



## 石英系光導波路と集積光部品への応用

河内 正夫

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白根 162

(1989年7月21日受理)

### Silica-Based Optical Waveguides and Their Application to Integrated-Optic Devices

Masao KAWACHI

NTT Opto-electronics Laboratories, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-11

#### 1. はじめに

光ファイバの優れた伝送特性を生かした光通信システムは、これまでに、長距離幹線系を中心に導入されている。これらのシステムの構築には、情報(電気信号)を光信号に変換する発光素子、光信号を伝える光ファイバ、光信号を電気信号にもどす受光素子が基本になっている。今後、さらに、光通信システムの潜在能力を引き出し、システムの高度化を図ったり、加入者系等への適用分野の拡大を図るためには、光信号の多重化や分配・結合、光路の切替え等の機能をもつ各種の光回路部品が必要となる<sup>1)</sup>。

これまでに、微小レンズやプリズム等の組合せからなるバルク型光部品や、光ファイバ自身に研磨や融着、延伸加工を施したファイバ型光部品が開発され、一部実用に供されているが、量産性や拡張性、機能集積性などに問題を残している。これらの問題を解決する有力な方法として、光集積回路(光 IC)の構想が提案されて久しい<sup>2)</sup>。しかし、平らな基板の上に配置した各種機能光素子の間を薄膜光導波路で連結して総合機能を創出しようとする、提案当初の夢を実現するには、解決すべき多くの難題が残されている。

これらのなかであって、光ファイバ製造技術と LSI 加工技術の組合せによりシリコン基板上に形成可能な石英系光導波路は、受動光回路の範囲に留まるものの、光通信システムの拡張に必要な小型な集積光部品群を提供しうる現実的な手段として注目され始めている<sup>3)</sup>。

ここでは、NTT 研究所での最近の成果を中心に、石英系光導波路作製技術と光導波路基本特性を解説し、ついで、光分岐素子、光スイッチ、合分波器等の応用光回路部品の現状と開発動向について紹介する。

#### 2. 石英系光導波路

##### 2.1 作製技術

平面基板上に石英系光導波路を作製する多くの方法が提案されている<sup>4-6)</sup>。なかでも火炎堆積法(FHD: flame hydrolysis deposition)によるガラス膜形成と反応性イオンエッチング(RIE: reactive ion etching)によるガラス膜微細加工との組合せは、光ファイバとの整合性に優れた低損失光導波路を実現できる利点がある<sup>7,8)</sup>。この方法でコア部寸法 50  $\mu\text{m}$  程度の多モード光導波路と 8  $\mu\text{m}$  程度の単一モード光導波路のいずれも作製できるが、光通信システムの開発動向に合わせて単一モード光導波路に最近の重点が置かれている。

図 1 に単一モード光導波路の作製工程を示す。まず、光ファイバ作製時と同じ気体状原料(主成分: 四塩化シリコン)を酸水素炎中で加水分解して得られるガラス微粒子(粒径 $\sim 0.1 \mu\text{m}$ )をシリコンウェハ上に吹き付け堆積させる。続いてガラス微粒子膜を電気炉中で高温に加熱し、シリコン基板の上を覆う透明なガラス膜とする。ガラス微粒子の組成(ドーパント濃度)を変えることによりバッファ層、コア層の 2 層構造の光導波膜とする。次に、反応性イオンエッチングによりコア層の不要部分を除去してリッジ状のコア部を残す。最後にコア部を覆

