

## ■9群 (電子材料・デバイス) - 6編 (受動・機能デバイス)

---

### 4章 光スイッチングデバイス

#### 【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 4-1 半導体光増幅器光スイッチ
- 4-2 電気光学効果スイッチ
- 4-3 熱光学光スイッチ
- 4-4 半導体導波路光スイッチ

## ■9 群-6 編-4 章

### 4-1 半導体光増幅器光スイッチ

(執筆著者：中川剛二) [2011年8月 受領]

半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier : SOA) は、直接遷移型の半導体素子に電流を注入することで光利得を、また電流を遮断することで吸収による光損失を発生させることが可能であり、電流注入による光透過率の切替えは活性層内のキャリア寿命で決まるため、ナノ秒オーダーと非常に高速である。これらの性質を利用した SOA 光ゲートスイッチは高い消光比と高速な切替え速度が得られ、スイッチの制御は On/Off のみで位相調整などの複雑な制御が不要であり、光パケット/パーストスイッチシステムや大規模コンピューティングシステム用光インターコネクタなど様々な適用が検討されている。本稿では、光スイッチシステムの大容量化/大規模化に適用するために開発された SOA 光ゲートスイッチについて、その諸特性及び集積化の開発動向について紹介する。

#### 4-1-1 SOA 光ゲートスイッチの諸特性

SOA 光ゲートスイッチを用いた高速光スイッチシステムでは、SOA 多段構成によるポート数拡大や波長多重 (Wavelength Division Multiplexing : WDM) 光信号適用によるポート当たり伝送帯域幅の増大が検討されている。このような構成の高速光スイッチシステムに適用する SOA 光ゲートスイッチでは、損失補償に必要な大きな光利得、多段構成でも高い光 SN 比を得るための小さな雑音指数 (Noise Figure : NF)、コヒーレントクロストークを抑圧するための高い消光比、WDM 信号に対応するための高い飽和光出力、などが必要とされる。また、偏波無依存であることも必須になる。これらの要求に対応するため、Corning や富士通から伸張歪み MQW (Multi-Quantum Well) 活性層を用いた埋込み導波路構造の SOA による高出力・偏波無依存型 SOA 光ゲートスイッチが報告されている<sup>1),2)</sup>。

#### 4-1-2 集積型 SOA 光ゲートスイッチ

SOA 光ゲートスイッチを用いた高速光スイッチシステムでは、一般にポート数の 2 乗に比例して SOA 光ゲート素子数が増大する。大規模な高速光スイッチシステムを現実的なサイズや消費電力で実現するためには、複数の SOA と光カプラ、光導波路などのパッシブ部品集積化による光モジュール数の低減が必須と言える。SOA 光ゲートスイッチの集積化技術は、SOA を含む化合物半導体基板上に平面光波回路 (Planar Lightwave Circuit : PLC) を組み合わせたハイブリット集積化と単一化合物半導体基板上へのモノリシック集積化に大別される。その集積規模はハイブリット集積で  $1 \times 8$ <sup>3)</sup> や  $4 \times 4$ <sup>4)</sup>、モノリシック集積で  $1 \times 4$ <sup>5)</sup> や  $4 \times 4$ <sup>6)</sup> が既に報告されている。以下では、多ポート光送受信素子などにおいても近年注目を集めるモノリシック集積技術を用いた SOA 光ゲートスイッチについて、最近の研究成果を幾つか報告する。

Corning は先に述べた高出力偏波無依存型 SOA の 10 ch アレイ集積化を報告している<sup>7)</sup>。ポリミドで平坦化した電極構造を利用して 10 本の高出力 SOA を非常に狭いピッチ長  $33.8 \mu\text{m}$  で配置し、素子サイズ  $1.5 \times 1.2 \text{ mm}$  を実現している。

Cambridge 大学は  $16 \times 16$  のモノリシック集積 SOA 光ゲート素子を報告している<sup>8)</sup>。テーパ導波路とエッチドミラーで構成された光カプラを用いて 16 個の SOA ゲートを正方形に配置

することで $4 \times 4$ のSOAスイッチエレメントを $1.5 \text{ mm}$ 角に集積しており、これら4つを3段カスケード接続することにより、 $6.3 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm}$ の $16 \times 16$ 光スイッチを実現している。ロスレスのスイッチ動作が可能であり、 $10 \text{ Gbps}$ の信号を通したときのパワーペナルティは $2.5 \text{ dB}$ 以下が得られている。

東京大学は $1 \times 100$ のモノリシック集積光スイッチを報告している<sup>9)</sup>。スターカプラと位相シフタを組み合わせた $1 \times 10$ 光スイッチエレメントを2段カスケード接続することにより、 $6.5 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ の $1 \times 100$ 光スイッチを実現している。このスイッチでは、SOAエレメントは位相シフタによるスイッチングエレメントの後段に配置されており、SOAは消光比と挿入損失の向上及び光レベル調整の機能を担っている。 $100 \text{ mA}$ 駆動時のスイッチ素子の損失は $14.7 \text{ dB}$ 以下、消光比は $50 \text{ dB}$ 以上であり、 $10 \text{ Gbps}$ の信号を通したときのパワーペナルティは $1 \text{ dB}$ 以下が得られている。

