

# 解説

## 光スイッチの現状と将来

内田直也

古河電気工業(株)光技術研究所 〒290 市原市八幡海岸通6

(1992年6月3日受理)

### Optical Switches—Present Situation and Future Trend

Naoya UCHIDA

Opto-Technology Laboratory, The Furukawa Electric Co., Ltd.,  
6, Yawata-Kaigandori, Ichihara 290

#### 1. ま え が き

低損失な石英系ガラスファイバと高出力・長寿命な半導体レーザーの出現により、光ファイバ伝送システムが実用化されて既に10年以上が経過した。その間、国内外で光伝送システムの導入が急速に進み、光通信はすっかり世の中に定着した。これは、光ファイバの持つ低損失性と広帯域性がフルに発揮され、特に中継伝送の分野で、従来の同軸ケーブル方式と比較して経済的に圧倒的に有利となり、高信頼化も達成されたことが主要因である。

現在の光ファイバ伝送システムは、最も単純化して見れば、複数本の光ファイバが縦続接続された光伝送路の両端に、発光素子と受光素子が接続された形態であり、信号伝送も簡単な強度変調・直接検波(IM-DD)方式によって行われている。このような単純さのゆえに、光伝送システムが技術的にも経済的にも早期に実用化の段階に達したと言える。

しかしながら、今後の光伝送システムの発展の方向である広帯域 ISDN サービスの実現のためには、システムの高機能化・多機能化が必須である。即ち構成がより複雑で、しかも、より一層経済的なシステムの実現が不可欠であり、電話局と加入者をファイバで結ぶ加入者光伝送方式、即ち FTTH (fiber to the home) や、ビル内・構内での光 LAN の普及、あるいはファイバを遠隔で切り替える等の、光伝送網をフレキシブルに運用できるシステムの構築が重要となる。さらに将来の光技術の姿を展望すれば、上述の光伝送の分野だけでなく、交

換・情報処理・コンピュータ等のあらゆる情報通信分野で光が縦横に使用される状況が期待されている。

このような光の将来形態を考える時に最も重要な役割を果たすべきデバイスが、光スイッチである。光スイッチの研究開発は、古くからレーザーの発展とともに活発に行われてきた。しかしながら現段階では、その実用化はまだ満足のいく領域には達していないと言わざるを得ない。これは、光と物質の相互作用が一般的に大きくないと言う本質的な原因に起因しており、ファイバ中を光が極めて低損失に伝搬しようことと、いわば裏腹な関係にある。いずれにしても、今後光技術の適用領域の拡大に向けて光スイッチへの期待は大きく、今後のより一層の挑戦が期待される。

以下、本稿では、光スイッチの現状、光スイッチへの要求条件、将来の展望等につき、著者の考えを織りまぜて記述したい。

#### 2. 光スイッチの現状

現在用いられている、あるいは、開発が進められている光スイッチは大きく分けて、(1)光路切替え型スイッチ、(2)光周波数・波長スイッチ、(3)光メモリスイッチに大別される。

##### 2.1 光路切替え型スイッチ

これは、光の進行方向を空間的に切り替えるためのスイッチであり、最も古くから研究開発が進められてきた。このタイプのスイッチは表1に示したように、バルク型、ファイバ型、導波型に分類できる。

バルク型<sup>1)</sup>は、ミラーやプリズムを移動させて光路を

切り替えるメカニカル型が主流であり、 $1 \times 2$ 、 $2 \times 2$  程度の小規模スイッチが一般的であるが、ステップモータを用いた  $1 \times N$  ( $N=10 \sim$ 数十) スwitchも商品化されている。従来は多モードファイバ用のスイッチが一般的であったが、マイクロオプティクス (微小光学) 技術の進歩により、シングルモード用のスイッチも普及し、低損失化と小型化が達成されている。ノンメカニカル型としては、液晶や電気光学・磁気光学結晶を用いたタイプ、音響光学効果を用いたタイプが実用化されている。

また、バルク型のスイッチの一種として、オンオフタイプのアレイ型あるいは面型スイッチ (ゲートスイッチ) が実用化されている。メカニカルにシャッタをオンオフさせる構成や、液晶や電気光学結晶を用いた例が知られている。