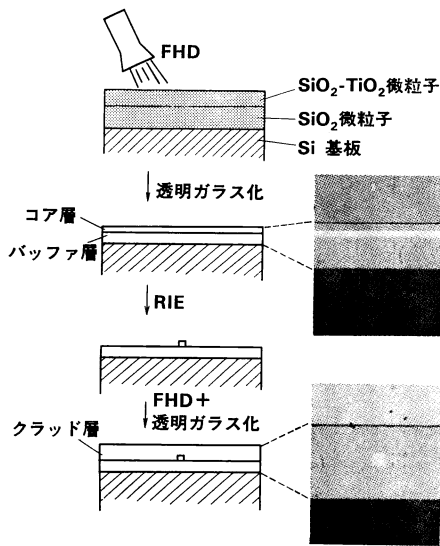


図1 石英系単一モード光導波路作製工程

うようにクラッド層を再び FHD 工程で形成し、単一モード光導波路（埋込み構造）ができあがる。

2.2 基本特性

図1の工程で作製した石英系単一モード光導波路の基本特性を表1に示した。現在、光回路の形状や光ファイバとの接続損失を考慮して、2種類の光導波路（低Δ型と高Δ型）を作り分けている。低Δ型は、通常の1.3 μm ゼロ分散単一モード光ファイバとの接続性を第一優先に設計された光導波路であり、直線部光伝播損失は0.1 dB/cm 程度以下、光ファイバとの接続損失も光軸合せが適正であると0.1 dB/ポイント以下が可能である。高Δ型は、低Δ型に比べて光伝播損失がやや大きいものの許容曲率半径が5 mm と小さい利点がある。

石英系光導波路の構造面の特徴として、シリコン基板上の厚さ50 μm 程度のガラス層の中心部にコア部が埋め込まれている点がある。このため、光導波路チップの切出しや端面加工が容易である。また、石英系ガラスとシリコンの優れた微細加工特性を利用して、光ファイバ接続用のガイド溝を基板上に一括加工する試みもあ

表1 石英系単一モード光導波路の基本特性

タイプ	比屈折率差 Δ (%)	コア寸法 (μm)	伝播損失 (dB/cm)	ファイバ接続損失* (dB/点)	許容曲率半径 (mm)
1) 低 Δ 型	0.25	8×8	0.1	<0.1	~20
2) 高 Δ 型	0.75	6×6	0.3	~0.5	~5

\* 接続に使用した単一モード光ファイバ：コア直径 8.9 μm, 比屈折率差 Δ 0.27%

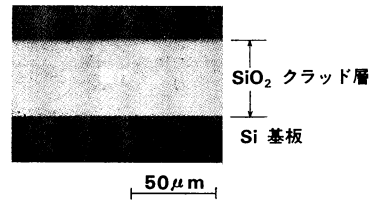


図2 方向性結合器の結合部断面写真

る<sup>9,10)</sup>。

シリコン基板上的の石英系光導波路は、石英系ガラスとシリコンとの熱膨張係数差により圧縮応力を受け  $B=4 \times 10^{-4}$  程度の応力複屈折性を示す<sup>11)</sup>。すなわち基板面に垂直な TM 偏光のほうが、水平な TE 偏光に比べて B 値だけ大きい屈折率を感じる。この B 値は、偏波保持光ファイバと同程度であり、光回路の種類によっては、この複屈折性への配慮が必要である (3.4 項参照)。

2.3 方向性結合器

石英系光導波路を用いて、直線路、Y形分岐路、X形交差路、曲り路、ギャップ路、方向性結合器、熱光学効果移相器、等の基本光回路要素が実現されている。これらのなかで最も重要な光回路要素の一つは、方向性結合器である。方向性結合器は、2本の単一モード光導波路の一部を数 mm 長にわたって、数 μm の間隔にまで近接させて光導波路間の光結合を生じさせるもので、図2に断面写真例を示した。結合部の間隔と長さの調節により0~100%の結合率とその波長依存性を選ぶことができ、応用光回路の基本構成要素となっている。

ここで注目すべきことは、光導波路自身の複屈折性にもかかわらず、方向性結合器の結合率に顕著な偏波方向依存性が見られないことである。理由としては、石英系光導波路の複屈折性が、石英系ガラス層とシリコン基板との熱膨張係数差に起因し、コア部もクラッド部も一様な圧縮応力を受け、結合部(図2)の屈折率分布形状に偏波方向による有意差が現われないことを挙げることができる。