富士通は最大 $256 \times 256$ ポート規模光パケットスイッチシステムへの適用に向けた8入力、1出力(8:1)SOA光ゲートスイッチ素子を報告している<sup>10)</sup>。その素子構成を図1・1に示す。InP基板上に8ch SOA光ゲート、8:1光カプラ、1ch SOA光ゲートが集積されており、素子サイズは $3 \times 1 \text{ mm}$ である。各SOA光ゲートには伸張歪みMQW活性層を有し、低電気容量の高抵抗InP埋込み構造を適用した高出力・偏波無依存型SOAを用いている。また、光カプラ損失の前後に均等に光利得を配分する構成により各SOA光ゲートの光パワーレベルを均等化させることで、パターン効果の発現を抑えている。この素子のポート数は比較的小さいものの、図1・2に示すように気密パッケージによるモジュール化<sup>11)</sup>や、図1・3に示すように高速駆動回路を搭載したサブシステム化<sup>12)</sup>まで開発が進められており、実用レベルの光ゲートスイッチとして完成されている。

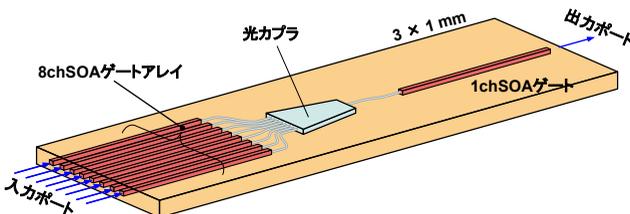


図1・1 8:1 SOA光ゲートスイッチ素子

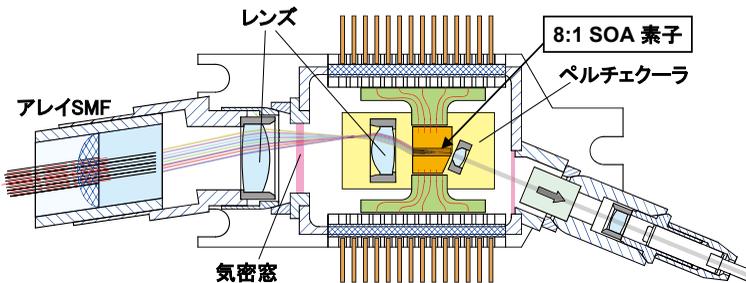


図1・2 8:1 SOA光ゲートスイッチモジュール

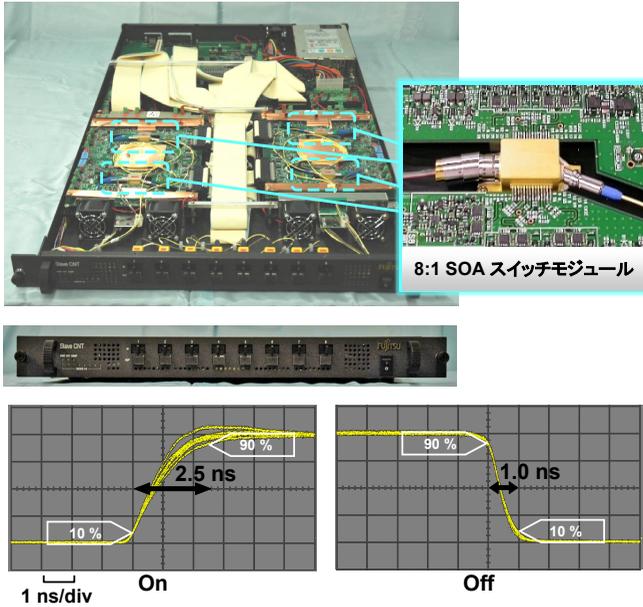


図 1-3 8:1 SOA 光ゲートスイッチサブシステムとそのスイッチ特性 (8 ポート分)

8 ch SOA と 1 ch SOA の両 SOA ゲートに 300 mA を同時注入した ON 状態におけるモジュール利得は全ポートで 12.9 dB 以上であり、PDG は全ポートで 1.5 dB 以下である。導波路構造の最適化により素子内迷光を抑圧した結果、1~300 mA 間での消光比は全ポート各偏波方向で 81 dB と非常に高い値が得られており、大規模光パケットスイッチングシステムへ適用可能な特性を実現している。サブシステムでは、プリエンファシス方式の適用により 300 mA の駆動電流を出力可能な高速ドライバ回路を実現した。このドライバ回路を用いて高出力 SOA 光を 0~300 mA 間でスイッチ動作させた際に、立ち上がり・立ち下がりとも 2 ナノ秒の切替え時間を報告している。

