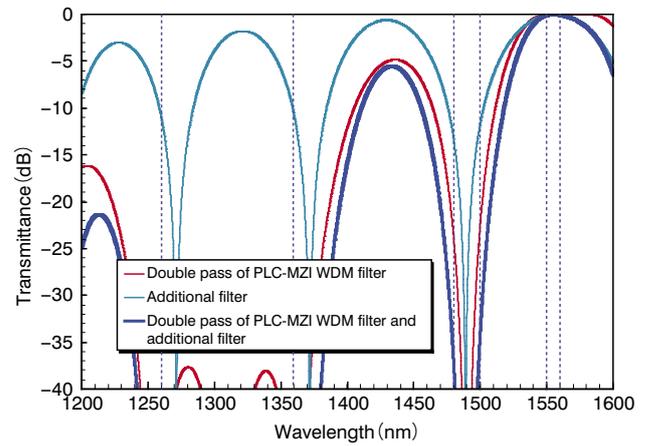


図10 付加的フィルタを用いた波長特性計算結果  
Calculated wavelength response using additional filter.

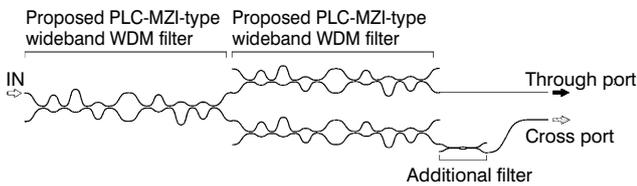


図8 高アイソレーションを実現するための光回路構成  
Schematic configuration for achieving high isolation.

アイソレーションを実現できるが、一方、1.49  $\mu\text{m}$ 帯に対しては $\sim 22$  dB程度とまだ十分でない。そこで、更にクロスポートに対してMZIで構成される付加的フィルタを適用することにより1.49  $\mu\text{m}$ 帯のアイソレーション向上を図った。図10に付加的フィルタを用いた波長特性の計算結果を示す。

この図より、1.49  $\mu\text{m}$ 帯で谷を有する波長特性の付加的フィルタを用いることでダブルパス構成のみと比較し、1.49  $\mu\text{m}$ 帯のアイソレーションを誇張することができる。

#### 2.4 光ファイバとの接続損失低減化の設計

続いて低損失化を促進するため、光ファイバとの接続損失を抑制する手段を講じる。上記PLC-MZI型3波多重広帯域WDMフィルタはその回路規模が大きく、比屈折率差を高めた0.8%  $\Delta$

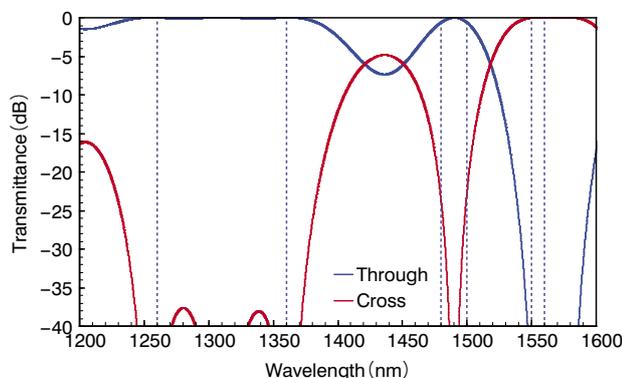


図9 ダブルパス構成を用いた波長特性計算結果  
Calculated wavelength response using double-pass configuration.

石英系PLCでの作製を行うことを前提として検討を進める。そこで使用する入出力光ファイバを分散シフトファイバ(DSF)とし、更に石英系PLCの入出力端に横方向テーパ導波路を導入することにより光ファイバとの接続損失の低減を図った。構成図を図11に示す。

続いてテーパ導波路の幅 $W_T$ に対する接続損失の計算結果を図12に示す。

この図より、DSFを使用しかつ幅8.75  $\mu\text{m}$ のテーパ導波路を適用することにより、通常のSMF接続に比べ、計算上 $\sim 0.4$  dB/facet程度の接続損失の低減が期待できる。

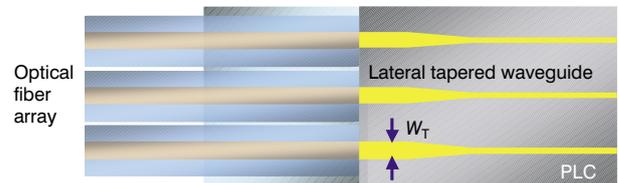


図11 PLC-光ファイバ入出力部分の構成図  
Schematic configuration of interface between PLC and I/O optical fibers.