次に、ファイバ型では、上記バルク型と同様にメカニカルに光ファイバを移動させたり、ロボットハンドを用いてコネクタを抜き差しするタイプが実用化されている。前者のメカニカルスイッチでは、光ファイバの移動はソレノイドコイルにより発生する磁界を用いるが、ファイバ表面に磁性薄膜を取り付け直接ファイバを移動させる構造<sup>2)</sup>、ファイバ先端にコネクタを取り付け、対向するコネクタ間の位置をずらしてスイッチングを行わせる構造<sup>3)</sup>がある。 $1 \times 2$  のスイッチが基本であるが、ファイバを折り返して  $2 \times 2$  にしたもの、4組の  $1 \times 2$  スwitchを同時に切替え可能としたもの等が実用化されている。開発の初期は、位置決め精度が十分でなく、多モードファイバ用のスイッチのみであったが、その後精度の大幅な向上により、ここ 2~3 年はシングルモードファイバを用いたスイッチも商品化されており、挿入損失も 0.5 dB 程度と小さくなっている。

導波型の代表は、方向性結合器型と全反射型である。

前者は方向性結合器部分の屈折率を変えることによって結合器の結合状態を変化させ、光の進行方向を切り替えるものである。代表例として、Ti 拡散  $\text{LiNbO}_3$  導波路<sup>4)</sup> や半導体導波路を用いた電気光学効果スイッチや石英導波路で熱的効果により屈折率を変化させる TO (thermo-optic) 効果スイッチ<sup>5)</sup> がある。現段階で、 $\text{LiNbO}_3$  と石英導波路でそれぞれ  $8 \times 8$  のスイッチが作成されており、ほぼ実用の段階に達している。半導体導波路においては、量子井戸構造を用いて量子閉込めシュタルク効果による大きな屈折率変化を利用して、素子長を大幅に短くすることも可能である<sup>6)</sup>。

全反射型に関しては、半導体の X 分岐導波路の交差部の屈折率を電流注入により減少させて、全反射により光が交差導波路の方へ曲げられるタイプが盛んに研究されている<sup>7)</sup>。同様に Y 分岐半導体導波路で、一方の導波路の屈折率を減少させて導波路を消滅させ、光をもう一方の導波路に導くタイプも提案されている<sup>8)</sup>。

$\text{LiNbO}_3$  と石英導波路の場合は、寸法上の制約から、1 素子でせいぜい  $16 \times 16 \sim 32 \times 32$  程度が上限と考えられるのに対し、半導体導波路の場合には、本質的に、より多数のスイッチエレメントの集積化が可能と考えられる。しかしながら現段階では、駆動パワーによる発熱のために集積規模が制約され、 $4 \times 4$  程度にとどまっており、低駆動電力化のブレークスルーが強く望まれている。

## 2.2 光周波数・波長スイッチ

光の周波数あるいは波長を切り替えるスイッチは<sup>9)</sup>、光交換や光による情報処理の分野で必須のデバイスである。そのためのアプローチとして、多電極構造を有する DFB または DBR レーザーが提案された<sup>10)</sup>。これは、キャリアの注入により屈折率が変化し、発振波長が変化

表 1 光路切替え型光スイッチの種類

種類	駆動方式	使用効果・機構・材料等
バルク型	メカニカル型 ノンメカニカル型	電磁石, バネ, ステップモータ (プリズム, ミラー) EO, AO, MO 効果 (液晶, PLZT, BSO, YIG 等)
オンオフゲート型 (アレイ型, 面型)	メカニカル型 ノンメカニカル型	シャッタ EO 効果等 (カーセル, 液晶)
ファイバ型	メカニカル型	電磁石, 圧電素子 (ファイバ直接移動, コネクタ移動) ロボットハンド (コネクタ抜き差し)
導波型	ノンメカニカル型	誘電体 (Ti 拡散 $\text{LiNbO}_3$ : 方結型, バランスブリッジ型) 半導体 (EO, キャリア注入, 量子閉込め Stark 効果: 方結型, 全反射型, Y 分岐型) 石英ガラス (TO 効果: 方結型)