SOA 光ゲートスイッチは光ゲート特性、集積度の両面で着実な進展が見られており、今後これらのデバイスの適用可能範囲が明らかにされていくと考えられる。

#### ■参考文献

- 1) A. Borghesani, N. Fensom, A. Scott, G. Crow, L. Johnston, J. King, L. Rivers, S. Cole, S. Perrin, D. Scrase, G. Bonfrate, A. Ellis, I. Lealman, G. Crouzel, S. Cole, L.H.K. Chun, A. Lupu, E. Mahe, and P. Maigne : "High saturation output power (>16.5 dBm) and low noise figure (<6 dB) semiconductor optical amplifier for C-band operation," in proc. of OFC'03, pp.534-536, 2003.
- 2) S. Tanaka, S. Tomabechi, A. Uetake, M. Ekawa, and K. Morito : "Record high saturation output power (+20 dBm) and low NF (6.0 dB) polarization-insensitive MQW-SOA module," Electron. Lett., vol.42, no.18, pp.1059-1060, 2006.
- 3) F. Dorgeuille, L. Noirie, J.-P.Faure, A. Ambrosy, S. Rabaron, F. Boubal, M. Schilling, and C. Artigue : "1.28 Tbit/s throughput 8x8 optical switch based on arrays of Gain-Clamped Semiconductor Optical Amplifier," in proc. of

OFC 2000, PD 18, 2000.

- 4) Y. Yamada, H. Terui, Y. Ohmori, M. Yamada, A. Himeno, and M. Kobayashi : “Hybrid-integrated  $4 \times 4$  optical gate matrix switch using silica-based optical waveguides and LD array chips,” J. Lightw. Technol, vol.10, pp.383-389, 1992.
- 5) K. Hamamoto, T. Sasaki, T. Matsumoto, and K. Komatsu : “Insertion-Loss-Free  $1 \times 4$  Optical Switch Fabricated using Bandgap-Energy-Controlled Selective MOVPE,” in proc. of ECOC’96, pp.4.153-4.156, 1996.
- 6) M. Gustavsson, B. Lagerstrom, L.L. Thylen, M. Janson, L. Lundgren, A.-C. Morner, M. Rask, and B. Stoltz : “Monolithically integrated  $4 \times 4$  InGaAsP/InP laser amplifier gate switch arrays,” Electron. Lett., vol.28, no.24, pp.2223-2225, 1992.
- 7) M.H. Hu, H. Leblanc, C. Caneau, S. Coleman, X.S. Liu, C.E. Zah : “Densely-spaced, Polarization-insensitive, Low-noise, High-saturation-power Semiconductor Optical Amplifier,” in proc. of OAA 2006, OWB 3, 2006.
- 8) H. Wang, A. Wonfor, K.A. Williams, R.V. Penty, and I.H. White : “Demonstration of a Lossless Monolithic  $16 \times 16$  QW SOA Switch,” in proc. of ECOC 2009, PD 1.7, 2009.
- 9) I.M. Soganci, T. Tanemura, K. Takeda, M. Zaitso, M. Takenaka, and Y. Nakano: “Monolithic InP 100-Port Photonic Switch,” in proc. of ECOC 2010, PD 1.5, 2010.
- 10) S. Tanaka, S.H. Jeong, S. Yamazaki, A. Uetake, S. Tomabechi, M. Ekawa, and K. Morito : “Monolithically Integrated 8:1 SOA Gate Switch With Large Extinction Ratio and Wide Input Power Dynamic Range,” Journal of Quantum Electronics, vol.45, pp.1155-1162, Sep. 2009.
- 11) G. Nakagawa, Y. Kai, S. Yoshida, Y. Aoki, K. Sone, and S. Kinoshita : “Novel Optical Coupling Technique for Enhancing the Performance of Integrated 8-Input/1-Output SOA Gate-Switch Module,” Journal of Lightwave Technology, vol.27, pp.4989-4994, Nov. 2009,
- 12) Y. Kai, K. Sone, S. Yoshida, Y. Aoki, G. Nakagawa, and S. Kinoshita : “A compact and lossless  $8 \times 8$  SOA gate switch subsystem for WDM optical packet interconnections,” in proc. of ECOC 2008, We.2.D.4, 2008.

## ■9 群-6 編-4 章

### 4-2 電気光学効果スイッチ

(執筆者：菅間明夫) [2011年11月 受領]

電気光学 (EO : Electro-Optic) 効果は非線形光学効果の一種で、電界を印加することで屈折率が変化する現象である。高速な変化が期待できるため、光変調器に多用されているが〔6 編 3 章 3-1 節参照〕、光スイッチにも応用されている。特に、光パケットスイッチングでは、通信データの経路をパケット単位で切り替えることを行うため、高速な光スイッチが求められており、電気光学効果スイッチが適している。

#### 4-2-1 電気光学材料と光スイッチ

電気光学効果を示す材料は無機結晶だけではなく有機分子も含まれ、非常に多岐にわたる。そのなかで、ニオブ酸リチウム (LN) は光変調器と同じく最も実用化が進んだ材料と言えよう。一方、電気光学ポリマーは、分子構造及びデバイス構造の自由度が非常に大きく、今後の発展が期待されている。

電気光学効果スイッチの例を表 2・1 に示す。マッハツェンダー干渉計 (MZI : Mach-Zehnder Interferometer) もしくは分岐光導波路を動作原理とした  $2 \times 2$ 、 $1 \times 2$  を基本ユニットとするものが多い。規模の大きな光スイッチが必要な場合は、基本ユニットをマトリクス状に組み合わせることで実現している。 $N \times N$  の規模を実現するためには、 $N^2$  個の基本ユニットが必要である。

