

# 解説

## 石英系光スイッチ

杉田 彰夫・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

(1992年3月3日受理)

### Optical Switches Using Silica-Based Waveguides

Akio SUGITA and Masao KAWACHI

NTT Opto-electronics Laboratories, Tokai, Ibaraki 319-11

#### 1. はじめに

光通信システムは、ファイバの特性を生かし、これまで長距離幹線系を中心に導入されてきた。新しい情報通信システム構築に向けて、加入者系への適応や光 LAN 導入の拡大、さらに、多様で大容量の情報を扱えるようにするには、光-電気変換をせず処理する必要がある。通信システムの全光化を実現するために光交換・光回路切替用の光スイッチの研究が盛んに行われている。

光スイッチとしては、従来、プリズムなど個別部品で構成されたバルク型<sup>1)</sup>やファイバ型<sup>2)</sup>の機械式スイッチが開発されてきた。しかし、機械式スイッチでは、デバイス長期安定性、規模拡張性や生産性に問題が残されている。これらの問題を解決するスイッチとして、光スイッチ素子を同一基板上に作製できる導波路型光スイッチの研究が展開されている。導波路型光スイッチには、LiNbO<sub>3</sub>などの強誘電体、化合物半導体、ガラスなどの材料が用いられている。

本稿では、導波路型光スイッチとして、低損失で光ファイバとの整合性がよい石英系導波路を用いた光スイッチについて述べる。

#### 2. 石英系導波路と光スイッチ

石英系光導波路を作製する方法には、FHD(火災加水分解堆積法)<sup>3)</sup>、プラズマ CVD<sup>4)</sup>や低圧 CVD<sup>5)</sup>が報告されている。FHD 法では、シリコン基板上に厚さ 50~60 μm の石英クラッド層と、そのほぼ中心にコア部が埋め込まれた光導波路構造となっている。コア部の寸法は、単一モード導波路の場合 5~10 μm 角程度で、比屈折率

差は 0.25~0.75% となっている。

石英光導波路は基本的には受動機能しかもたないが、熱光学 (TO) 効果による屈折率変化を利用してスイッチング機能をもたせることができる<sup>6)</sup>。熱源用の薄膜ヒーターおよび電極は導波路の上部にスパッタ法や蒸着法で形成する。TO 効果を用いた TO スwitchは、LiNbO<sub>3</sub> スwitchや半導体スswitchなどの電気光学効果を利用したスswitchとは異なり、電力(加熱)駆動であるので数 V 程度の低電圧で駆動させることができるが、一方、加熱による素子の温度上昇を考慮する必要がある。

石英系ガラスは、他の材料と比較して耐熱温度が高いので、熱による導波路の変形や材料の変質が生じないという点で他材料より有利である。また、シリコン基板上に形成した石英系導波路は、シリコンがヒートシンクの役目を果たすので熱の蓄積は少ないという特徴を持つ。導波路の伝搬損失としては 0.1 dB/cm 以下、光ファイバとの接続損失は 0.1 dB/点以下と低い値が得られており、石英系光スswitchは、後で述べるように応答速度がミリ秒程度と比較的遅いものの、構造が単純で環境温度変動に強い、拡張性に富むなどの利点をもち、実用レベルに近い導波路型スswitchと言えよう。

#### 3. スwitchの基本構成

石英系導波路で用いられている代表的な導波路型光スswitchの種類を図 1 に示す。TO スwitchはヒーター加熱された導波光の位相制御による干渉を利用してスswitch動作させる。2 入力 2 出力を切替えられる 2×2 はスswitchの基本で、対称マッシュツェンダー (MZ) 型が使える。非対称 MZ 回路は合分波機能をもち、波長多重 (WDM)

原理	形態・構成	スイッチ名	
石英系光スイッチ	熱光学効果	方向性結合器形 Y分岐形	
	対称MZ		2x2スイッチ、NxNマトリックススイッチ ゲートスイッチ、on/offスイッチ
	非対称MZ		
複合形	周波数選択スイッチ 波長無依存スイッチ		
その他	光ゲート	ゲートスイッチ	

