

## 波長多重用プレーナー光波回路

鈴木 扇 太

一度に大量の情報を扱うマルチメディア時代を迎え、高速で広帯域な信号伝送を可能とする光通信網が新インフラストラクチャーとして整備されつつある。そのシステム構成も、従来の1本の光ファイバーに1波長の光信号を伝送する形態から、1本の光ファイバーに異なる波長の光信号を多重伝送して光ファイバーの帯域を有効に利用する光波長多重伝送(光WDM: optical wavelength division multiplexing)システムへ急速に展開しつつある。光WDMシステムは、伝送容量を増大できる<sup>1)</sup>だけでなく、送信する波長制御により送信先を選択できる光波長ルーティング機能など柔軟なネットワーク構成<sup>2)</sup>が可能であり期待されている。

光WDMシステム構成には、異なる波長の光信号を1本の光ファイバーに合波または分波する光合分波回路が必要不可欠である。そのため様々な形態の光部品が開発されているが、その中でも石英系プレーナー光波回路(PLC: planar lightwave circuit)技術<sup>3)</sup>を用いた構成が安定性や量産性の点で優れている。

本稿では、石英系プレーナー光波回路と波長多重用光部品への応用例について、その最新動向を解説する。

### 1. 石英系光導波路

PLCを構成する導波路として、SiO<sub>2</sub>をベースとした石英系光導波路の研究開発がいちばん活発である。これは石英ガラスが物理的、化学的に安定で、かつ、光ファイバーとの整合がよいことや、明確な導波路構造により理論設計とよい一致を示すなどの多くの利点による。

石英系光導波路の作製方法として、スパッタ法、化学気相成長法(CVD: chemical vapor deposition)、真空蒸着法<sup>4)</sup>が検討されている。その中でも、光ファイバー作製方法の応用である火炎堆積法(FHD: flame hydrolysis deposition)は、導波路形成に必要な低損失な厚膜(6~10 μm)ガラスを堆積するのに適している<sup>5)</sup>。さらに、反応性イオンエッチング法(RIE: reactive ion etching)との組み合わせにより精密な導波路パターン加工が可能である。

図1に、石英系導波路作製プロセスを示す。まず、FHD法によりSiまたは石英基板上にガラス微粒子を堆積し、SiO<sub>2</sub>下部クラッド層とSiO<sub>2</sub>-GeO<sub>2</sub>コア層を形成する。その後、基板を1000°C以上に加熱して、ガラス膜を溶融し透明化する。次に、RIEを用いて所望の導波路パターンを形成し、再びFHD法を用いて上部クラッドでコア部を覆い、埋め込み型単一モード導波路が完成する。

表1にNTTで開発された石英系光導波路を示す。導波路の最小曲がり半径やファイバー接続損失は比屈折率差 $\Delta$ に大きく依存するため、応用回路の種類や規模に合わせて適切な $\Delta$ 値を有する導波路を選択している<sup>6)</sup>。

### 2. 1.3/1.55 μm 光 WDM システム用合分波回路

1.3/1.55 μmの波長を用いる光WDMシステムは、FTTH(fiber-to-the-home)等の光加入者用システムとして開発されている<sup>6)</sup>。光加入者用部品において低コスト化は重要課題であり、回路の小型化が図れるフィルター反射型光合分波回路<sup>7)</sup>の開発が進められている。

図2はフィルター反射型光合分波回路の構成図である。1.3 μm 透過 1.55 μm 反射の誘電体多層膜フィルタ

NTT 光エレクトロニクス研究所 (〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方 162)  
E-mail: ssuzuki@iba.iecl.ntt.co.jp

表1 石英系光導波路.

	低 $\Delta$ 導波路	中 $\Delta$ 導波路	高 $\Delta$ 導波路	超高 $\Delta$ 導波路
比屈折率差 $\Delta$ (%)	0.25	0.45	0.75	1.5
コア寸法 ( $\mu\text{m}$ )	8×8	7.5×7.5	6×6	4.5×4.5
伝搬損失 (dB/cm)	<0.01	0.02	0.04	0.07
ファイバー接続損失 (dB/point)	<0.1	0.1	0.5	2.0(SMF) 0.4(DSF)
最小曲がり半径 (mm)	25	15	5	2
適用分野	小規模 PLC (スプリッター, WINC など)	中規模 PLC 小型スプリッター	大規模 PLC (スターカプラー, 8×8 スイッチなど)	超大規模 PLC 高密度 PLC