表 2・1 電気光学材料と光スイッチの例

材 料	文献	スイッチ方式	切替え時間
LN (LiNbO <sub>3</sub> )	1)	MZI	40 ps
	2)	Y 分岐	5 ns
KTN (KTa <sub>1-x</sub> Nb <sub>x</sub> O <sub>3</sub> )	3)	MZI	92 ns
PLZT ((Pb <sub>1-x</sub> La <sub>x</sub> )(Zr <sub>1-y</sub> Ti <sub>1-y</sub> ) <sub>1-x/4</sub> O <sub>3</sub> )	4)	MZI	8 ns
電気光学 (EO) ポリマー	5)	方向性結合	—

#### 4-2-2 ビーム偏向式光スイッチ

マトリクス構成では、 $N$  が大きくなると急激に複雑化する欠点がある。ここでは、基本ユニット単独で大きなスイッチ規模を実現できる方式として、ビーム偏向式<sup>6)</sup>について述べる。

光スイッチの構造を図 2・1 に示す。入出力のチャネル光導波路以外の領域が 2 次元自由空間であるスラブ光導波路となっている。スラブ光導波路内に、ビームを伝搬させるためのコリメートレンズ及び集光レンズ、電気光学材料で形成した光偏向素子が配置されている。入射光は 2 つのレンズの間を平行ビームとなってスラブ光導波路内を伝搬していく。その途中で入力側の光偏向素子が、平行ビームを目的の出力端子の方向へと偏向させる。出力側の光偏向素子は、平行ビームの角度を元に戻し、出力光導波路に結合させる。2 個の光偏向素子を駆動することにより、任意の入出力間を切り替えることができる。

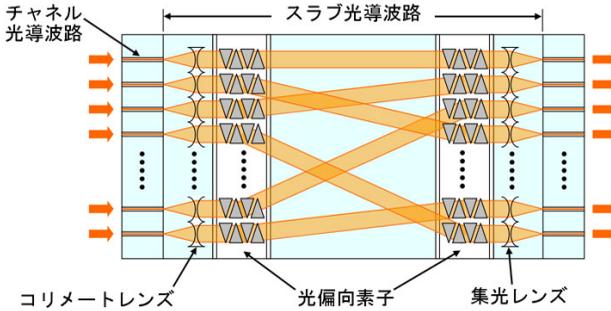


図 2・1 ビーム偏向式光スイッチ

光偏向素子の原理を図 2・2 に示す。材料単体で大きな電気光学効果が報告されていること、スラブ光導波路を形成可能であることから、電気光学材料として PLZT を用いている。Nb をドープして導電性を付与した SrTiO<sub>3</sub> 基板の上に、緻密な PLZT スラブ光導波路をエピタキシャル成長している。PLZT の La 含有量で屈折率を調整することにより、コア及びクラッドを作り分けている。

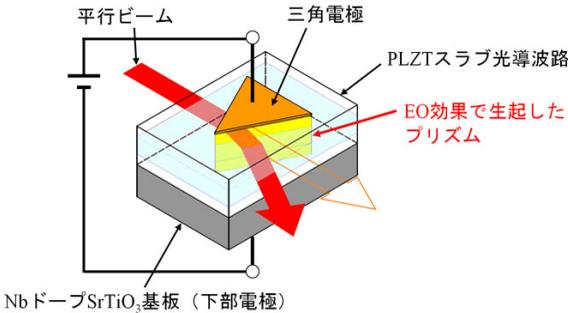


図 2・2 光偏向素子の原理

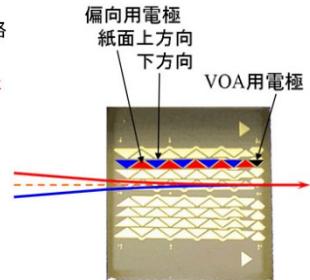


図 2・3 8×8 用 PLZT 光偏向素子 (出力側配置)

PLZT 光導波路上に形成した三角電極と下部電極となる Nb ドープ SrTiO<sub>3</sub> 基板との間に電圧を印加することにより、PLZT 内部に電気光学効果によるプリズムが生じ、ビームを曲げることができる。印加電圧を調整することにより、任意の偏向角度を実現することができる。実際の光偏向素子は、プリズム 1 個では偏向角が不足するため、図 2・3 に示すように連続した複数の三角電極を用いている。

この光スイッチの試作品の特性は、挿入損失 12 dB、切替え時間 350 ns である。これらはビーム偏向式の限界を示すものではない。切替え時間は、三角電極～基板間の静電容量と配線抵抗とによる RC 時定数によって決定されている。特に Nb ドープ SrTiO<sub>3</sub> 基板は高抵抗であり、低抵抗化による高速化の余地は残っている。

この光スイッチの特徴は、図 2・1 の基本構成を変えることなくスイッチ規模を増減できるこ

とである。また、PLZT 電圧の制御を応用して可変光アッテネータ (VOA : Variable Optical Attenuator) 機能を付加することができる。出力側光偏向素子の印加電圧を最適値からずらすことにより、平行ビームの集光点を移動させることができる。これを用いて、出力光導波路への結合量を変えることで実現している。