する原理に基づいており、nm オーダーの波長が連続的に可変である。さらに、DFB レーザー構造において二重ガイド構造を持つ TTG (tunable twin guide) 型スイッチが提案され<sup>11)</sup>、7nm 程度の可変範囲が得られている。また、グレーティング結合あるいはY分岐等よりなる複合共振器構造レーザーがいくつか提案されている<sup>12)</sup>。これらの複合共振器型レーザーは可変波長範囲を大幅に拡大できるメリットがあり、ディスクリートではあるが数十 nm の可変範囲が得られている。

以上述べた各種構造を持つレーザーは、波長の制御性や線幅の安定性と言った特性でそれぞれ一長一短があり、どの構造が最適であるかは一概には言えない。しかしながら、今後の進展が大いに期待できる分野であり、将来、実用に耐えうる優れたデバイスが出現するものと考えられる。

なお、これらの波長可変レーザーをしきい値以下のバイアス電流で動作させると、光アンプとして選択的な増幅が可能であり、可変波長フィルタとして使用できる。これらの素子も、光交換・光情報処理の分野で有用な素子である。また、石英導波路を用いたマッハツェンダ干渉計も波長選択フィルタとして使用でき、先に述べたTO 効果を用いることにより、波長スイッチとしての動作が可能である。

### 2.3 光メモリスイッチ

光と光の相互作用に基づくデバイスとして、近年注目をあびているのが光双安定素子である。これは材料自体あるいは多重量子井戸構造による大きな光非線形効果とフィードバック機構を組み合わせることにより、光の入出力特性にヒステリシスが生じ、したがって双安定動作が行われると言った原理に基づいている。このような素子は光メモリとしてあるいは光論理演算素子として使用でき、後述の光交換や光情報処理に必須のデバイスである。代表的な素子として、半導体レーザーに光を注入したときのキャリア密度の変化による屈折率の変化を利用したり、可飽和吸収部を設けたりして双安定動作を実現させる試み<sup>13)</sup>が活発に行われている。

特に、この分野で最近注目を集めているものが、面型のメモリスイッチであり、SEED<sup>14)</sup>、VSTEP<sup>15)</sup>、EARS<sup>16)</sup>等が提案され試作されている。これらはいずれも光素子と電子素子を融合させ、出力光を電圧または電流に変換してフィードバックさせるものである。SEED と EARS は多重量子井戸構造を持ち、量子閉込めシュタルク効果による大きな吸収変化を利用しており、VSTEP はサイリスタ構造により双安定性を実現している。現段階で 8

×8~32×32 程度の集積がなされており、今後、より一層の集積度向上が期待されている。

さらに、面発光レーザーに双安定性を持たせる試みも行われており<sup>17)</sup>、将来、例えば  $10^3 \times 10^3$  程度の集積化が可能と考えられている。

なお、上述の半導体素子と異なる構成のメモリスイッチとして、光ファイバを遅延線として使用し、光路切替えスイッチにより遅延時間を可変としたスイッチが試作され、時分割型光交換の基礎実験に使用されている。

以上、光スイッチの現状を概観したが、これらを表 2 にまとめて示し、併せて各種光システムとの結び付きを示した。

## 3. 光スイッチに対する要求条件

### 3.1 一般的条件

光スイッチに対する要求条件は、そのスイッチが使用されるシステムに対応して様々であるが、一般的な項目としては(1)スイッチ規模： $(1 \sim N) \times N'$  あるいは  $[(1 \sim 2) \times 2] \times M$ 、(2)スイッチング速度、(3)挿入損失、(4)消光比、(5)使用波長範囲、(6)偏波依存性、(7)消費電力、(8)自己保持機能の有無、(9)その他(安定性、信頼性、寿命等)である。以下、光伝送システムと光交換・光情報処理システムで必要とされるスイッチの種類と要求特性の概略を述べる。

### 3.2 光伝送システム用スイッチ

光伝送システムにおいて、現段階で実用されているのは、光路切替え型スイッチである。このタイプのスイッチは、伝送システムに限らず研究室レベルで広く使われてきたが、商用の光伝送システムにおいては、 $1 \times 2$  を基本とした伝送路切替えスイッチが、2年ほど前から NTT の光伝送線路監視・保守システムに使用され始めた<sup>18)</sup>。このシステムにおいて光スイッチに要求されている条件は、(1)挿入損失が小さい(0.5 dB 程度以下)、(2)消光比が大きい(>30 dB)、(3)広い波長範囲で使用できる、(4)偏波依存性がない、(5)自己保持機能がある等である。(6)ただしスイッチング速度は低速(数 ms 程度)で良い。これら(1)~(5)の条件を満たすスイッチは、現在のところメカニカルスイッチ以外になく、さらに(6)の条件をクリアしていることから、中継光伝送線路を監視・保守するためのシステム(通称 FITAS)に導入されている。また心線選択のために、ロボットハンドでコネクタを抜き差しする、最大  $1 \times 600$  程度の切替え装置も上記システムおよび類似の加入者線路用システム(通称 AURORA)に使用されている。