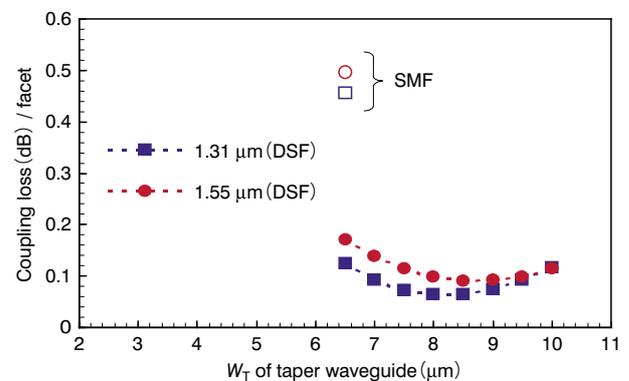


図12 テーパ導波路の幅 $W_T$ と接続損失の関係  
Relationship between taper waveguide width  $W_T$  and coupling loss.

### 3. 作製結果

上記2章の議論を元に、火炎堆積法・フォトリソグラフィ・反応性イオンエッチングを組み合わせた通常の石英系PLC作製技術を用いて、Si基板上に低損失・低損失リップル・高アイソレーションを有するPLC-MZI型3波多重広帯域WDMフィルタ8chアレイを作製した。光導波路レイアウト図を図13に示す。

各種レファレンス用光回路を含んでもチップサイズ63×5.6 mm<sup>2</sup>と小型に作製できていることが分かる。また、作製したモジュールの概観写真を図14に示す。

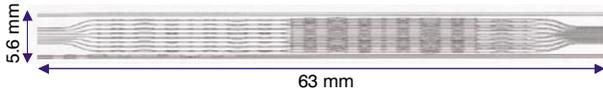


図13 PLC-MZI型3波多重広帯域WDMフィルタ8chアレイの光導波路レイアウト  
Waveguide layout for 8-ch PLC-MZI-type 3-wavelength wideband WDM filter array.



図14 作製したモジュールの概観写真  
Fabricated module.

続いて、波長特性評価結果を示す。測定は広帯域光源を用いた光スペクトラムアナライザで行った。はじめに計算値と測定値の比較を行い、設計の妥当性の確認を行った。図15には8chアレイの内、7番目の光回路の測定結果と同時に、計算結果も合わせて示す。

この図より、計算結果と測定結果は、良好な一致を示していることが分かる。これにより本設計の妥当性が確認できた。

続いて、図16に全8chの波長特性評価結果を示す。また、表1にはその光学特性のまとめを示す。これらの結果から、対応する波長帯域すなわち1.31 μm帯(1.26～1.36 μm)、1.49 μm帯(1.48～1.50 μm)、1.55 μm帯(1.55～1.56 μm)及び、全8chにおいて挿入損失1.96 dB以下、損失リップル0.77 dB以下、IN-Throughポート間及び、IN-Crossポート間のアイソレーション32 dB以上、Through-Crossポート間のアイソレーション50 dB以上の良好な特性が得られた。

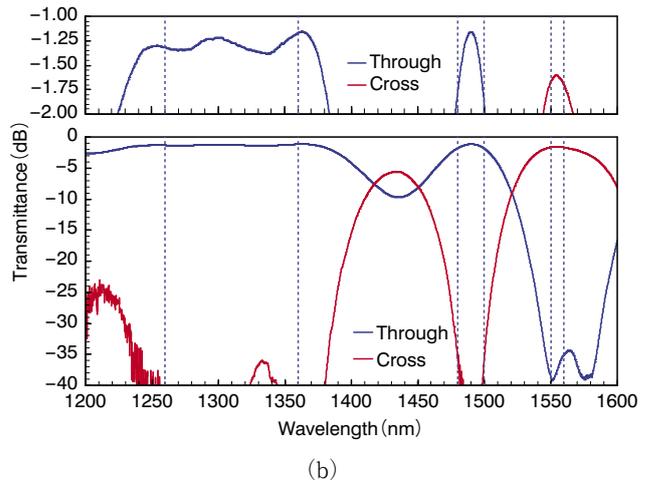
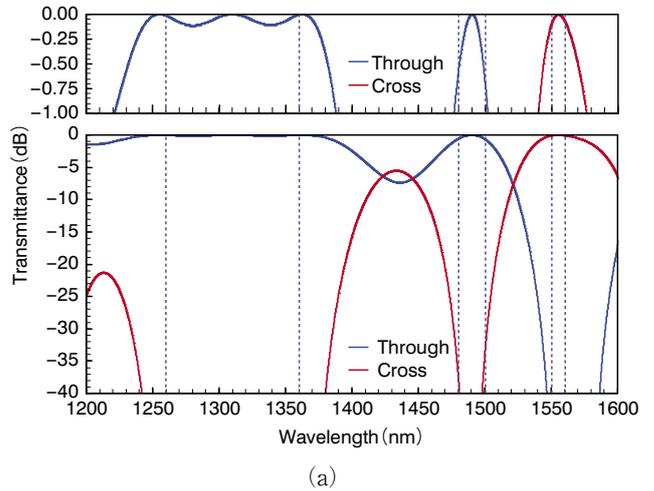


図15 計算結果(a)と測定結果(b)の比較  
Comparison of calculated and measured results for wavelength response of the 7th of 8 channels.