#### ■参考文献

- 1) K. Suzuki, T. Yamada, O. Moriwaki, H. Takahashi, and M. Okuno : "Polarization-insensitive operation of lithium niobate Mach-Zehnder interferometer with silica PLC-based polarization diversity circuit," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.20, no.10, pp.773-775, May 2008.
- 2) R. Krähenbühl, M.M. Howerton, J. Dubinger, and A.S. Greenblatt : "Performance and modeling of advanced Ti : LiNbO3 digital optical switches," J. Lightwave Tech., vol.20, no.1, pp.92-99, Jan. 2002.
- 3) K. Fujiura and K. Nakamura : "KTN optical waveguide devices with an extremely large electro-optic effect," Proc. SPIE, vol.5623, pp.518-532, Jan. 2005.
- 4) K. Nashimoto, D. Kudzuma, and H. Han : "Nano-second response, polarization insensitive and low-power consumption PLZT 4x4 matrix optical switch," Optical Fiber Communication Conference 2011, OThD3, Mar. 2011.
- 5) Y. Enami, D. Mathine, C.T. DeRose, R.A. Norwood, J. Luo, A.K-Y. Jen, and N. Peyghambarian : "Hybrid electro-optic polymer/sol-gel waveguide directional coupler switches," Appl. Phys. Lett., vol.94, 213513, Nov. 2009.
- 6) 尾中 寛, 甲斐雄高, 瀧田 裕, 菅間明夫, 青木重憲, 佐藤桂輔, アルアミン・アブドゥッラー, 種村拓夫, 中野義昭 : "PLZT 導波路偏向型光マトリックススイッチを用いた光バーストスイッチサブシステム," 信学論(B), vol.J91-B, no.3, pp.227-238, Mar. 2008.

## ■9 群-6 編-4 章

### 4-3 熱光学光スイッチ

(執筆者：渡辺俊夫) [2011 年 11 月 受領]

#### 4-3-1 はじめに

熱光学 (Thermo-Optic : TO) 効果とは物質の屈折率が温度によって変化する効果であり、それを利用して光の方路を切り替える光スイッチを構成することができる<sup>1)2)</sup>。

誘電体の屈折率  $n$  を表す Lorentz-Lorenz の式を温度  $T$  で微分すると、屈折率の温度依存性 (これを TO 定数と呼ぶ) を表す次式を得る。

$$\frac{\partial n}{\partial T} = \frac{(n^2 + 2)(n^2 - 1)}{6n} \left[ \frac{1}{\alpha_e} \frac{\partial \alpha_e}{\partial T} - \alpha_T \right] \quad (3 \cdot 1)$$

ここで、 $\alpha_e$  は電子分極率、 $\alpha_T$  は体積熱膨張率である。有機ポリマーでは第 2 項の体積膨張による効果が支配的であり、温度上昇に伴う密度減少によって屈折率が低下する。無機ガラスや半導体の場合は、第 1 項の電子分極率の温度依存性の効果が支配的である。その温度依存性の正負は物質によって異なるが、シリカ系ガラスでは正であり、温度が上昇すると屈折率は増大する。また、TO 定数の大きさは、有機ポリマーや半導体では  $10^{-4}$  程度、シリカ系ガラスでは  $10^{-5}$  程度である。

TO 効果を利用した光スイッチは、機械式的光スイッチのような可動部を持たないため、信頼性が高い。また、屈折率変化をもたらす温度はスカラー量であるため、ベクトル量の電界によって屈折率を変化させる電気光学効果や液晶を用いた光スイッチに対して、偏波依存性が小さい。

TO 効果は多くの物質に普遍的な現象であるので、様々な材料を用いて TO スイッチを構成することができるが<sup>3)~8)</sup>、なかでも、シリコン基板上にシリカ系ガラスからなる光導波路を形成した平面光波回路 (Planar Lightwave Circuit : PLC) を用いた TO スイッチ<sup>3)4)</sup> は、更に次のような特長を持っている。

- ① 光導波路材料のシリカ系ガラスが物理的・化学的な安定性に優れている。
- ② 光ファイバとの接続損失が低い。
- ③ スイッチ素子を高密度に集積することができ、波長合分波器や分岐回路など他の光回路要素との集積化も可能である。
- ④ ウェハ内に複数のチップを一括して作製できるので、大量生産に適している。

TO スイッチの応答速度は熱伝導で律速されるためミリ秒程度であるが、現在の光ファイバ通信ネットワークにおけるパスの切替えには十分な速度である<sup>9)</sup>。近年では、Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer (ROADM) など、実用の光通信システムにおいて、シリカ系ガラス PLC 型 TO スイッチが使用されている。

#### 4-3-2 素子構成と動作原理

PLC を用いた TO スイッチの基本要素は、2 個の 3 dB カプラと、それを結ぶ 2 本の光導波路アームとで構成される Mach-Zehnder 干渉計 (MZI) である<sup>3)4)</sup>。光導波路アームの上部にはヒ