(SMF: single mode fiber, DSF: dispersion shifted fiber)

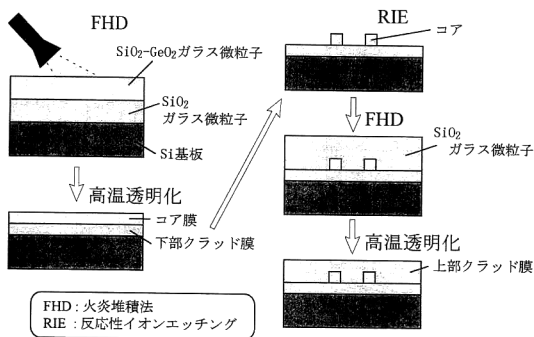


図1 石英系導波路作成プロセス.

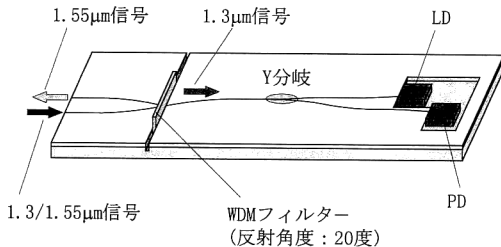


図2 フィルター反射型光合分波回路.

一を PLC 上に形成された溝に挿入して、合分波回路を構成している。厚さ  $14\ \mu\text{m}$  のフィルターが幅  $20\ \mu\text{m}$  の PLC 溝に挿入固定されている。1.3/1.55  $\mu\text{m}$  WDM 信号のうち、1.3  $\mu\text{m}$  の光信号はフィルターを透過して Y 分岐に導かれ、双方向通信用の LD と PD ポートに達する。1.3  $\mu\text{m}$  信号送受信用の LD と PD は PLC 上にハイブリッド集積<sup>9)</sup>される。一方、1.55  $\mu\text{m}$  の光信号はフィルターで反射し、入力ファイバーと同じ端面に位置する出力ファイバーに導かれる。図3にフィルター反射型光合分波回路の波長特性を示す。1.3  $\mu\text{m}$  透過光で挿入損

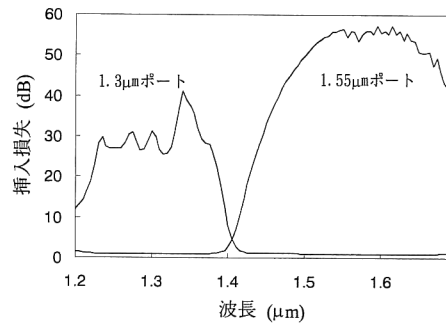


図3 フィルター反射型合分波回路の波長特性.

失 1.0 dB, 1.55  $\mu\text{m}$  反射光で 1.1 dB と良好な特性を得ている。0.45%  $\Delta$  導波路を用いてチップ寸法を  $3 \times 15\ \text{mm}$  に抑えており、従来の 0.25%  $\Delta$  導波路を用いたマッハツェンダー干渉計型<sup>9)</sup>に比べ、合分波回路部分のみで約 50% の小型化を実現している。4 インチウェハーから 100 チップ以上作製でき、コスト低減が可能である。

### 3. アレイ導波路格子型光合分波回路

#### 3.1 アレイ導波路格子

1.55  $\mu\text{m}$  帯を中心とした多波長 WDM システムでは、一度に 8~32 波程度の合分波を行える合分波回路が求められており、その点でアレイ導波路格子 (AWG: arrayed-waveguide grating) 型光合分波回路<sup>10)</sup>は有望である。

図4は AWG 型光合分波回路の構成図であり、複数の入出力導波路、2 個のスラブ導波路および導波路長差  $\Delta L$  を有するアレイ導波路から構成される。アレイ導波路中央にポリイミド  $1/2$  波長板を挿入することにより、導波路複屈折率による偏波依存性を解消している<sup>11)</sup>。

入力導波路から入射した光信号はスラブ導波路内で回

折により広がり、アレイ導波路に同位相で分配される。複数の分配された光信号は、アレイ導波路を伝搬する際に導波路長差  $\Delta L$  に応じた位相差が与えられる。その後、出力側スラブ導波路で互いに干渉して出力導波路に集光する。その際に、アレイ導波路で与えられた位相差により分散が生じるため、各波長に応じて異なる出力導波路に集光する。集光位置の波長依存性は、