表 2 光 ス イ ッ チ の 展 開

種 類	現 状	用 途	要 求 条 件
◆ 光路切替スイッチ ・メカニカル	バルク型(プリズム, ミラー) ファイバ型 2×2, 1×N 1×2, 2×2, 1×600	● 光加入者系・中継系 ● 光 MDF スイッチ	マトリックス型, $10^2 \times 10^2 \sim > 10^3 \times 10^3$ , 1~10 s, <1 dB. ほぼ上記と同様, 遠隔制御.
・石英導波型	Thermo Optic (TO) 型 1×2~1×32, 2×2~8×8	● FAM スイッチ(クロス コネクタスイッチ) ● 光加入者試験用スイッチ	1×N 型, $N=10^2 \sim > 10^3$ , <1 s, <1 dB.
・LiNbO <sub>3</sub>	方結型 1×2~1×16, 2×2~8×8	● システムスイッチャー	
・半導体	ゲート型 # (石英導波路とのハイブリッド) 全反射型(X分岐型) Y分岐型 方結型(量子閉込め Stark 効果) 2×2	異常加入者線分離スイッチ 光 FDM 伝送用選択スイッチ	ON/OFF 型, $10^2 \sim 10^3$ , <1 s, <1 dB. 1×10~1×10 <sup>2</sup> , >1 GHz.
◆ ON/OFF スイッチ(アレイ型, 面型) ・メカニカル	10~数十アレイ 数十×数十	● 光 LAN	
・ノンメカニカル	液晶, EO 結晶	切替え用スイッチ	2×2, ~ms, <1 dB.
◆ 光周波数・波長スイッチ ・波長変換スイッチ	7 nm 連続可変 30 nm デイスクリート可変 変換利得: 20 dB	分散制御型スイッチ (波長分割+空間分割)	各 1×10~1×10 <sup>2</sup> .
・波長選択フィルタ	DFB, DBR 多電極型, TTG 複合共振器型 LD 中の 4 光子混合	● 光交換	
◆ 光メモリスイッチ ・光安定 LD	DFB, DBR 型 LD アンプ 石英 M-Z 型(TO 型) 1×128, 8×8 >1 GHz	波長分割+空間分割	各 >100×100.
・面型光双安定素子	MQW, 共鳴トンネル樹果 SEED, VSTEP, EARS, 面発光 LD 等 8×8~32×32	波長分割+時分割	波: >100×100, 時: <0.1 ns.
・光遅延線	ファイバ+LN スイッチ等 サブ ns~サブ μs	(その他の組合せも有り得る)	
◆ その他の光-光 スイッチ	半導体ドープガラス, MQW 等 —	● 光情報処理, 光コンピュータインテグ	

今後、光加入者伝送システムが普及し、電話局と加入者間に大量のファイバが張り巡らされた状態において、電話局内で加入者へ向かって数千から数万本のファイバが出て行く部分に設けられる MDF (main distribution frame: 主分配架) で、光ファイバを自動的に自由に切り替えられるスイッチ (自動 MDF スイッチ) あるいは、面的に張り巡らされたファイバ網の適当な場所 (マンホール内とか電柱の上) で任意に光ファイバを切り替えられるクロスコネクタスイッチが必要となる。