3. 応用集積光部品

方向性結合器を始めとする光回路要素を基板上で組み合わせさせた各種の導波型集積光部品が実現されている。以下、代表例を紹介する。

3.1 光分岐素子

光信号の分配や結合の役割を果たす光分岐素子は、光通信システムを始めとする広範な光応用分野で必要とされる基本的な光部品である。

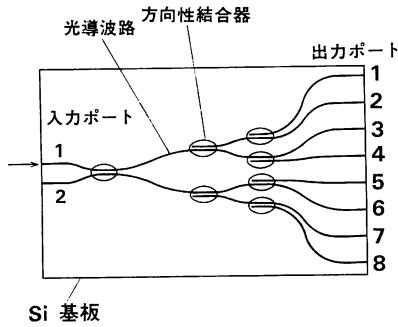


図 3 8分岐素子の構成

図 3 には、分岐要素として方向性結合器を用いた 8 分岐素子の構成例を示した<sup>12)</sup>。同一基板上に 7 個の方向性結合器が連結して一括形成されている。典型的な光導波路チップサイズは、低  $\Delta$  型を採用した場合、25 mm×5 mm 程度であり、入出力端の光導波路ピッチは、光ファイバアレイコネクタに合わせて 250  $\mu$ m に設定されている。この 8 分岐素子の過剰損失は光ファイバ接続損を含めて 1 dB 程度、分岐ムラは  $\pm 0.5$  dB 程度が報告されている。分岐要素として Y 形分岐路を採用する試みもある<sup>13)</sup>。

光分岐素子は、従来、ファイバ型光部品分野で開発が進められてきたが、分岐ポート数が 16, 32 と多くなるにつれて、一括生産性や素子サイズの点で導波路型が競争力を強めると期待される。

### 3.2 光スイッチ

光路の切替えを可能とする低損失光スイッチは、光通信システムの高度化や高信頼性化 (回線故障時の迂回路確保等) のために、ぜひとも必要な光部品の一つである。

石英系光導波路は、本来パッシブな機能しかもたないが、石英系ガラスの熱光学効果<sup>14)</sup>による屈折率変化を利用することにより、光スイッチ作用を付与することができる。(2×2) 熱光学スイッチの基本構成を図 4 に示した。基板上で 2 個の方向性結合器 (結合率 50%) を等しい長さの光導波路で連結した、マッハ・ツェンダー光干渉計構成を基本としている<sup>8)</sup>。干渉計光路のクラッド層上には、光導波路の屈折率変化により干渉計のバランスを調節するための薄膜ヒーター (熱光学移相器) が設けられている。薄膜ヒーターがオフの状態では、入力信号は光クロスポート (1→2', 2→1') へと出力されているが、片側のヒーターをオンにして、一方の光路に 2 分の 1 波長相当の光路長変化を与えると、スルーポート (1→1', 2→2') 出力へと切り替わる。スイッチングに必要な

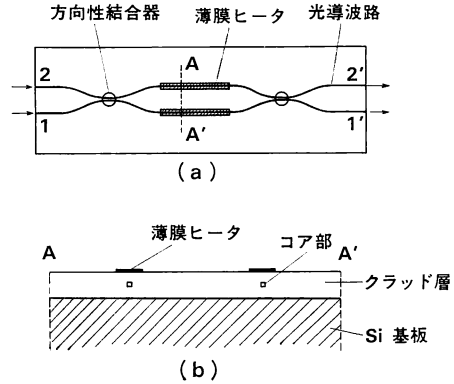


図 4 熱光学式 (2×2) スイッチ構成

な電力は 0.5 W 程度、応答速度は 2 ms 程度である。挿入損失 1 dB, クロストーク -20 dB 以下が達成されている。ヒーター長 10 mm の場合、コア部の温度上昇幅は 5~10°C 程度である。