ータが形成され、TO 効果によって屈折率を制御することで位相シフタとして機能する。このような MZI において、3 dB カプラのパワー結合率を  $K$  とすると、スルーポート（出力ポート 1）及びクロスポート（出力ポート 2）から出力される光のパワーはそれぞれ次式で表される。

$$P_{11} = 1 - 4K(1-K) \cos^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) \quad (3 \cdot 2a)$$

$$P_{12} = 4K(1-K) \cos^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) \quad (3 \cdot 2b)$$

ここで、 $\Delta\Phi$  は 2 本のアーム間の位相差であり、次式で表される。

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} n \cdot \Delta L - \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right) \cdot \Delta T \cdot L \quad (3 \cdot 3)$$

ここで、 $\lambda$  は波長、 $L$  はヒータの長さ、 $\Delta L$  は 2 本のアーム長の差である。

$K=0.5$  の理想的な場合、アーム間の位相差が  $\Delta\Phi=0$  のときに MZI スイッチ素子はクロス状態となり、クロスポートから光が 100% 出力され、スルーポートからの出力光は 0 である。また、アーム間の位相差が  $\Delta\Phi=\pi$  のときにスルー状態となり、スルーポートから光が 100% 出力され、クロスポートへの出力光は 0 である。製造誤差や波長依存性によって  $K=0.5$  からずれた場合には、クロス状態 ( $\Delta\Phi=0$ ) において、スルーポートへの漏れ光が生じるとともに、クロスポートへの光出力に過剰損失が生じる。例えば、 $K=0.45$  のとき、スルーポートのクロストークは -20 dB、クロスポートの過剰損失は 0.04 dB となる。しかし、スルー状態 ( $\Delta\Phi=\pi$ ) においては、 $K$  の値によらずクロスポートへの漏れ光は計算上 0 となり、スルーポートへの過剰損失も生じない。

上記の特性を考慮して、2 本のアームの光路長が半波長だけ異なる非対称 MZI が用いられる<sup>10)~12)</sup>。このような非対称 MZI では、ヒータ電力 OFF のときにスルー状態 ( $\Delta\Phi=\pi$ ) となり、 $K=0.5$  からずれた場合でも、クロスポートにおいて高い消光比を得ることができる。アームの光路長差についても製造誤差や波長依存性の影響が考えられるが、 $\Delta\Phi=\pi$  からの誤差が  $\pm 3\%$  以内であれば、クロストークは -26 dB 以下となる。かつては、位相誤差をこの範囲内に収めるために、光導波路作製後にトリミング処理を行って光路長を調整していたことがあったが<sup>11)</sup>、最近では、PLC 作製技術の向上により、トリミング処理は不要となっている<sup>12)</sup>。

非対称 MZI の短アーム側に配置したヒータに電力を印加して、アーム長の差  $\Delta L$  による半波長の光路長差をキャンセルすると、MZI スイッチ素子はクロス状態となり、式(3・2b)に従ってクロスポートから光が出力される。このとき、光出力は印加電力に対してアナログ的に変化するので、印加電力によって出力光パワーを調整することが可能であり、MZI スイッチ素子を可変光減衰器 (Variable Optical Attenuator : VOA) として用いることができる<sup>13)~18)</sup>。VOA は、光ファイバ伝送において光パワーレベルを等化する際に有用である。

クロス状態とスルー状態とを切り替えるために必要な消費電力は、光導波路材料の TO 定数と、ヒータの加熱効率によって決まる。このうち、ヒータの加熱効率は、光導波路材料の熱伝導率及び光導波路の断面構造に依存する。また、光導波路断面内の温度分布は、ヒータ単位長さ当たりの印加電力によって決まる。印加電力が一定のとき、ヒータが短いほど光導波路コア

の温度上昇は大きくなる。しかし、スイッチングに必要な位相シフトは、式(3・3)に示されるように温度上昇  $\Delta T$  とヒータ長  $L$  の積で決まるので、消費電力はヒータ長には依存しない。

シリカ系ガラスを用いた TO スイッチの場合、スイッチング電力は 400 mW 程度である<sup>3)</sup>。MZI のアーム部に断熱溝を形成し、横方向への熱拡散を抑制することによって、消費電力を低減することができる<sup>12),19),20)</sup>。更に、コア下部のクラッドまで除去することにより、消費電力を 20 mW まで低減した報告例がある<sup>21)</sup>。

TO スイッチでは、MZI のアーム間の光路長差が半波長と小さいため、屈折率の絶対値が変化しても位相差への影響は小さい。また、環境温度が変化しても、2 本のアームの温度差は変わらないので、アーム間の位相差は同じである。したがって、光導波路全体の温度を一定にするための温度調節機構（ペルチェ素子など）は通常不要である。