$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{fm}{n_s d} \quad (1)$$

$$m = \frac{n_c \Delta L}{\lambda_0} \quad (2)$$

と表される。ここで、 $n_s$  はスラブ導波路実効屈折率、 $n_c$  は導波路実効屈折率、 $d$  はアレイ導波路ピッチ、 $f$  はスラブ導波路焦点距離、 $m$  は回折次数、 $\lambda_0$  は中心波長である。各波長の集光位置に出力導波路を配置することにより、複数の光信号波長を同時に分波することが可能である。また、適切な  $\Delta L$  により角度分散を自由に設定できるため、任意の波長間隔の光合分波回路を実現できる。分波可能な波長数を決める FSR (free spectral range) は、隣り合う回折次数での中心波長間隔より近似的に  $FSR \approx \lambda_0/m$  で与えられる。回折次数  $m$  を適切に設定することにより、所望の波長数と波長間隔を実現

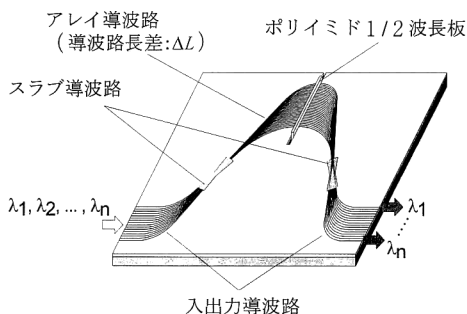


図4 アレイ導波路格子型光合分波回路。

表2 アレイ導波路格子型光合分波回路の特性。

パラメーター	チャンネル間隔 $\Delta\lambda$ (nm), チャンネル数 $N$					
	15	1.6 (200 GHz)	0.8 (100 GHz)	0.2 (25 GHz)	不等間隔 (0.8/0.48)	
	8	8	32	64	128	16
光路長差 $\Delta L$ ( $\mu\text{m}$ )	12.8	84.0	63.0	30.9	63.0	79.21
焦点距離 $f$ (mm)	2.38	11.35	11.35	18.50	36.30	14.42
回折次数 $m$	12	79	59	29	59	74
挿入損失 (dB)	2.4	6.1	2.1	2.8	3.5	2.8
3-dB 通過域幅 FWHM (FWHM/ $\Delta\lambda$ )	6.3 nm (42%)	124 GHz (62%)	40 GHz (40%)	44 GHz (44%)	11 GHz (44%)	30.2 GHz
クロストーク (dB)	< -28	< -27	< -28	< -29	< -16	< -25

することができる。また、AWGは可逆性を有しており、複数の異なる波長信号を1本の光ファイバーに合わせる合波回路としても動作する。

### 3.2 波長特性

表2に、NTTで作製された各種AWG型光合分波回路の特性を示す。波長間隔は15 nmから0.2 nm (25 GHz) のものが作製され、チャンネル数も8から128<sup>12)</sup>まで拡大されている。また、光源の波長変動等に対処するため、平坦で広い通過域特性を有するもの<sup>13)</sup>も開発されている。図5は、波長間隔1.6 nm (200 GHz) でチャンネル数8の平坦通過域を有するAWG型光合分波回路の特性例である。挿入損失は6.1 dB、隣接チャンネルでのクロストークは-27 dB、3 dB通過域幅は124 GHzが得られている。

### 3.3 $N \times N$ 波長選択カプラー

AWGは入出力に複数のポートを有しているため、単純な合分波回路だけでなく  $N \times N$  波長選択カプラーとしても動作する。図6(a)は、その動作機能を  $8 \times 8$  AWGで説明した図である。入力ポートを1チャンネル分シフトすると、それに対応して波長と出力ポートの組み合わせが1チャンネル分逆シフトする。これは、AWGの対称性から容易に理解できる。このように、同じ波長

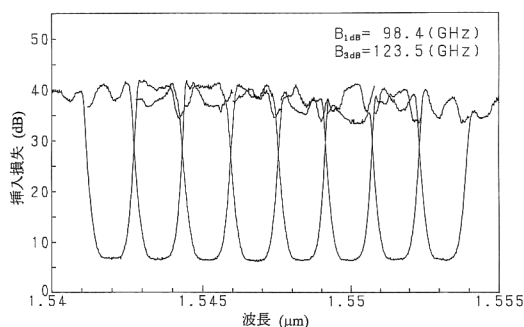
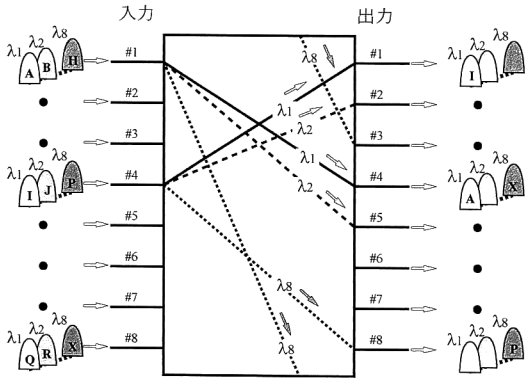