図 1 石英系光スイッチの分類

用から多重化する波長の間隔が非常に狭く設定される光周波数多重 (光 FDM) 用合分波器として使われる。スイッチ機能としては、周波数多重された光信号のうち任意の周波数を選択できる。光ゲート素子を導波回路に挿入するゲート型スイッチは、応答速度が速く増幅することも可能である。

以下に各スイッチについて動作原理、構造、性能、応用例などを説明する。

3.1 対称マッシュツェンダー型光スイッチ

3.1.1 2x2光スイッチ

基本回路構成とその断面構造を図2に示す<sup>7)</sup>。二つの3dB方向性結合器と同一長のアーム導波路からなる対称形マッシュツェンダー干渉計回路を構成している。熱光学位相シフタとして薄膜ヒーターを導波路コア上部に設け、どちらか一方のヒーターを加熱することでスイッチ動作させる。位相シフタがオフの状態では、入力ポート1から入射した光は、3dB方向性結合器で二本のアーム導波路に同一強度で分岐し、この際、導波路bに移行した光は、導波路aの光に対し $\pi/2$ 位相がずれる。出力側の3dB方向性結合器で合流するときは、ポート1'へは導波路aの光と導波路bからの光が打ち消し合い出力されず、ポート2'から出力される(クロス状態)。どちらか一方のヒーターをオンにして二本のアーム導波路間に位相差 $\pi$ を与えると、入力ポート1から入射した光はポート1'から出力されるバー状態に切替えることができる。

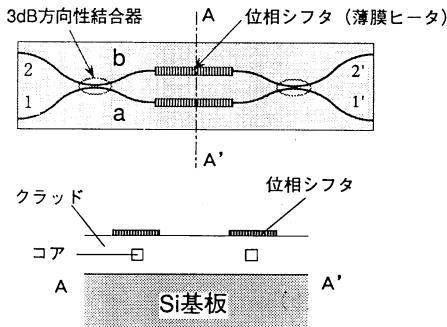


図 2 2x2光スイッチの基本回路構成と断面構造

ポート1から入射しポート2'から出力した場合のスイッチの透過特性と応答特性を図3に示す。波長は1.3 $\mu$ mを使用している。スイッチングに要する電力は0.5W程度で、応答速度は1ms程度である。ヒーター長は10mmで、この場合、コア部の温度上昇は約10°Cである。回路の挿入損失は0.5dB、消光比20dB以上のものが得られている。このスイッチの特徴としては、スイッチング特性に偏波依存性がなく、対称形MZ回路で構成されているので環境温度変化に強いなどが挙げられる。また、応答速度は数十ミリ秒と遅くなるが、スイッチング電力を1桁程度抑えた低消費電力タイプのスイッチも報告されている<sup>7)</sup>。

3.1.2 マトリックス光スイッチ

上記の2x2光スイッチを要素として多段接続することでマトリックスを構成できる。図4に完全ノンブロッキング(非閉塞)マトリックススイッチの構成を、最も基本的なクロスバー形の8x8スイッチについて示す。

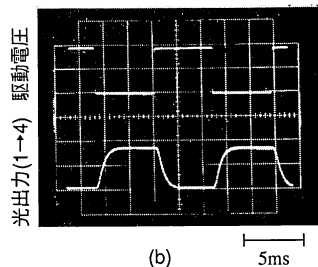
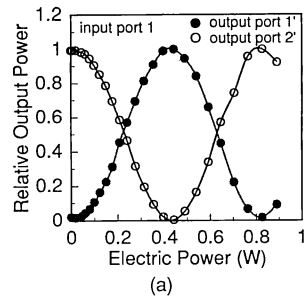


