

# 解説

## LiNbO<sub>3</sub> 系光スイッチ

西本 裕・近藤 充和

日本電気(株)光エレクトロニクス研究所 〒216 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

(1992年5月19日受理)

### LiNbO<sub>3</sub> Optical Switches

Hiroshi NISHIMOTO and Michikazu KONDO

Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation,  
4-1-1, Miyazaki, Miyamae-ku Kawasaki 216

#### 1. はじめに

幹線系光通信システムの大容量化や構内のデータ通信のための光 LAN の導入など情報伝送路の光ファイバ化が着実に進んでいる。今後も光加入者に代表される光ネットワークの構築が進み、高精細動画 (HDTV) などの高速、広帯域の情報サービスが付加されていく。

この状況に呼応し光導波路型デバイスが注目をあびている。その代表格の一つが光-電気変換を介さずに光信号のままに光伝送路の切り替えを行うことができる光スイッチ<sup>1-4)</sup>である。従来の電気系では困難であった数百 Mb/s から数 Gb/s という高速、広帯域光信号の切り替えを可能にする (原理的にビットレートフリーである)。特に多素子の光スイッチを多段に集積したマトリクス光スイッチは光信号の交換を実現する手段として必須であり、このスイッチを用いた光交換システム<sup>5,6)</sup>や光デジタルクロスコネクタシステム<sup>7)</sup>などの研究開発が活発に行われている。もう一つの代表格が光波長チャープニングの少ない信号発生源としてのマッハツェンダ型光変調器<sup>8-10)</sup>である。この変調器による強度変調光は半導体レーザーの直接変調光に比べ光ファイバの波長分散に対する耐性が強いので、長距離高速光伝送を可能にすることが実証されている。

これらの光導波路型デバイスには通常強誘電体<sup>1,2)</sup>および化合物半導体<sup>3,4)</sup>等の材料が用いられる。この中で強誘電体である LiNbO<sub>3</sub> の電気光学効果を用いた光スイッチ/変調器は、

##### ① 低導波損失

##### ② 光ファイバとの低結合損失

##### ③ 比較的低電圧なスイッチ/変調動作

などが容易に得られるという優れた特徴を持つため、20年近く研究開発が世界各国で行われ、高性能・高機能化が着実に進められてきたが、ごく最近までなかなか実用化に至らなかった。これは従来の光システムに必要性が生じなかったことと、デバイスが DC ドリフトと呼ばれる不安定現象に代表される信頼性上の問題を有しているためである。しかしこの数年、光システム側の要求が高まるにつれ光導波路型デバイスの実用化を念頭においた動きが活発化している。なかでも光計測器である OTDR 用に開発された2個の光スイッチ素子を集積した LiNbO<sub>3</sub> 光スイッチは既に製品化され、実用に供されている<sup>11)</sup>。また変調器も実験用として世に送り出されており、徐々にではあるが実用化が進んでいる。

本稿では、上述したように時代のニーズに応じて実用化の機運が高まっている光導波路型 LiNbO<sub>3</sub> デバイスのなかで光スイッチ、特にその中で最も集積度が高いマトリクス光スイッチを取り上げ、現状ならびに展望について述べる。

#### 2. LiNbO<sub>3</sub> 光スイッチ

##### 2.1 LiNbO<sub>3</sub> 光スイッチの概要

光スイッチは、電気光学結晶である LiNbO<sub>3</sub> 結晶への印加電界 ( $E$ ) に比例して発生する式(1)で表せられる結晶の屈折率変化 ( $\Delta n$ ) (ポッケルス効果と呼ばれる) を利用する。

$$\Delta n = \frac{1}{2} r_{ij} n^3 E \quad (1)$$

$\Delta n$ : 基板の屈折率変化: 常光では  $\Delta n_o$   
: 異常光では  $\Delta n_e$

$n$ : 基板の屈折率: 常光では  $n_o$   
: 異常光では  $n_e$

$r_{ij}$ : 電気光学 (ポッケルス) 定数

LiNbO<sub>3</sub> 基板の場合、最大の電気光学 (ポッケルス) 定数は  $r_{33}$  であり、結晶の  $z$  軸に電界を印加した場合に最大の屈折率変化が異常光に対して得られる。したがって  $r_{33}$  を利用し、異常光のみをスイッチングするタイプが最も低い動作電圧が得られる。 $r_{33}$  を利用できる  $z$  軸に、効率よく電界を印加することが可能な  $z$ -cut LiNbO<sub>3</sub> 基板を用いた TM 偏光動作のスイッチがこれに相当する。