図5 アレイ導波路格子型光合分波回路の波長特性(平坦通過域設計)。



(a)  $N \times N$ 波長選択カプラーの動作原理

出力 λ <sub>出力</sub>	1	2	3	4	5	6	7	8
1	λ <sub>6</sub>	λ <sub>7</sub>	λ <sub>8</sub>	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>	λ <sub>4</sub>	λ <sub>5</sub>
2	λ <sub>7</sub>	λ <sub>8</sub>	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>	λ <sub>4</sub>	λ <sub>5</sub>	λ <sub>6</sub>
3	λ <sub>8</sub>	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>	λ <sub>4</sub>	λ <sub>5</sub>	λ <sub>6</sub>	λ <sub>7</sub>
4	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>	λ <sub>4</sub>	λ <sub>5</sub>	λ <sub>6</sub>	λ <sub>7</sub>	λ <sub>8</sub>
5	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>	λ <sub>4</sub>	λ <sub>5</sub>	λ <sub>6</sub>	λ <sub>7</sub>	λ <sub>8</sub>	λ <sub>1</sub>
6	λ <sub>3</sub>	λ <sub>4</sub>	λ <sub>5</sub>	λ <sub>6</sub>	λ <sub>7</sub>	λ <sub>8</sub>	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>
7	λ <sub>4</sub>	λ <sub>5</sub>	λ <sub>6</sub>	λ <sub>7</sub>	λ <sub>8</sub>	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>
8	λ <sub>5</sub>	λ <sub>6</sub>	λ <sub>7</sub>	λ <sub>8</sub>	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	λ <sub>3</sub>	λ <sub>4</sub>

(b)  $N \times N$ アレイ導波路格子の波長置配

図6  $N \times N$ 波長選択カプラー。

の光信号でも入力ポートを変更すると出力ポートも変更することができる。さらに、FSRを波長間隔の $N$ 倍に設定すると、図6(b)のような周期的な入出力関係を実現することができる。ここで、網掛け部分は回折次数が $\pm 1$ 異なる波長である。このように、 $N \times N$ チャンネルAWGでは、 $N$ 種類の波長で $N^2$ 通りの独立な伝送路を構成できる。このAWGの周回特性を利用し、波長によるセルフルーティングが可能なスター型ネットワークや光交換システム<sup>14)</sup>を構成することができる。

### 3.4 光波長選択スイッチ

光WDMシステムにおいて自由度の高いネットワーク構成を実現するため、任意の光波長信号を交換できる光WDMスイッチや、任意の光波長信号を分岐/挿入できる光add/drop合分波回路(光ADM)など、図7のような光波長選択スイッチ<sup>15)</sup>が求められている。

図8は、波長間隔100GHzで16チャンネルの光ADM<sup>16)</sup>の構成図である。3個のアレイ導波路格子と16個の熱光学スイッチ(TOスイッチ:thermo-optic switch)で構成される。入力ポートからのWDM信号は、第1のアレイ導波路格子AWG<sub>1</sub>により各波長に分