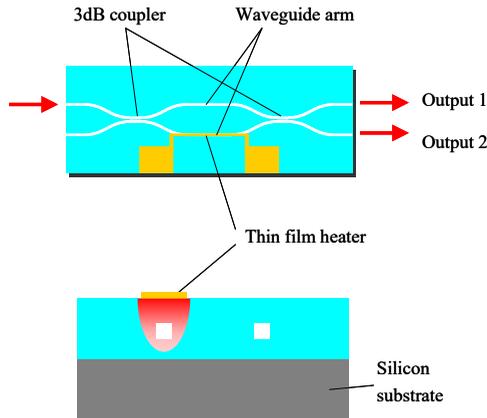


図 3・1 TO スイッチ素子の構造

TO スイッチの応答時間は、ヒータから光導波路コアまでの温度伝導時間によって決まる。したがって、ヒータからコアの距離が短いほど（すなわち、上部クラッドが薄いほど）応答時間は速くなる。ただし、上部クラッドを薄くしすぎると、伝搬光がヒータの影響を受けてしまい、特に TM 偏光の伝搬損失が増大するので、コアへの光の閉じ込めを強くする必要がある。シリカ系ガラスを用いた TO スイッチの場合、応答時間は 1~2 ms 程度である。

ヒータ ON の状態において、ヒータで発生した熱量は光導波路下部のシリコン基板を通して放熱され、熱平衡状態となっている。ヒータ電力を切断すると、ヒータの温度低下がコアへ伝導し、コアの温度が低下する。したがって、原理的には、ON-OFF 切替えにおける立ち上がりとし切り下がりの応答時間は同じである。

#### 4-3-3 光スイッチ回路の構成

上記の  $1 \times 2$  MZI スイッチ素子を基本として、これを多段に接続することにより、様々な光スイッチ回路を構成することができる<sup>10)~12),22)~30)</sup>。

図 3・2(a)は、4 個の MZI 素子を接続して、アド/ドロップ光スイッチを構成した例である。こ

ここで、消光比を高めるため、MZI 素子のクロスポートのみを使用し ON-OFF 機能に限定したゲートスイッチを  $2 \times 1$  スイッチ素子の前段に挿入している。この構成の光スイッチとしては、32 アレイのアド/ドロップ光スイッチを 1 チップに集積した例が報告されている<sup>22)</sup>。

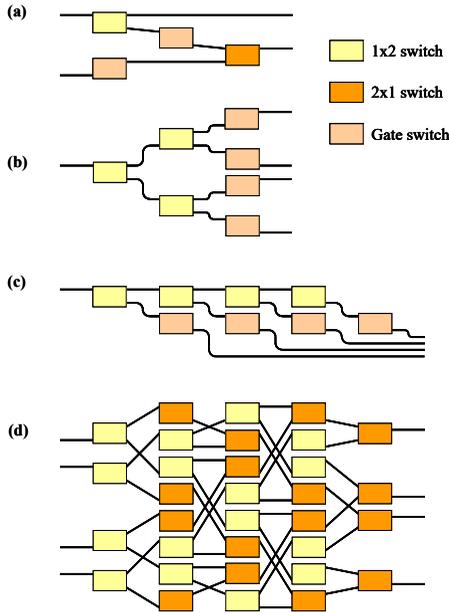


図 3・2 光スイッチ回路の構成

図 3・2(b)は、MZI 素子をツリー状に接続し、 $1 \times N$  光スイッチを構成した例である。ここで、高消光比を確保するために、最終段にゲートスイッチを追加している。この構成の  $1 \times N$  スイッチとしては、 $1 \times 128$  規模のものが報告されている<sup>23)</sup>。

図 3・2(c)は、MZI 素子をカスケードに接続して、 $1 \times N$  光スイッチを構成した例である。ここでも、高消光比を確保するために、各段にゲートスイッチが接続されている。この構成の  $1 \times N$  光スイッチは、同時に駆動するスイッチ素子がポート数によらず 2 個であるという特長がある。これまでに、8 アレイの  $1 \times 8$  スイッチを 1 チップに集積した例が報告されている<sup>12)</sup>。

図 3・2(d)は、マトリクス光スイッチの構成例である<sup>24)</sup>。TO スイッチを用いたマトリクス光スイッチとしては、 $32 \times 32$  規模のものが報告されている<sup>25)</sup>。

#### 4-3-4 むすび

熱光学効果を利用した光スイッチについて、その基本的な動作原理と回路構成を述べた。シリカ系ガラス PLC を用いた熱光学光スイッチは、現在、実用的な光スイッチとして、光ファイバ通信ネットワークを支える光デバイスの一つとなっている。