図 3 2x2光スイッチの特性 (a) 透過特性, (b) 応答特性。

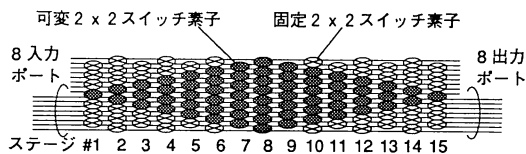


図4 完全非閉塞8×8マトリックススイッチの構成

この回路は、64個のクロス・バー状態可変の2×2スイッチ素子と、損失および漏話のポート間の均一化を図るための48個のクロス状態に固定された固定スイッチ素子の15段のスイッチ素子群からなり、各導波路は交差することなく配列されている<sup>9)</sup>。3インチシリコン基板上に作製されたスイッチ回路のレイアウトを図5に示す。回路全長が約35cmとなるため、直線状には収納できず「つづら折り」状に配置されている。このマトリックススイッチの特性は、平均挿入損失が7dB（ファイバ接続損を含む）、ポート間消光比は平均20dBが実現されている。応答時間は、上記2×2スイッチと同じである。マトリックススイッチとしては、可変スイッチ素子が同時にon状態になるのは最大8個であるので、最大消費電力は4W以下に抑えることができる。また、各可変スイッチ素子は方向性結合器の結合率およびアーム導波路間の光路長差に波長依存性を持つので、マトリックススイッチの特性も波長依存性があり、15dBの消光比が得られる波長範囲は±30nmである<sup>9)</sup>。

集積度は現在までの報告では、石英系導波路においては8×8が最大であるが、ウェハサイズが大きくなれば、クロスバー形では12×12程度までできると思われる。さらに集積度を上げるには他のスイッチ構成の採用が必要であろう。このTOマトリックススイッチは、これまでにマルチメディア光交換システムの基礎実験に使用されており、今後光交換、光回線切替などに使用されていくものと思われる。

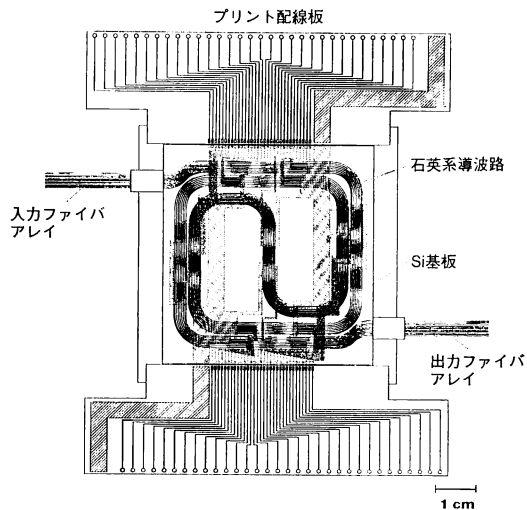


図5 8×8マトリックススイッチのレイアウト

### 3.2 非対称マッハツェンダー型光スイッチ

光周波数多重(光FDM)された光通信システムでは、特定の周波数信号を選択する必要がある。このとき用いられるのが周波数選択スイッチである。本スイッチの基本要素回路と周波数応答を図6に示す<sup>10)</sup>。このスイッチは、二つの3dB方向性結合器が長さ $\Delta L$ だけ異なるアーム導波路からなる非対称形マッハツェンダー干渉計回路から構成されている。薄膜ヒーターはチューナの役目を果たし、ヒーター加熱により干渉計回路の周波数応答をシフトさせることで周波数を選択できる。選択される光周波数間隔 $\Delta f$ とアーム導波路間の光路長差 $\Delta L$ とは、

$$\Delta f = c / (2n \cdot \Delta L) \quad (1)$$

$c$ : 光速,  $n$ : 導波路屈折率

の関係にある。例えば、 $\Delta L = 10 \text{ mm}$ では $\Delta f = 10 \text{ GHz}$ (波長間隔 $\Delta \lambda$ では約0.08nm)となる。このような $\Delta L$ が大きい非対称マッハツェンダー干渉計回路は、石