これらの光スイッチシステムは、最低で  $10^2 \times 10^2$ 、望ましくは  $>10^3 \times 10^3$  程度の規模が必要であり、さらに上記(1)~(5)の条件がほぼそのまま要求される。特に(5)の自己保持機能は、普段ある状態に保持されている時は消費電力がゼロで、切り替え時のみに電力を必要とする機能であり、このような膨大なスイッチング素子を有するシステムにおいては極めて重要な条件となる。なお、この規模のスイッチを単体エレメントで実現することは、寸法上あるいは放熱上の制約から極めてむずかしいため、小規模なスイッチを複数段組み合わせて大規模化を図らざるをえない可能性が高い。その場合、各スイッチエレメント間を接続する光インターコネクション技術が重要となる。また、スイッチを屋外施設に設置する場合には、苛酷な環境条件下での高信頼性が要求される。以上の条件全てを満足し、かつ、経済性をも満足するスイッチは、現状技術のかなり先にあり、今後の抜本的なブレイクスルーが待たれる。当面は、ビル内での小規模な光分配架や光 LAN システムでの切替えスイッチあたりから実用化されると予想される。

### 3.3 光交換・光情報処理システム用スイッチ

光ファイバで伝送された高速広帯域な光信号を直接光レベルで交換することができれば、光-電気変換が不要となり、かつ光の持つ高速広帯域性・無誘導性・並列処理の可能性等がフルに生かされたシステムの実現が期待できる<sup>19)</sup>。交換機は大別すると、通話スイッチ回路とそれを制御する制御回路で構成されている。現在まで、主として通話路系を光化する検討が、上記観点から活発に行われている。光通話路スイッチとしては現在商用に供せられている電子交換機と同様に、空間分割型と時分割型があり、さらに光の特徴を生かした周波数(または波長)分割型スイッチも有望である。

空間分割型スイッチは、通話路自体は極めて広帯域なためそこを通る信号速度に本質的な制限がないこと、および切替え自体はそれほど高速である必要がないことがメリットである。LiNbO<sub>3</sub> 電気光学スイッチや石英導波

型 TO スイッチ等の小規模なマトリックススイッチは実用レベルにあり、したがってそれらを使用した小規模な光交換システムは技術的には実用可能であるが、光を使用することのシステムのなメリットが、現段階では見いだせないため商用化には至っていない。

時分割型光通話路スイッチは現状のシステムとの整合性に優れ、さらに多重化のメリットを生かして、ハードウェアの削減が可能である。しかしながら、電気的スイッチよりはるかに高速なスイッチング速度(例えば  $<0.1$  ns)が必要であり、さらに位相変換スイッチとして使用される、光双安定等を用いた光メモリスイッチの大規模化といった諸問題の解決が必要となる。

波長(周波数)分割型スイッチは光の持つ超大容量性、すなわちテラヘルツにおよぶ光の周波数を有効に利用できること、時分割型と同様に各種デバイスを多重使用できハード量を削減しうること、動作速度が比較的遅くて良いこと等のメリットがあり、将来が最も期待されている。また、光伝送の分野においても、テラビット伝送に向けて波長(周波数)多重伝送方式の研究開発がますます盛んになってきており、システム上の整合性と光デバイスの共通性からも魅力が大きい。

以上の各スイッチ単独では光通話路の大規模化が困難なため、これらを組み合わせた複合方式が提案されている。この中で、波長分割型スイッチを他のスイッチと組み合わせた方式、すなわち、波長・時分割複合交換方式と波長・空間分割複合方式が有力視されており、様々な基本検討が行われている。特に前者は高速で動作する波長切替えスイッチが必要ではあるが、現在の時分割システム技術が応用できること、将来、半導体波長変換スイッチで高速スイッチングが実現できる可能性が高いことから最も有望と考えられる。

以上の通話路用光スイッチのほか、交換機の制御回路の光化、あるいは光情報処理や光コンピューティングにも、上記各種スイッチが必要となる。これらの光スイッチに対して要求される条件は、やはりまず(1)大規模化である。光路切替え型スイッチ、光周波数・波長スイッチ、光メモリスイッチのいずれにおいても、 $10^2 \sim 10^3$  あるいはそれ以上のポートが必要となり、単体エレメントを使用するか、複数エレメントで構成するかは別として、 $10^2 \times 10^2 \sim 10^3 \times 10^3$  以上のマトリックススイッチがシステム構築に必須である。このためには、個々のスイッチング素子に必要な消費電力の大幅な低減が必要となる。大規模マトリックススイッチを実現するための重要な技術が面型のスイッチであり、面型発光素子との整合