熱光学スイッチの安定動作は、石英系ガラスの熱絶縁性とシリコン基板の熱伝導性との組合せの上に成り立っている。石英系光導波路の両側にシリコン基板への熱拡散を抑制する溝を形成し、消費電力を 1 桁低減する試みもある<sup>15)</sup>。

熱光学スイッチは、応答速度がミリ秒オーダーと遅いものの、偏波依存性がない、構造が単純で環境温度変動に強い、拡張性に富む等の利点をもち、実用レベルに近い導波路型光スイッチとして期待される。

### 3.3 波長多重用合分波器

1 本の光ファイバで複数の波長の信号光を同時に伝える波長多重 (WDM) 伝送システムでは、異なる波長の光を束ねたり、分離したりする合分波器が必須部品である。

図 5 に、方向性結合器を基本とした 2 波合分波器の構

WDM 構成	設計基準
a) 単体方向性結合器型 	$C_{\lambda_1} = 0\%$ $C_{\lambda_2} = 100\%$
b) マッハツェンダ光干渉計型 	$C_{\lambda_2} = 50\%$ $n \cdot \Delta L = N \cdot \lambda_2$ $n \cdot \Delta L = (N \pm 0.5) \cdot \lambda_1$ n: 導波路屈折率 N: 整数

図 5 方向性結合器を基本とする波長多重合分波器設計

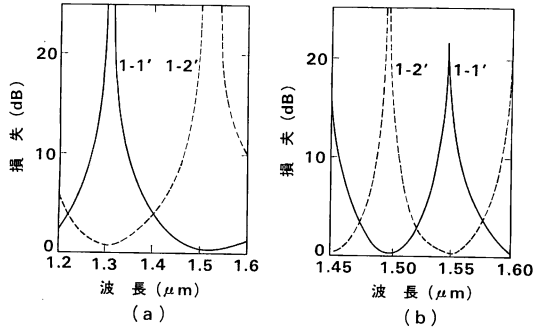


図6 マッハ・ツェンダー型波長多重合分波器の波長特性  
 (a)  $\lambda_1=1.55 \mu\text{m}/\lambda_2=1.3 \mu\text{m} (\Delta L=2.7 \mu\text{m}, N=3)$ , (b)  $\lambda_1=1.50 \mu\text{m}/\lambda_2=1.55 \mu\text{m} (\Delta L=16.0 \mu\text{m}, N=5)$

成法を示した<sup>16)</sup>。(a)は単体方向性結合器の結合率Cの波長依存性を利用するもので、おもに1.3 μm/1.55 μm用である。(b)は、2個の方向性結合器により弱非対称なマッハ・ツェンダー光干渉計を構成したもので、動作波長はΔL値の精密設定により、比較的自由に選ぶことが可能である<sup>17)</sup>。図6には、マッハ・ツェンダー型合分波器の波長特性例を示した。光ファイバ接続損を含めた挿入損は1 dB以下、クロストークは-20 dB以下である。

このほかに、波長選択性の薄膜フィルタ片を光導波路に設けた空隙に挿入する合分波器や、さらには合分波回路に受発光素子を直結した一体化モジュールを実現する試みも報告されている<sup>3,7)</sup>。

3.4 光周波数多重合分波器

多重化する光波長の間隔を極限まで狭くすると、光周波数軸で光信号間隔を設定するほうが都合な光周波数多重(光FDM)領域に至る<sup>18)</sup>。光周波数多重合分波器の基本構成を図7に示した。光路長差の大きい非対称形