主な光導波路型光スイッチの構造としては図 1 に示すものがある<sup>12)</sup>。この中で (a) の方向性結合器型<sup>13)</sup>はサイズ、動作電圧、クロストークとも比較的良好な特性が得られるため、初期から盛んに研究が進められている。(b)全反射型<sup>14)</sup>、(c)バランスブリッジ型<sup>15)</sup>も数多くの検討がなされているが、最近では動作の安定性および制御性の容易さから、(d)の分岐型スイッチを用いたデジタルスイッチの研究も進められている<sup>16)</sup>。

LiNbO<sub>3</sub> 光スイッチの光導波路形成法には金属熱拡散法やプロトン交換法などがある。現在は基板上に所望の導波路寸法にパターン化された Ti 金属を、1,050°C 前後の温度で熱拡散する方法が最も一般的である。本方法では低損失導波路 (~0.2 dB/cm)、ならびにシングルモード光ファイバとの高効率結合 (損失は 0.5 dB 前後) が容易に得られる。方向性結合器型光スイッチの断面構造を図 2 に示す。基板に電界を印加する制御電極は電極材料による光吸収を防ぐために一般に SiO<sub>2</sub> の光学的バッファ層を介して光導波路上に形成される。

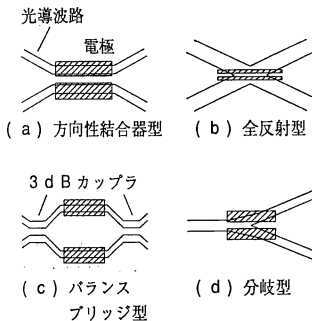


図 1 LiNbO<sub>3</sub> 光導波路型光スイッチの構造例

光スイッチの検討では最も低電圧動作が得られる  $r_{33}$  を利用した TM 偏光動作のデバイスが主に扱われていた。しかし、光スイッチを実用システムに適用する際には、偏光調整を必要とせずシングルモードファイバだけによる接続が可能となる偏光無依存化が必要不可欠であり、現在の主流となっている。

### 2.2 LiNbO<sub>3</sub> 光スイッチの偏光無依存化

偏光無依存化としては、図 3 (a)<sup>17)</sup>, (b)<sup>18)</sup>, (c)<sup>16)</sup>に示すものなどが検討されている。このなかで (a) の  $z$ -cut 基板を用いた  $\Delta\beta$  同相駆動方式の方向性結合器型光スイッチが現在のところ最も低電圧が得られている。これは Ti 拡散条件などの光導波路製作条件を高精度に制御して TM, TE 両偏光に対する完全結合長を一致させることにより、クロス状態は電圧無印加 (0V) で与える。一方、バー状態は TM, TE 偏光に対してそれぞれ電気光学定数  $r_{33}$ ,  $r_{13}$  を作用させて実現される。ただし、偏光依存型 (TM 偏光動作) で用いる最大の電気光学定数  $r_{33}$