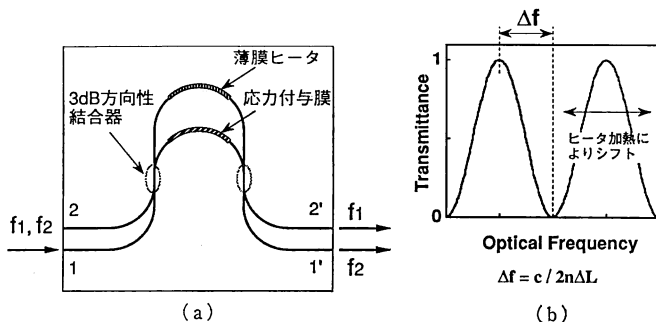


図6 非対称マッハツェンダー型光スイッチ  
(a) 基本要素回路, (b) 周波数応答。

英系導波路に複屈折性  $B$  ( $\sim 4 \times 10^{-4}$ ) があるため、TE 偏波と TM 偏波とで光路長差が  $B \cdot \Delta L$  だけ異なり、偏波依存性をもっている。そこで、図 6 (a) のように導波路上に応力付与膜を装荷して、2 本のアーム導波路の間で

$$\int_{\text{arm2}} Bdl - \int_{\text{arm1}} Bdl = N\lambda \quad (2)$$

$N$ : 整数 (0, 1, 2, ...)

の条件が満たされるよう光導波路の複屈折値  $B$  をレーザートリミング法などで調節することにより、TE・TM 両偏波の光周波数応答を整合させ周波数選択スイッチの偏波依存性を解消している<sup>11)</sup>。

複数個のマッハツェンダー干渉計回路を多段に接続することにより選択チャンネル数を拡大できる。図 7 は、5×6 cm の同一基板上に 7 段のマッハツェンダー干渉計回路を集積した 128 チャンネル周波数選択スイッチの構成図で、周波数間隔が 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 GHz のマッハツェンダー回路の光路長差は、それぞれ 10, 5, 2.5, 1.25, 1/16, 1/32, 1/64 mm となっている<sup>12)</sup>。入力ポート 1 から出力ポート 8 がメインパスで、そのほかのポートは偏波制御やチャンネル選択用のモニターに使われる。偏波規定していない入力光を用いたときの透過特性を図 8 に示す。ファイバ接続損を含む

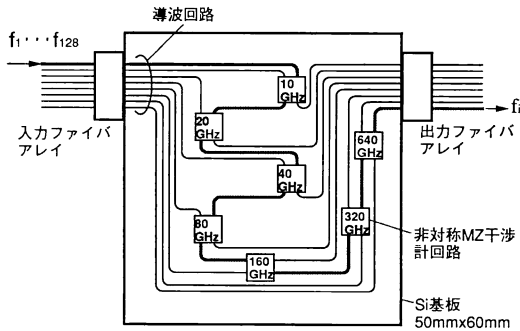


図 7 128 チャンネル周波数選択スイッチの構成

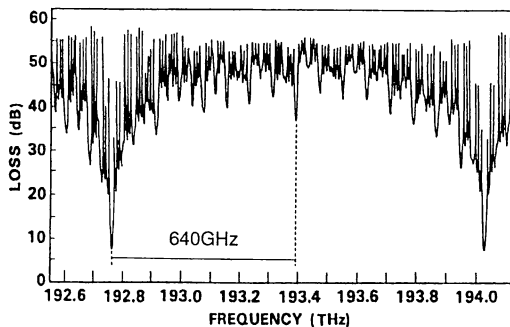


図 8 128 チャンネル周波数選択スイッチの透過特性

スイッチの過剰損失は導波路長約 21 cm で 6.7 dB、チャンネル間クロストークは -20~-50 dB、トータルクロストークは -13 dB が得られている。このような光部品は、従来のバルク型やファイバ型では動作安定性や大きさの点で実現不可能であり、導波型光部品が最も適していると言えよう。

### 3.3 波長無依存光スイッチ

波長多重 (WDM) された情報を扱うには、波長依存性のない光スイッチが必要となる。先述したように 2×2 光スイッチは、方向性結合器および位相シフタに波長依存性があるため、広い波長領域では使用できない。そこで、方向性結合器を波長に依存しないカップラー (WINC: wavelength insensitive coupler)<sup>13)</sup> に置き換え、波長無依存カップラーに設けた副位相シフタにより位相シフタの波長依存性を補償する波長無依存光スイッチ (WINS: wavelength insensitive switch) が最近考案された<sup>14)</sup>。このスイッチでは、1.25~1.65 μm の波長域にわたり動作する。