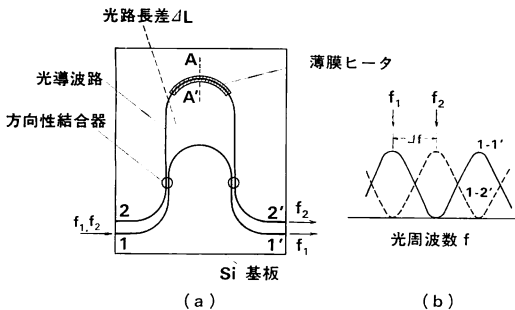


図7 光周波数多重合分波器  
 (a) 基本構成, (b) 光周波数応答

マッハ・ツェンダー光干渉計構成を有し、光導波路上には、光周波数チューニングのための熱光学移相器(薄膜ヒーター)を備えている。

光信号の光周波数間隔Δfと光路長差ΔLとは、

$$\Delta f = c / (2n \cdot \Delta L)$$

c: 光速, n: 光導波路屈折率

の関係にあり、Δf=5 GHz(波長間隔に換算するとΔλ=0.04 nm)では、ΔL=20 mmである。このように大きな光路長差を、限られた面積の基板上で効率よく設定するために、図7では曲率半径5 mmの高ΔL型光導波路(表1)が採用されている。

図8は、同一基板上に7個のマッハ・ツェンダー光干渉計を集積した8チャンネル合分波器の構成図である<sup>19)</sup>。ΔL値は、1段目が10 mm、2段目が5 mm、3段目が2.5 mmであり、光周波数間隔10 GHzの8波を扱うことができる。基板サイズは4 cm×5 cmであり、挿入損は5 dB程度、チャンネル間クロストークは-15 dB程度である。このような光部品は、従来のバルク型やファイバ型の部品構成では、安定性や大きさの点で実現不可能であり、導波型ならではの利点が生かされている<sup>20,21)</sup>。

ところで、図7、図8の光周波数多重合分波器は、マッハ・ツェンダー光干渉計の大きな光路長差ΔLに起因する偏波依存性をもっている。これは、光導波路の複屈折性B(〜4×10<sup>-4</sup>)のために、光干渉計の光路長差がTM偏光・TE偏光間で(B・ΔL)だけ異なるためである。この値が波長λに比べて無視できない領域、すなわち、おおむねΔL>0.1 mmの領域では、偏波依存性が問題となる。そこで従来、光周波数多重合分波器では入力信号光の偏波方向をTM, TEいずれか一方に揃える措置が施されている。しかし、このような制約は、実

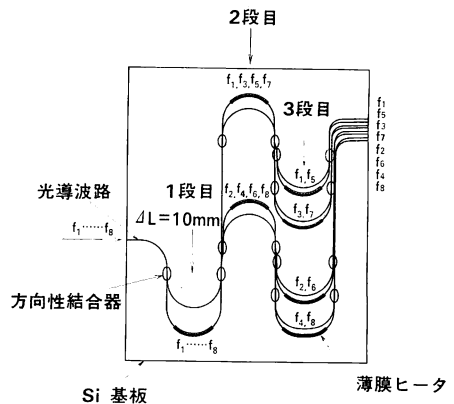


図8 8チャンネル用光周波数多重合分波器の構成

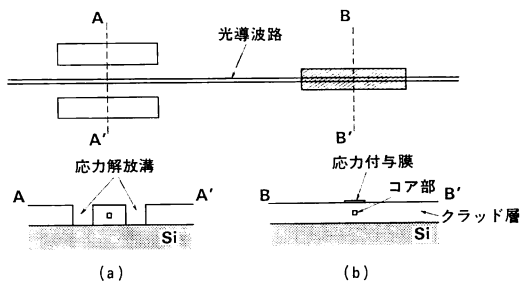


図9 光導波路の複屈折制御方法  
(a) 応力解放溝, (b) 応力付与膜

用上望ましくないので、光導波路の複屈折値  $B$  を調節して、

$$B \cdot \Delta L = N \cdot \lambda$$

$N$ : 整数値 (0, 1, 2, ...)