## ■参考文献

- 1) M. Haruna and J. Koyama : IEE Proc., Pt. H, vol.131, no.5, pp.322-324, 1984.
- 2) 西原 浩, 春名正光, 栖原敏明: “光集積回路 (改訂増補版),” 5・5 節, pp.134-137, オーム社, 1993.
- 3) N. Takato, K. Jinguji, M. Yasu, H. Toba, and M. Kawachi : J. Lightwave Technol., vol.6, no.6, pp.1003-1010, 1988.
- 4) 高橋 浩, 渡辺俊夫, 郷 隆司, 相馬俊一, 高橋哲夫: NTT 技術ジャーナル, vol.17, no.5, p.12-15, 2005.
- 5) G.V. Treyz : Electron. Lett., vol.27, no.2, pp.118-120, 1991.
- 6) Y. Hida, K. Onose, and S. Imamura : IEEE Photon. Technol. Lett. vol.5, no.7, pp.782-784, 1993.
- 7) M.J.B. Diemeer : Opt. Mater., vol.9, pp.192-200, 1998.
- 8) B.J. Offrein, D. Jubin, T. Koster, T. Brunschwiler, F. Horst, D. Wiesmann, I. Meijer, M.S. Petit, D. Webb, R. Germann, and G.L. Bona : IEEE Photon. Technol. Lett. vol.16, no.6, pp.1483-1485, 2004.
- 9) A. Watanabe, S. Okamoto, M. Koga, K. Sato, and M. Okuno : IEICE Trans. Commun., vol.E81-B, no.6, pp.1203-1212, 1998.
- 10) M. Okuno, K. Kato, R. Nagase, A. Himeno, Y. Ohmori, and M. Kawachi : J. Lightwave Technol., vol.17, no.5, pp.771-781, 1999.
- 11) T. Goh, M. Yasu, K. Hattori, A. Himeno, M. Okuno, and Y. Ohmori : J. Lightwave Technol., vol.19, no.3, pp.371-379, 2001.
- 12) H. Takahashi, T. Goh, T. Shibata, M. Okuno, Y. Hibino, and T. Watanabe : Proc. ECOC'02, paper 4.2.6, 2002.
- 13) T. Kawai, M. Koga, M. Okuno, and T. Kitoh : Electron. Lett., vol.34, no.3, pp.264-265, 1998.
- 14) T. Bergman, D. Carnevale, B. Chapman, N. Davirro, M. Dixon, G. Dong, D. Eberhart, B. Fondeur, J. Labosky, C. Liddle, M. Myers, J.A. Marsh, A.L. Sala, and M. Schumacher : Tech. Proc. NFOEC'01, pp.954-962, 2001.
- 15) M. Okawa, T. Hasegawa, K. Tamura, S. Takasugi, N. Kitano, and H. Uetsuka : Tech. Proc. NFOEC'01, pp.963-966, 2001.
- 16) H. Hatayama, K. Koyama, C. Hirose, T. Saitoh, T. Komiya, S. Semura, T. Katsuyama, and N. Yamabayashi : Tech. Digest OECC'02, pp.522-523, paper 12A3-2, 2002.
- 17) H. Kawashima, N. Matsubara, K. Nara, and K. Kashihara : Proc. ECOC'03, paper We3.2.4, 2003.
- 18) E. Narevicius, R. Narevich, Y. Berlatzky, J. Dieckroeger, G. Heise, G. Rosenblum, I. Shtrichman, I. Vorobeichik, and S. Wang : Electron. Lett., vol.42, no.2, pp.85-86, 2006.
- 19) A. Sugita, K. Jinguji, N. Takato, K. Katoh, and M. Kawachi : Trans. IEICE, vol.E73, no.1, pp.105-109, 1990.
- 20) R. Kasahara, M. Yanagisawa, T. Goh, A. Sugita, A. Himeno, M. Yasu, and S. Matsui : J. Lightwave Technol., vol.20, no.6, pp.993-1000, 2002.
- 21) K. Watanabe, Y. Hashizume, Y. Nasu, M. Kohtoku, M. Itoh, and Y. Inoue : J. Lightwave Technol., vol.26, no.14, pp.2235-2244, 2008.
- 22) Y. Hashizume, H. Takahashi, T. Watanabe, S. Sohma, T. Shibata, and M. Okuno : Proc. ECOC'03, paper Mo3.5.4, 2003.
- 23) T. Watanabe, T. Goh, M. Okuno, S. Sohma, T. Shibata, M. Itoh, M. Kobayashi, M. Ishii, A. Sugita, and Y. Hibino : Proc. ECOC'01, paper Tu.L1.2, 2001.
- 24) T. Watanabe, S. Sohma, T. Goh, T. Shibata, and H. Takahashi : Proc. ECOC'05, paper Th3.6.3, 2005.
- 25) S. Sohma, T. Watanabe, N. Ooba, M. Itoh, T. Shibata, and H. Takahashi : Proc. ECOC'06, paper Tu4.4.3, 2006.
- 26) K. Hattori, M. Fukui, M. Jinno, M. Oguma, and K. Oguchi : J. Lightwave Technol., vol.17, no.12, pp.2562-2571, 1999.
- 27) M. P. Earnshaw, J. B. D. Soole, M. Cappuzzo, L. Gomez, E. Laskowski, and A. Paunescu : IEEE Photon. Technol. Lett. vol.15, no.6, pp.810-812, 2003.
- 28) W. Chen, Z. Zhu, Y. J. Chen, J. Sun, B. Grek, and K. Schmidt : IEEE Photon. Technol. Lett., vol.15, no.10, pp.1413-1415, 2003.
- 29) C. R. Doerr, L. W. Stulz, D. S. Levy, R. Pafchek, M. Cappuzzo, L. Gomez, A. Wong-Foy, E. Chen, E. Laskowski, G. Bogert, and G. Richards : J. Lightwave Technol., vol.22, no.12, pp.2755-2762, 2004.
- 30) T. Goh, T. Kitoh, M. Kohtoku, M. Ishii, T. Mizuno, and A. Kaneko : Proc. OFC/NFOEC'08, paper OWC 6, 2008.

■9 群-6 編-4 章

---

4-4 半導体導波路光スイッチ