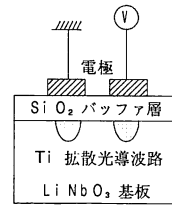


図 2 LiNbO<sub>3</sub> 方向性結合器型光スイッチの断面図

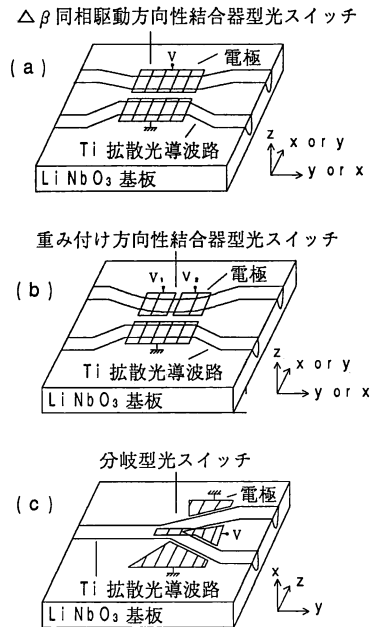


図 3 LiNbO<sub>3</sub> 偏光無依存型光スイッチの構造例

に比べて約 1/3 の大きさの  $r_{13}$  を TE 偏光に対して用いる必要があるため、スイッチ電圧は偏光依存動作と比較して約 3 倍の大きさを必要とする。試作された光スイッチは素子長が 19 mm のとき、約 18 V のスイッチ電圧で偏光無依存動作が得られている。

### 3. 光スイッチの応用例

#### 3.1 OTDR 用光スイッチ

図 4 に光ファイバの破断点、伝搬損失、接続ロス、接続位置などを測定するのに不可欠な光計測器である OTDR (optical time-domain reflectometer) 用に開発、製品化された LiNbO<sub>3</sub> 光スイッチの構成を示す<sup>11)</sup>。低クロストーク化のために 2 段の方向性結合器型偏光無依存光スイッチを縦属配置している。AO 光スイッチの後継デバイスとして位置付けることができるものであり、AO スwitch の数十 ns に比べ数 ns で光路の切り替えが行える。この高速動作特性により、OTDR の測定不能域を数 m と従来の数十 m より大幅に短くすることができる。

#### 3.2 マトリクス光スイッチ

##### 3.2.1 マトリクス構成

マトリクス光スイッチとは多数の  $2 \times 2$ ,  $1 \times 2$ ,  $2 \times 1$  の光スイッチ素子を多段に接続することで  $M \times N$  ( $M$  入力,  $N$  出力) に構成されたものである。光-電気変換を介さずにビットレートフリーで光信号の交換を実現するデバイスとして必須である。

図 5 に代表的なノンブロッキング (非閉塞) マトリクススイッチの構成を  $4 \times 4$  の場合を例に示す。

(a) のクロスバー構成が非閉塞を得るための最も基本的なものである。(b) の構成<sup>19)</sup> ではクロスバー構成に比べスイッチ素子数は同じであるが、光透過方向のスイッチ段数が少なくかつ平均化されている。ここで、スイッチ素子長とスイッチ電圧の間にはほぼ反比例の関係があるので、各マトリクス構成においてデバイス全長が同じ場合、光透過方向のスイッチ段数が少ない構成ほどスイ

ッチ素子を長尺化でき、低電圧動作が得られる。(c) の 2 重化構成では各クロスポイントを 2 重化することによってクロストークが低減される。(d) のツリー構成でもやはり  $1 \times N$  の分配スイッチと  $N \times 1$  のセクタスイッチによって低クロストークが得られる。(e) の構成<sup>11)</sup> ではさらに構成が簡略となり、光透過方向のスイッチ段数は他の方式に比べて最も少なくできる。したがって、スイッチ素子を一番長くでき、スイッチ電圧を最も低くできる。また、ツリー構成と同様に低クロストークも得られる。