性が良いことから、将来の光交換・光情報処理・光コンピューティングで必要とされる並列大容量信号処理に最適である。さらに、(2)周波数(波長)スイッチと光メモリスイッチはまだ開発の歴史が浅いため、素子特性の制御性・再現性・安定性・均一性といった基本特性が十分でなく、実用化に向けてそれらの向上が必要である。また、(3)半導体スイッチの場合、一般に挿入損失が大きいことから、LD アンプとの集積化によるロス補償が重要であり、併せて消光比の改善とファイバとの接続技術の確立が必須である。(4)光スイッチの高速化は、光伝送システムへの適用ではそれほど重要ではないが、光交換・光情報処理の分野では最重要な項目の一つであり、ナノからピコ秒オーダーのスイッチング速度が要求される。

現状の光伝送システムでは、広い波長範囲での動作、自己保持機能、偏波に対する無依存性、高い消光比等が要求されている。これらは、メカニカルスイッチ以外のほとんどのスイッチでは実現が不可能あるいは非常に難しい条件であり、方式サイドとしても、これらの条件のいくつかを十分満足しなくても成り立つシステム構成を考える必要がある。

以上述べた光スイッチに対する要求条件の概略を表2にまとめた。

#### 4. あとがき

以上、光スイッチの現状と将来展望を述べた。光スイッチは光技術が全面的に情報通信分野で使用されるために重要なデバイスであり、光技術の将来動向を決定するキーとなる。しかしながら、現状ではまだ十分な機能・特性が得られているとは言い難く、今後の展開に期待せざるをえない状況にある。特に光路切替え型スイッチの大規模化、波長スイッチ・メモリスイッチの商品化は緊急の課題であり、これらが実現すれば、光伝送システムの高機能化が達成されると共に、光交換システムが一举に現実のものとなる。特に、光による並列処理を可能とする各種面型スイッチの進展に期待したい。

光伝送の場合は、光を使用することにより初めて経済化と高機能化が達成された、いわば「光でなければできない」と言った状況であったため、光技術の導入は極めて自然のかたちでスムーズに行われた。一方、これからの分野では、残念ながらまだ「光でもできる」程度であり、そのできるレベルもそれほど高くないため、実用にはかなりの時間が必要であらう。しかしながらレーザーが発明されてまだわずか30年、光エレクトロニクス技術は人類の長い歴史の中で、まだ始まったばかりであり、21世紀も含めてこれからの発展に無限の可能性を秘めていると言っても過言ではない。

#### 文 献

- 1) たとえば、西沢紘一監修：光通信微小光学系システム設計・応用の要点、第7章(日本工業技術センター、1985)。
- 2) S. Nagaoka, *et al.*: OFC '84 MB2 (1984)。
- 3) たとえば、S. Nagasawa, *et al.*: Trans. IEICE, **E70** (1987) 696-698。
- 4) R. V. Schmidt, *et al.*: Electron. Lett., **12** (1976) 575。
- 5) M. Kawachi: Opt. Quantum Electron., **22** (1990) 391-416。
- 6) J. E. Zucker, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **55** (1989) 2280。
- 7) K. Ishida, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **50** (1987) 141-142。
- 8) H. Yanagawa, *et al.*: IEEE J. Lightwave Technol., **LT-8** (1990) 1192-1197。
- 9) たとえば、村田 茂：信学会光スイッチング技術研究委員会, PST 91-42 (1992)。
- 10) Y. Yoshikuni, *et al.*: Electron. Lett., **22** (1986) 1153-1154。
- 11) M. C. Amman, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **54** (1989) 2532-2533。
- 12) たとえば、S. Illk, *et al.*: Electron. Lett., **27** (1991) 2207。
- 13) H. Kawaguchi: Opt. Quantum Electron., **19** (1987) S1。
- 14) D. A. B. Miller, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **QE-21** (1985) 1462。
- 15) K. Kasahara, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **52** (1988) 679。
- 16) C. Amano, *et al.*: IEEE Photon. Tech. Lett., **3** (1991) 736-738。
- 17) 新田 淳, ほか：信学会技術研究報告, OQE87-38 (1987)。
- 18) たとえば、N. Tomita, *et al.*: NTT Rev., **3** (1991) 97-104。
- 19) たとえば、鈴木修司, ほか：信学会誌, **72** (1989) 149-156。