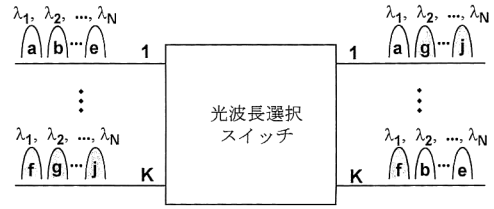


図7 光波長選択スイッチ。

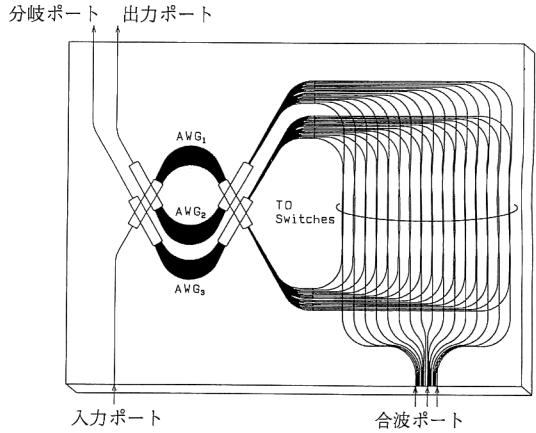


図8 光add/drop合分波回路。

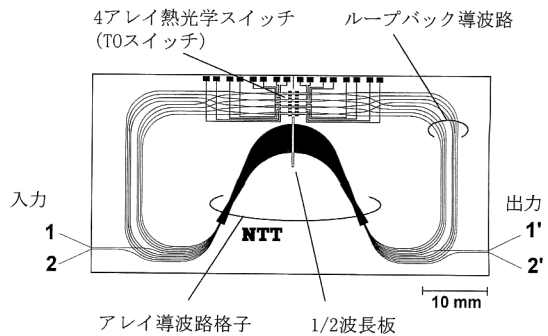


図9 4波多重 $2 \times 2$ 光波長選択スイッチ。

波され、各TOスイッチに導かれる。TOスイッチがオフ状態の場合、光信号はAWG<sub>2</sub>に導かれ再び合波され出力ポートから出力される。一方、TOスイッチがオン状態の場合は、光信号はAWG<sub>3</sub>へと切り換えられ、分岐ポートから出力される。このように、波長に対応するTOスイッチを動作させることで、任意の波長信号を選択的に分岐(drop)できる。同様に、合波ポートから光信号を入射すると、AWG<sub>2</sub>を経由してWDM信号に合波(add)することができる。

図9は、4波多重 $2 \times 2$ 光波長選択スイッチ<sup>17)</sup>の構成

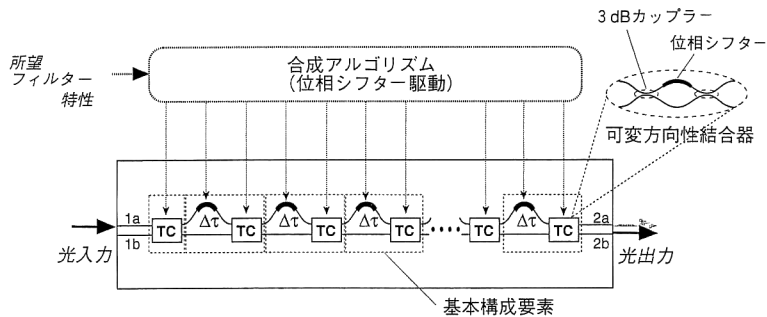


図 10 プログラマブル光波長フィルターの構成。

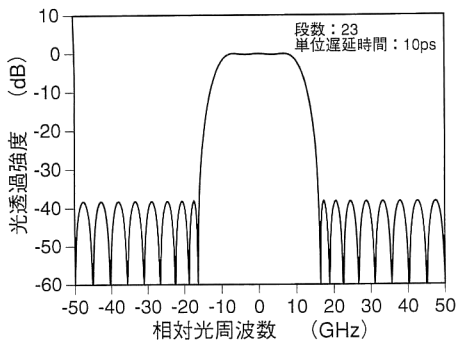


図 11 設計したチェビシェフフィルター特性。

図である。1台のアレイ導波路格子と4アレイのTOスイッチをループバック接続して集積化している。本回路では、1台のアレイ導波路格子が2台の合波回路と2台の分波回路として機能している。各波長に対応するTOスイッチを動作することにより、任意波長を2本の伝送路間で切り換えることが可能である。

#### 4. プログラマブル光波長フィルター

ひとつのPLCにおいて、波長可変合分波回路や任意波長を選択する光波長セレクターなど様々な光フィルター特性を実現できるプログラマブル光波長フィルター<sup>18)</sup>が、次世代PLCとして研究されている。

図10は論理構成図であり、マッハツェンダー(MZ)干渉計による強度制御回路と位相制御回路を交互に多段接続したラティス構造をしている。強度制御回路と位相制御回路の組み合わせを基本として、個々の光強度と位相をコンピューター制御して所望の波長特性を実現する。図11は、強度制御回路と位相制御回路の組み合わせを23段接続して設計した直線位相チェビシェフフィルターの例である。チェビシェフフィルター近似特有の等リップル特性がみられる。

以上、光波長多重用プレーナ光波回路について、その構成法と特性を紹介した。これらは、光波の干渉効果や導波路間での光パワー結合を巧みに利用したものであり、波長以下の精度で設計・作製が可能なPLC技術を最大限に生かした光部品であるといえる。