表 1, 2 に各構成の特性比較を示す。簡略型ツリー構成はクロストーク特性、スイッチ電圧とも他の構成に比

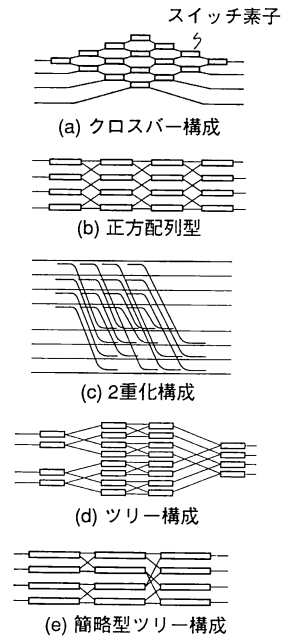


図 5  $4 \times 4$  ノンブロッキングマトリクス光スイッチの構成法

表 1 マトリクス構成法によるスイッチ電圧の比較

構成	(a)	(b)	(e)
スイッチ電圧	2.3 Vs	1.5 Vs	Vs

Vs: 図 5 (e) の構成スイッチ電圧

表 2 マトリクス構成法によるクロストークの比較

構成	(a)	(b)	(e)
クロストーク	$(N-1)X$	$(N-2)X$	$X$

$N$ : マトリクスサイズ,  $X$ : クロスポイントのクロストーク (各光スイッチ素子のクロストーク)

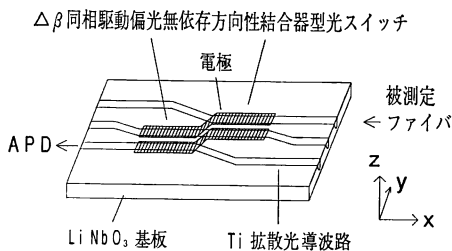


図 4 OTDR 用 LiNbO<sub>3</sub> 光スイッチの構造

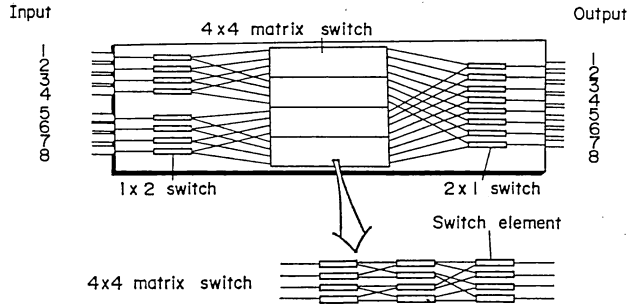


図 6 偏光無依存 LiNbO<sub>3</sub> 8×8 マトリクス光スイッチの構成

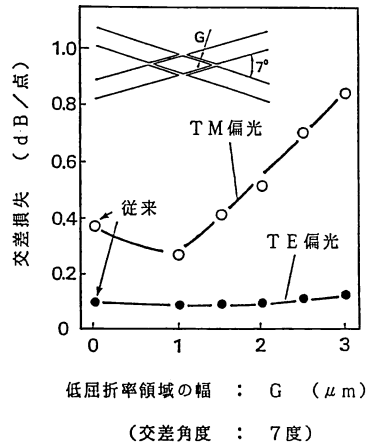
べて優れている。

3.2.2 LiNbO<sub>3</sub> 偏光無依存マトリクス光スイッチ

マトリクス光スイッチは当初特定の偏光に対して動作する偏光依存型 (r<sub>33</sub> を用いた TM 偏光動作) の検討が主であり, 再配置非閉塞型ではあるが 16×16 まで拡大されている<sup>20)</sup>. 現在は以下に述べる実用システム対応の偏光無依存型の研究が進んでいる。

偏光無依存型マトリクス光スイッチにおいては, 多段接続する光スイッチ素子が偏光依存型に比べ約 3 倍の動作電圧が必要であるため, 素子長の長尺化により低電圧動作化を図ることが大きな課題となる. この課題に対しては光スイッチ素子長を最長にできる図 5 (e) の簡略型ツリー構成が最適である. 図 6 に示す構成により, 合計 64 個の偏光無依存光スイッチ素子が集積された偏光無依存型では最大規模の 8×8 スイッチが実現されている<sup>21)</sup>. 簡略型ツリー構成の適用により, 図 5 (a), (b) の構成の適用に比べ, スイッチ電圧を 25~50% 低減でき, 1.3 μm において約 80 V で偏光無依存スイッチ動作が得られている. ファイバを接続した場合の各接続パスの TE, TM 偏光の挿入損失は, 曲り導波路の幅を太くする構造<sup>22)</sup>により低損失化を図り, TM 偏光で 6.3~12.0 dB, TE 偏光で 6.5~8.5 dB という比較的低い挿入損失を得ている. さらなる低損失化のために交差導波路の損失低減の検討が進められており (図 7)<sup>23)</sup>, TM 偏光の損失改善が得られている. 図 7 の構造の適用により, TM 偏光に関して約 2 dB の低損失化, 同時に偏光間の損失ばらつきが低減が得られると予想される. 各偏光におけるクロストークはすべての接続パスで -18 dB 以下が確保されている。