の条件を満足させ、これにより、TM波、TE波の光周波数応答を整合させ、光周波数多重合分波器の偏波依存性を解消する試みが行なわれている。光導波路の複屈折制御のために、図9に示すように、a) 光導波路に沿って所望位置に応力解放溝を形成する方法<sup>11)</sup>や、b) 光導波路上に装荷した応力付与膜を、希望の偏波特性が得られるまでレーザートリミングする方法<sup>22)</sup>等が提案されている。

### 3.5 その他

上記以外の興味ある光回路部品として、リング共振器を挙げることができる。共振光周波数間隔 5 GHz のリング共振器 (直径 13 mm) が構成され、DFB レーザーの発振光周波数の安定化に用いられた例がある<sup>23)</sup>。また、直径 50 mm 程度の比較的大きなリング共振器は、光回転センサーへの応用が試みられている<sup>24)</sup>。

また、シリコン基板上に光導波路を自在に配置して、多ポートの複合光干渉計回路を構成し、高速信号処理用ファイルとして利用する試みも報告されている<sup>25)</sup>。

このように、石英系光導波路の応用は、光通信分野に留まらず、光信号処理や光センサー分野にも広がりを見せ始めている。

## 4. むすび

以上、石英系光導波路と応用集積光部品の技術現状を紹介した。他材料系の光導波路と比較して、石英系光導波路の最も重要な特徴は、導波路構造が明確で単純であることである。

もちろん、石英系光導波路のみで、すべての光部品を実現できるわけではないが、シリコン基板上への受動・

能動光素子チップのハイブリッド化技術と組み合わせることにより、多様な光部品メニューを揃えることも可能である。

今回紹介した応用光回路部品のうち、比較的単純なもの、光ファイバアレイとの高信頼接続をいかに効率よく達成するかが最大の問題である。光ファイバ接続用ガイド溝等の加工特性に優れ、しかも光ファイバと同質材料からなる石英系光導波路は、他材料系光導波路に比べて優位にある。

多チャンネル光周波数多重合分波器のように光導波路長が数 10 cm レベルに達する光部品では、光導波路損失のいっそうの低減や光回路設計上の問題が残されている。また、光導波路の複屈折精密制御は、単に光周波数領域回路の偏波依存性を解消するためだけに留まらず、逆に複屈折性を積極的に活用した偏波応用光部品 (導波型偏波スプリッターや波長板など) への光回路メニューを拡張することにも関連して興味ある課題である。

ここで紹介した石英系光導波路と応用集積光部品が、光回路設計製作技術と光実装技術のいっそうの向上に支えられて完成度を高め、実用システムに適用される日が近いことを期待してむすびとしたい。

本稿の終りにあたり、日頃有益な討論をしていただいている NTT 光エレクトロニクス研究所および関連方式研究所の関係諸兄に感謝いたします。

## 文 献

- 1) 光回路部品全般については、小山正樹、箕輪純一郎、藤井洋二: 光通信回路とシステム (オーム社, 東京, 1987)。
- 2) 光集積回路の最初の提案は、S.E. Miller: "Integrated optics: An introduction," Bell Syst. Tech. J., **48** (1969) 2059-2068。その後の光集積回路研究展開については、たとえば、西原 浩、春名正光、栖原敏明: 光集積回路 (オーム社, 東京, 1985)。
- 3) T. Miyashita and M. Nakahara: "Silica waveguide integrated circuit technology," IOOC '89, 18 D 1-1, Kobe (1989)。
- 4) T. Izawa, H. Mori, Y. Murakami and N. Shimizu: "Deposited silica waveguide for integrated optical circuits," Appl. Phys. Lett., **38** (1981) 483-485。
- 5) M. Kawachi, M. Yasu and M. Kobayashi: "Flame hydrolysis deposition of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> glass planar optical waveguides on silicon," Jpn. J. Appl. Phys., **22** (1983) 1932。
- 6) B.H. Verbeck, C.H. Henry, N.A. Olsson, K.J. Orlowsky, R.F. Kazarinov and B.H. Johnson: "Integrated four channel Mach-Zehnder multi/demultiplexer fabricated with phosphorous doped SiO<sub>2</sub> waveguides on Si," J. Lightwave Technol., **LT-6** (1988) 1011-1015。
- 7) M. Kawachi, M. Kobayashi and T. Miyashita: "Integrated micro-optic components based on silica waveguides," ECOC '87, Technical Digest II, Helsinki