石英系PLCは、多様なシステムニーズに応じた光部品を実現できるだけでなく、新たなシステム機能を提供することも可能である。今後、光WDMシステムの高高度化・高機能化に向けて、石英系PLC技術は大きな役割を果たしていくものと予想される。

#### 文 献

- 1) Y. Yano, T. Ono, K. Fukuchi, T. Ito, H. Yamazaki, M. Yamaguchi and K. Emura: "2.6 Terabit/s WDM transmission experiment using optical duobinary coding," *European Conference on Optical Communication (ECOC) '96* (1996) ThB.3.1.
- 2) M. Koga, Y. Hamazumi, A. Watanabe, S. Okamoto, H. Obara, K. Sato, M. Okuno and S. Suzuki: "Design and performance of an optical path cross-connect system based on wavelength path connect," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **14** (1996) 1106-1119.
- 3) M. Kawachi: "Silica waveguides on silicon and their application to integrated-optic components," *Opt. Quantum Electron.*, **22** (1990) 391-416.
- 4) K. Imoto, H. Uetsuka and S. Kashimura: "High-silica guided-wave optical devices," *41st Electronic Components & Technology Conference (ECTC) '91* (1991) pp. 483-488.
- 5) 鈴木扇太, 河内正夫: "石英系プレーナ光波回路", *電子情報通信学会論文誌C-1*, **J77-C-1** (1994) 184-193.
- 6) K. Okada and F. Mano: "Passive double star system feature," *Third IEEE Workshop on Local Optical Networks* (1991) 5.1-1-5.1-10.
- 7) Y. Inoue, T. Oguchi, Y. Hibino, S. Suzuki, M. Yanagisawa, K. Moriwaki and Y. Yamada: "Filter-embedded wavelength-division multiplexer for hybrid-integrated wavelenght-division multiplexer for hybrid-integrated transceiver based on silica-based PLC," *Electron. Lett.*, **32** (1996) 847-848.
- 8) Y. Yamada, S. Suzuki, K. Moriwaki, Y. Hibino, Y. Tohmori, Y. Akatsu, Y. Nakasuga, T. Hashimoto, H. Terui, M. Yanagisawa, Y. Inoue, Y. Akahori and R.

- Nagase: "Application of planar lightwave circuit platform to hybrid integrated optical WDM transmitter/receiver module," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 1366-1367.
- 9) H. Terui, T. Kominato, K. Yoshino, F. Ichikawa, S. Hata, S. Sekine, M. Kabayashi, J. Yoshida and K. Okada: "Optical module with a silica-based planar lightwave circuit for fiber-optic subscriber systems," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **4** (1992) 98-100.
  - 10) H. Takahashi, S. Suzuki and I. Nishi: "Wavelength multiplexer based on  $\text{SiO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$  arrayed-waveguide grating," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **12** (1994) 989-995.
  - 11) Y. Inoue, Y. Ohmori, M. Kawachi, S. Ando, T. Sawada and H. Takahashi: "Polarization mode convertor with polyimide half waveplate in silica-based planar lightwave circuits," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **6** (1994) 626-628.
  - 12) K. Okamoto, K. Shuto, H. Takahashi and Y. Ohmori: "Fabrication of 128-channel arrayed-waveguide grating multiplexer with 25 GHz channel spacing," *Electron. Lett.*, **32** (1996) 1474-1476.
  - 13) K. Okamoto and A. Sugita: "Flat spectral response arrayed-waveguide grating multiplexer with parabolic waveguide horns," *Electron. Lett.*, **32** (1996) 1661-1662.
  - 14) K. Habara, Y. Yamada, A. Misawa, K. Sasayama, M. Tsukada, T. Matsunaga and K. Yukimatsu: "Demonstration of frequency-routing type photonic ATM switch (FRONTIERNET) prototype," *European Conference on Optical Communication (ECOC) '96* (1996) ThC. 3. 4.
  - 15) 笹山浩二: "光導波回路を用いた全光型信号処理フィルタ", *光学*, **21** (1992) 400-406.
  - 16) K. Okamoto, K. Takiguchi and Y. Ohmori: "16-channel optical add/drop multiplexer using silica-based arrayed-waveguide gratings," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 723-724.
  - 17) 鈴木扇太, 姫野 明, 石井元速: "集積形光波長選択スイッチ", *信学 97 総合大会* (1996) C-3-18.
  - 18) K. Jinguji and M. Kawachi: "Synthesis of coherent two-port lattice-form optical delay-line circuits," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **13** (1995) 73-82.

(1997年4月3日受理)