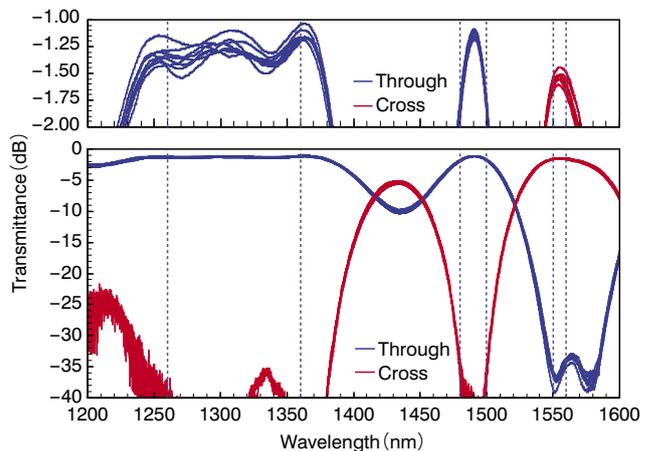


図16 作製したPLC-MZI型3波多重広帯域WDMフィルタ8chアレイモジュールの波長特性測定結果  
Measured wavelength response of all 8 channels of the PLC-MZI-type 3-wavelength wideband WDM filter array module.

**表1** 作製したPLC-MZI型3波多重広帯域WDMフィルタ8chアレイモジュールの光学特性  
Summary of optical properties of fabricated 8-ch PLC-MZI-type 3-wavelength wideband WDM filter array module. (dB)

	Meas. (Worst)	Meas. (Best)	Meas. (Avg)	Design
1.31 μm passband (1.26 ~ 1.36 μm)				
Ins. loss	1.54	1.32	1.42	—
Loss ripple	0.38	0.20	0.26	0.12
Isolation (IN-Cr)	33.6	34.6	34.0	41.0
Isolation (Th-Cr)	>50.0	>50.0	>50.0	—
1.49 μm passband (1.48 ~ 1.50 μm)				
Ins. loss	1.96	1.75	1.85	—
Loss ripple	0.77	0.65	0.71	0.67
Isolation (IN-Cr)	32.1	34.4	33.3	34.2
Isolation (Th-Cr)	>50.0	>50.0	>50.0	—
1.55 μm passband (1.55 ~ 1.56 μm)				
Ins. loss	1.71	1.53	1.63	—
Loss ripple	0.13	0.08	0.10	0.09
Isolation (IN-Th)	32.0	33.1	32.2	45.0
Isolation (Th-Cr)	>50.0	>50.0	>50.0	—

#### 4. おわりに

FTTHの映像配信サービスに向け、我々は経済化の観点から石英系PLC技術により、マツハツェンダー干渉計をベースとした新しい光回路構成を用いたPLC-MZI型3波多重広帯域WDMフィルタの8chアレイを開発した。その結果、対応する全波長帯域及び、全8chにおいて挿入損失1.96 dB以下、損失リップル0.77 dB以下、アイソレーション32 dB以上という良好な特性を得た。

#### 参考文献

- 1) Y. Maeda, K. Okada, and D. Faulkner: "FSAN OAN-WG and future issues for broadband optical access networks," IEEE Communication Magazine, Dec., (2001), 126.
- 2) 西脇賢治, 野口善清, 松浦隆明, 細谷英行: 「アクセス系向け簡易構造WDM部品の開発」, 電子情報通信学会2003年ソサイエティ大会, C-3-101.
- 3) M. Yanagisawa, Y. Inoue, M. Ishii, T. Oguchi, Y. Hida, H. Izumita, N. Araki, and T. Sugie: "Low-loss and compact TFF-embedded silica-waveguide WDM filter for video distribution services in FTTH systems," OFC2004, Technical Digest TuI4.
- 4) Y. Hida, N. Takato, and K. Jinguji: "Wavelength division multiplexer with wide passband and stopband for 1.3 μm/1.55 μm using silica-based planar lightwave circuit," Electron. Lett., **35** (1996), 1377.
- 5) K. Nara, H. Urabe, J. Hasegawa, N. Matsubara, and H. Kawashima: "1.26-1.56 μm/1.65 μm ultra-wide band WDM filter with high isolation using silica-based planar lightwave circuit," OECC2004, Technical Digest 15F-1-5, 722.