図 8 は後で述べる空間分割型光交換システム専用開発された 8×8 と同じ設計値で構成された偏光無依存 8×4 機能光回路である<sup>24)</sup>. 分配サービス系用の分岐-セレクトア型の 4×4 光スイッチと簡略型ツリー構成を用いた電話サービス系用の 4×4 マトリクス光スイッチを四



低屈折率領域の幅 : G (μm)  
(交差角度 : 7度)

図 7 交差導波路構造と損失

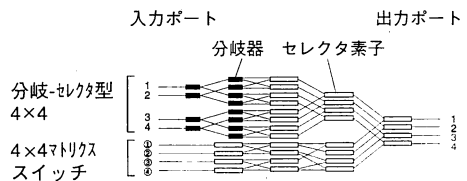


図 8 偏光無依存 LiNbO<sub>3</sub> 8×4 機能光回路

つの 2×1 光スイッチ素子で結合させた構成であり, 1 チップに集積されている。

4. マトリクス光スイッチのシステム適用

4.1 空間分割型光交換システムへの適用

図 9 は LiNbO<sub>3</sub> 偏光無依存マトリクス光スイッチを用いて構築された空間分割型光交換システムの構成である<sup>5)</sup>. TV 電話サービスでは 3 段の 32 回線リンク接続通路を用い, HDTV 分配サービスでは HDTV 光信号を 1×8 外部分岐器経由で 3 段リンク接続通路の 3 次スイッチ (図 4: 8×4 機能光回路) に入力する構成を用いている. これにより 32 の加入者は TV 電話サービスあるいは 4 種類の HDTV 信号の分配サービスを受ける

ことができ、実用性が実証されている。また、半導体レーザー型光アンプを用いた光スイッチの損失補償による回線数拡大の検討も進み、100回線以上の実現可能性が示されている<sup>25)</sup>。

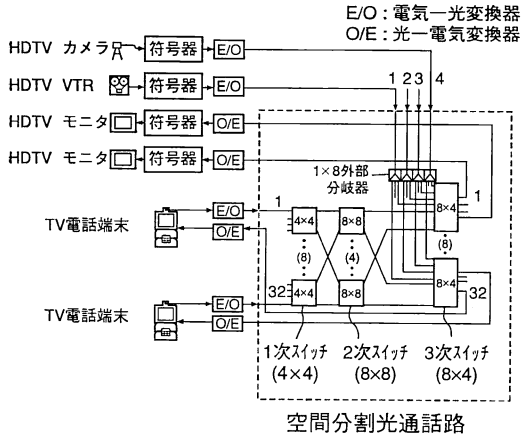


図 9 偏光無依存空間分割型光交換システムの構築例

4.2 デジタルクロスコネクトシステムへの適用

図 10 に LiNbO<sub>3</sub> 偏光無依存マトリクス光スイッチがキーエレメントとなる、光デジタルクロスコネクトシステム (光 DCS) の (a) システム構成、ならびに (b) ノード構成を示す<sup>26)</sup>。

光 DCS とは、通常の通信は現有光伝送路を介して行われ、各ノードで電気信号に変換され電気 DCS へと入力されるが、現用光伝送路に障害が発生した場合、予備回線を用いて光-電気変換を介さずに他ノードの光スイッチ回路網を経由して経路を迂回させ、障害を復旧させるシステムである。迂回は場合により、複数のノードを通る。また、光 DCS は現用光伝送路の保守点検作業時にも利用できる。