図 9 に波長無依存光スイッチの構成を示す。波長無依存カップラーは、非対称性が小さいマッハツェンダー干渉計回路 (光路長差が 1 μm 以下) で、波長無依存性を保持しつつ結合率を任意に設定できる。ここでは、結合率は 3 dB に設定されており、二つの 3 dB-WINC は点対称に配列されている。ミラー対称に配列するとスイッチとしては強い波長依存性をもってしまう。図 10 に

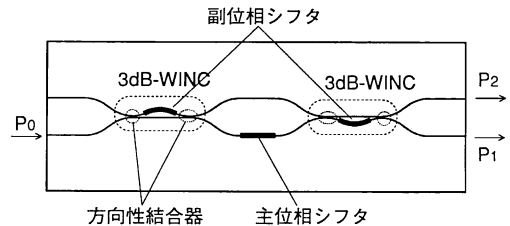


図 9 波長無依存光スイッチ (WINS) の構成

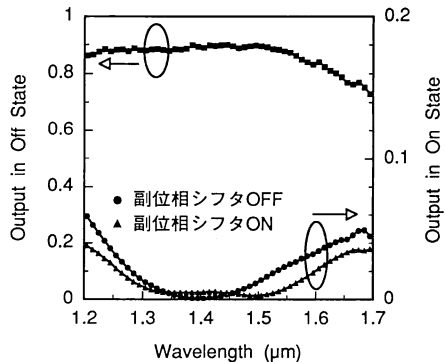


図 10 WINS の波長特性

WINSの波長特性を示す。スイッチの挿入損失は0.5 dB, 消光比は波長1.25~1.65  $\mu\text{m}$ の広い領域で17 dB以上が得られている。副位相シフタを動作させないときは、波長平坦性が劣化しており副位相シフタの効果がよくわかる。この回路構成は石英系導波路のみならず、LiNbO<sub>3</sub>や半導体光スイッチにも適応でき、幅広く応用されると思われる。

### 3.4 Y分岐マッハツェンダー型スイッチ

スイッチの原理は方向性結合器マッハツェンダー型スイッチと同じであるが、Y分岐回路は方向性結合器と違い、波長によらず3 dBに分岐できる。石英系導波路では、リッジ型導波路を用いて光ゲートマトリックススイッチに適応した報告がある<sup>15)</sup>。ヒーターに熱を加えないときオフ状態が得られるよう二本のアーム導波路間にあらかじめ1/2波長分光路長差が与えられている。オン状態での印加電力は0.85 W, 損失4.0 dB, 消光比17 dBで応答速度は0.6 msが得られている。リッジ型導波路を用いているため損失は大きいですが、クラッド膜厚が薄いので応答速度はやや速くなっている。

### 3.5 ゲート型光スイッチ

導波路に光ゲート素子を搭載したスイッチである。概略図を図11に示す。レーザーダイオード(LD)を光ゲート素子として用いたスイッチでは、その構造は、消光比を高く取れるファブリペローLDの端面に無反射コートした進行波型光増幅器と同じであり、ゲート機能とともに光増幅機能をも有し導波路の損失などを補償できる。オン/オフ動作はLDへの注入電流をオン/オフすることでを行い、スイッチング速度は数nsと速い。電界吸収型ゲートを用いれば、増幅機能はないがサブナノ秒とさらに高速化できる。

リッジ型導波路にLDゲートアレイをハイブリッド集積した4×4マトリックススイッチでは、挿入損失33 dB, チャンネル間クロストーク-15 dBが得られている<sup>16)</sup>。また、LD光ゲートモジュールと埋込型導波路を使用した1×4スプリッタからなる1×4光ゲートスイ