- (1987) pp. 53-58.
- 8) N. Takato, K. Jinguji, M. Yasu, H. Toba and M. Kawachi: "Silica-based single-mode waveguides on Si and their application to guided-wave optical interferometers," *J. Lightwave Technol.*, **LT-6** (1988) 1003-1010.
  - 9) Y. Yamada, M. Kawachi, M. Yasu and M. Kobayashi: "Optical fiber coupling to high-silica channel waveguides with fiber-guiding grooves," *Electron. Lett.*, **20** (1984) 589-590.
  - 10) Y. Yamada and M. Kobayashi: "Single-mode optical fiber connection to high-silica waveguide with fiber guiding groove," *J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 1716-1720.
  - 11) M. Kawachi, N. Takato, K. Jinguji and M. Yasu: "Birefringence control in high-silica single-mode channel waveguides on silicon," *OFC/IOOC '87*, TuQ 31, Reno (1987).
  - 12) 奥野將之, 高木章宏, 安 光保, 高戸範夫: "導波型 2×8 単一モードスターカプラ", 電子情報通信学会春季全国大会, C-501 (1989).
  - 13) 小林將一, 鬼頭 勤, 安 光保, 河内正夫: "Y分岐石英導波路 1×8 スプリッタ", 電子情報通信学会秋季全国大会, C-625 (1989).
  - 14) M. Haruna: "Thermo-optic waveguide devices," *JARECT vol. 17, Optical Devices & Fibers* (OHM\* North-Holland, 1985/1986) pp. 69-81.
  - 15) A. Sugita, N. Takato, K. Jinguji and M. Kawachi: "Bridge-suspended thermo-optic phase shifter and its application to silica-waveguide optical switch," *IOOC '89*, 18D1-4, Kobe (1989).
  - 16) M. Kawachi: "Wavelength division multiplexing integrated waveguide components on Si substrates," *CLEO '89*, FG5, Baltimore (1989).
  - 17) 小湊俊海, 安 光保, 高戸範夫, 河内正夫: "導波型マッハツェンダ光干渉計形光 WDM 回路", 電子情報通信学会春季全国大会, C-502 (1989).
  - 18) 島田禎晉 (監修): *コヒーレント光通信* (電子情報通信学会, 1988) pp. 54-87.
  - 19) 高戸範夫, 小野瀬勝秀, 安 光保, 神宮寺要, 鳥羽 弘, 河内正夫: "石英系光導波路を用いたマッハツェンダ干渉回路", 電子情報通信学会春季全国大会, SB-9-2 (1989).
  - 20) H. Toba, K. Oda and K. Nosu: "A 16 channel optical FDM distribution/transmission experiment," *IOOC '89*, 20D1-1, Kobe (1989).
  - 21) K. Oda, N. Takato, T. Kominato and H. Toba: "Stabilization of the waveguide type 16 channel frequency selection switch for optical FDM distribution systems," *IOOC '89*, 20D2-4, Kobe (1989).
  - 22) M. Kawachi, N. Takato, K. Jinguji and A. Sugita: "Laser trimming adjustment of waveguide birefringence in silica integrated optic ring resonators," *CLEO '89*, TuJ 17, Baltimore (1989).
  - 23) N. Takato, T. Kominato, H. Toba, K. Jinguji and M. Kawachi: "Performance and application of silica-based integrated-optic ring resonators," *CLEO '88*, TUV 4, Anaheim (1988).
  - 24) K. Iwatsuki, M. Saruwatari, M. Kawachi and H. Yamazaki: "Waveguide-type optical passive ring-resonator gyro using time-division detection scheme," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 688-689.
  - 25) K. Sasayama, M. Okuno and K. Habara: "An optical transversal filter using coherent interference," *IOOC '89*, 20D2-5, Kobe (1989).