本システムは、高ビットレートへの拡張性も自由であり、LiNbO<sub>3</sub> 偏光無依存マトリクス光スイッチと半導体レーザー型光アンプを用いたシステムの提案、ならびに実証がなされている<sup>26)</sup>。

5. 光スイッチの課題

光スイッチは特性、実装、製作歩留りの問題はほぼ解

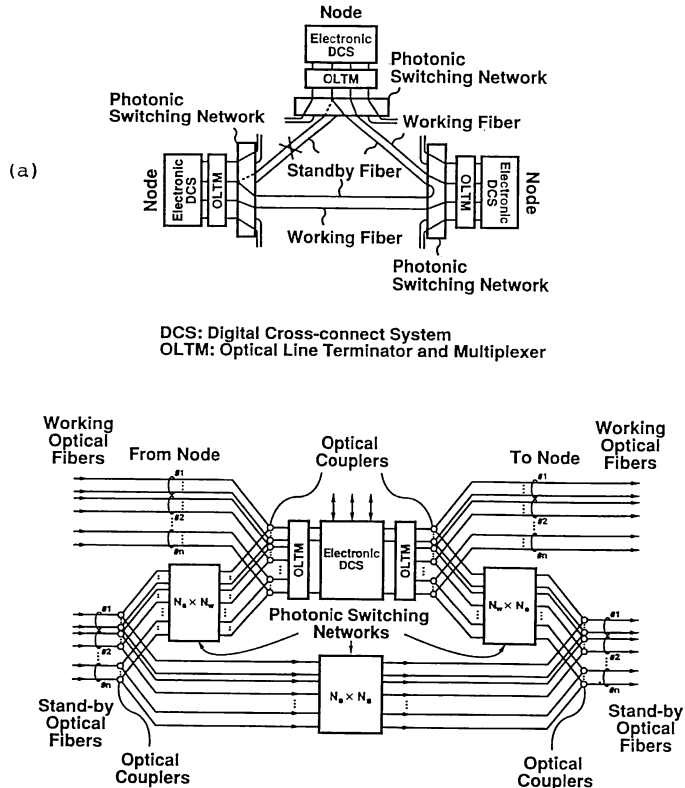


図 10 光デジタルクロスコネクトシステムの構成 (a) システム構成, (b) ノード構成.

決されており、残る課題は電気光学効果を用いた光導波路型 LiNbO<sub>3</sub> デバイスの共通課題でもある DC ドリフトの完全な抑圧である。高速変調器では DC ドリフトの発生に対応して印加電圧を変化、追従させる制御系により信頼性時間の延長がなされているが<sup>27)</sup>、加入者に近い適用分野や多集積されたスイッチではデバイスそのものの DC ドリフトを解決しないかぎりシステムにはなかなか受け入れられない。今後、製造方法、製造工程、結晶基板などの改良が必要であろう。

## 6. む す び

LiNbO<sub>3</sub> 光導波路型光スイッチを取り上げ、その現状技術について述べた。これらのデバイスは光交換システム、デジタルクロスシステムに代表される近々到来する高速、広帯域信号のサービスを可能にする光ファイバネットワークのキーエレメントである。

LiNbO<sub>3</sub> を用いたものは特性的にはすでにはば実用レベルに達しており、今後の実用、製品化に関する急速な発展が大いに期待される。この発展が光による高速、広帯域信号のサービス網の構築を促進させることを期待する。