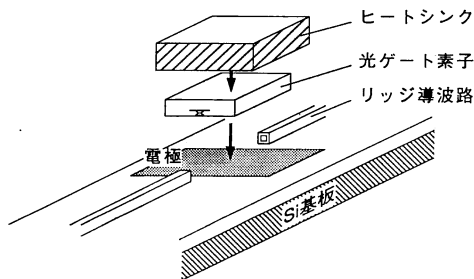


図11 ゲート型光スイッチの構成

ッチでは、6 dB以上の利得が得られており<sup>17)</sup>、ハイブリッド集積された大規模で無損失の光スイッチが期待される。

## 4. む す び

石英系光導波路を用いた導波型光スイッチについて、形態とその原理および応用例を述べた。これらのデバイスは、全光化される光通信システムの構築に不可欠な基本構成要素である。さらに、ここで述べた熱光学効果を利用した光スイッチは、ガラス系のみならず有機ポリマー導波路にも適応可能である。

石英系光導波路は、比較的構成が単純な1×8スプリッタなどは実用化の域に達しようとしている。一方、光交換や光波通信の通信システム基礎実験に供されている8×8マトリックス光スイッチ・周波数選択スイッチなど大規模光回路も造られているが、これら大規模回路では、導波路損失のいっそうの低減、回路構成や回路の効率の配置などの光回路設計上の課題が残されている。今後、ハイブリッド集積も含め多機能化・高性能化を実現することにより、次世代光通信システムへの貢献が期待できる。

## 文 献

- 1) M. Yamamoto, M. Yokoyama, H. Ogiwara and Y. Yoshida: *J. Opt. Commun.*, **1** (1980) 74.
- 2) 横山雅明, 大森 裕, 荻原春生: 電子通信学会技術報告, **QQE79-97** (1979) 43.
- 3) N. Takato, M. Yasu and M. Kawachi: *Electron. Lett.*, **22** (1986) 321-322.
- 4) N. Nourshargh, E. M. Starr and T. M. Ong: *Electron. Lett.*, **25** (1989) 981.
- 5) C. H. Henry, G. E. Blonder and R. F. Kazarinov: *J. Lightwave Technol.*, **7** (1989) 1530-1539.
- 6) M. Haruna and H. Koyama: *2nd. Eur. Conf. Integrated Opt.* (Firenze, 1983) pp. 129-131.
- 7) A. Sugita, K. Jinguji, N. Takato, K. Katoh and M. Kawachi: *Trans. IEICE*, **E-73** (1990) 105-109.
- 8) A. Sugita, M. Okuno, T. Matsunaga, M. Kawachi and Y. Ohmori: *16th Eur. Conf. Opt. Commun.* (Amsterdam, 1990) WeG4-1.
- 9) 奥野将之, 杉田彰夫, 松永 享, 河内正夫: 1991年電子情報通信学会秋季大会, C-171 (1991) p. 4-201.
- 10) N. Takato, K. Jinguji, M. Yasu, H. Toba and M. Kawachi: *J. Lightwave Technol.*, **6** (1988) 1003-1010.
- 11) A. Sugita, K. Jinguji, N. Takato and M. Kawachi: *IEEE J. Select. Area Commun.*, **8** (1990) 1128-1131.
- 12) N. Takato, A. Sugita, K. Onose, H. Okazaki, M. Okuno, M. Kawachi and K. Oda: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **1** (1989) 137-139.
- 13) K. Jinguji, N. Takato, A. Sugita and M. Kawachi: *Electron. Lett.*, **26** (1990) 1326-1327.
- 14) N. Takato, T. Kitoh, K. Jinguji, M. Yasu and M. Kawachi: *OFC '92* (San Jose), TuC1 (1992) p. 9.
- 15) 姫野 明, 照井 博, 山田泰文, 小林盛男: 電子情報通信学会論文誌, **J71-C** (1988) 685-691.
- 16) A. Himeno, H. Terui and M. Kobayashi: *J. Lightwave Technol.*, **6** (1988) 30-35.
- 17) H. Terui, T. Kominato and M. Kobayashi, *CLEO '90*, CTUF 4 (1990) pp. 88-89.