## 文 献

- 1) H. Nishimoto, S. Suzuki and M. Kondo: *Electron. Lett.*, **24** (1988) 1122-1123.
- 2) P. Granstrand, L. Thylen, B. Stoltz, K. Bergvall, W. Doldissen, H. Heidric and D. Hoffmann: *Technical Digest of Integrated and Guided-Wave Optics, GA, WAA3* (1986) pp. 4-6.
- 3) H. Inoue, H. Nakamura, K. Morosawa, Y. Sasaki, T. Katsuyama and N. Chinone: *IEEE J. Select. Areas Commun.*, **6** (1988) 1262-1266.
- 4) K. Komatsu, K. Hamamoto, M. Sugimoto, A. Ajisawa, Y. Kohga and A. Suzuki: *IEEE J. Lightwave Technol.*, **9** (1991) 871-878.
- 5) 鈴木修司, 西本 裕, 岩崎正明, 梶谷俊一, 鹿田 實, 芦辺 稔, 明石文雄, 三橋真成: 電子情報通信学会交換システム研究会資料, SSE88-150 (1988).
- 6) S. Suzuki, T. Terakado, K. Komatsu, K. Nagashima, A. Suzuki and M. Kondo: *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-4**, **7** (1986) 894.
- 7) 鈴木修司, 藤原雅彦, 坂口 尚: 電子情報通信学会交換システム研究会資料, SSE90-98 (1990).
- 8) M. Seino, N. Mekada, T. Yamane, Y. Kubota, M. Doi and T. Nakazawa: *ECOC '90, PD-3* (1990).
- 9) K. Noguchi, K. Kawano, T. Nozawa and T. Suzuki: *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **3** (1991) 333-335.
- 10) マダブシ・ランガラジ, 細井 亨, 近藤充和: 1992年電子情報通信学会春季全国大会, C-214 (1992).
- 11) 中村真一, 川島比左夫, 豊原 篤, 伊関雄二, 西本 裕, 青山 勉: 1991年電子情報通信学会春季全国大会, C-237 (1991).
- 12) 西原 浩, 春名正光, 栖原敏明: 光集積回路 (オーム社).
- 13) M. Papuchon, Y. Combemale, X. Mathieu, D. B. Ostrawski, L. Reiber, A. M. Roy, B. Sejourne and M. Werner: *Appl. Phys. Lett.*, **27** (1975) 289-291.
- 14) C. S. Tsai, B. Kim and F. R. El-Akkari: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-14** (1978) 513-517.
- 15) M. Minakata: *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 40-42.
- 16) P. Granstrand, B. Lagerstrom, P. Svensson, B. Stoltz, K. Bergvall, J.-E. Falk and H. Olofsson: *Electron. Lett.*, **26** (1990) 4-5.
- 17) M. Kondo, Y. Ohta, Y. Tanisawa, T. Aoyama and R. Ishikawa: *Electron. Lett.*, **23** (1987) 1167-1169.
- 18) R. C. Alferness: *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 748-750.
- 19) 佐脇一平, 山根隆士, 下江敏夫, 中島啓幾: 昭和62年電子情報通信総合全国大会 (1987) p. 4-242
- 20) P. J. Duthie, M. J. Wale and I. Bennion: *Technical Digest of 1990 Topical Meeting on Photonic Switching (Salt Lake City)*, 13A-3 (1990).
- 21) H. Nishimoto, M. Iwasaki, S. Suzuki and M. Kondo: *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **2** (1990) 634-636.
- 22) 西本 裕, 鈴木修司, 近藤充和: 電子情報通信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料, OQE88-64 (1988).
- 23) 神田虎彦, 西本 裕, 近藤充和: 第37回応用物理学関係連合講演会, 29 p-F-6 (1989).
- 24) 西本 裕, 岩崎正明, 鈴木修司, 近藤充和: 電子情報通信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料, OQE88-147 (1988).
- 25) M. Fujiwara, H. Nishimoto, T. Kajitani, M. Itoh and S. Suzuki: *IEEE J. Lightwave Technol.*, **9** (1991) 155-160.
- 26) 白垣達哉, パーク・コンラッド, 塩沢隆広, 鈴木修司, 藤原雅彦, 坂口 尚: 1992年電子情報通信学会春季全国大会, B-1003 (1992).
- 27) M. Seino, T. Nakazawa, Y. Kubota, M. Doi, T. Yamane and H. Hakogi: *ECOC '92, PD-3* (1992).