

# 集積化シリコン導波路光スイッチ技術

中 村 滋

## Optical Switches Based on Silicon Waveguide Device Integration

Shigeru NAKAMURA

The use of optical switches has been widely expected in optical networking areas. Expanding real application of optical switches to such expected area will be enabled by technologies providing significant size reduction and power consumption reduction. Recently, silicon photonics is attracting much attention as a promising technology for providing various optical devices with ultra-compact size and low power consumption. Utilizing standard CMOS process technology, we are developing large scale integration of silicon thermo-optical switch elements featuring high index contrast silicon waveguides and highly efficient thermo-optical effects. We have fabricated split and select type 8×8 optical switch prototypes for the application to next generation ROADMs. In this optical switch, 152 thermo-optical switch elements were integrated into one chip with the area of 12 mm×16 mm. We have confirmed various properties necessary for application such as high extinction ratio, polarization independence, and ambient temperature independence using this 8×8 optical switch.

**Key words:** silicon photonics, optical switch, thermo-optical effect, photonic integration, optical network

現代社会に必須となった情報インフラを支える光ネットワーク技術には、今後も拡大し続ける情報量をさばくためのさまざまな技術革新が求められている。多岐にわたる光ネットワーク技術の中で、光スイッチ技術はネットワーク・ノード処理容量拡大のキー・デバイスとして長く期待されており、これまでにさまざまな形態のデバイスへの取り組みが行われてきた。ネットワークシステムの高位レイヤーでノードでのスイッチング処理を行う場合には、必然的に光レイヤーを含む低位レイヤーの機能とレイヤー間インターフェースも必要となり、それだけ消費電力も大きくなる。最も低位レイヤーに相当する光レイヤーのみでスイッチングの手段を提供し得る光スイッチ技術には、低消費電力化の観点での期待も大きい<sup>1)</sup>。MEMS ミラー、液晶、石英光導波路を用いる光スイッチは実システムへも導入されており、近年の光ネットワークでは、光レイヤーで波長単位のスイッチングを行うメリットが実システムにおいても認識されるようになり、波長選択スイッチ (WSS: wavelength selective switch) の導入が急速に進んでいる。

しかし、光スイッチへの期待が広範であるのに比べると、これまでのデバイスは、サイズが大きい、電圧もしくは電力が大きい、切り替え速度が遅い、等の課題から、適用領域はまだ限定的といわざるをえない。今後の適用領域の拡大を図る上では、飛躍的な小型化・低電力化を見込める技術への取り組みと、技術的な観点以外の経済的な観点も含めて実用化まで持っていく粘り強い取り組みが必要と考えられる。

近年、急速に注目が高まっているシリコンフォトニクス技術は、光デバイスの飛躍的な小型化・低電力化をもたらす技術として有望視されている。強く光を閉じ込めるシリコン光導波路をベースに、さまざまな微小光デバイスとその集積化、また、これらの光デバイスを作成する上での CMOS (complementary metal oxide semiconductor) プロセス技術の活用に関して、大きな可能性が示されてきた。シリコンフォトニクスの適用領域は、多くの場合、従来にない小型化・集積化や光電融合の観点から光インターコネクトの領域が想定されているが、シリコンフォトニクスが

日本電気(株) グリーンプラットフォーム研究所 (〒305-8501 つくば市御幸ヶ丘 34) E-mail: s-nakamura@dy.jp.nec.com

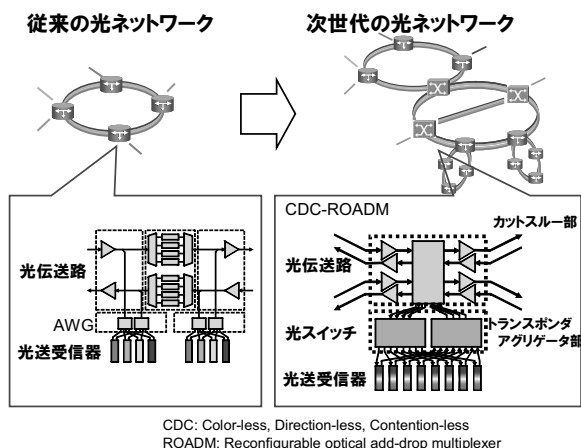


図1 次世代 ROADMs への導入が想定される光スイッチ。

提供し得る小型化・集積化は光スイッチ向けにも魅力的な技術である。われわれはシリコン光導波路に基づく小型・低電力の熱光スイッチ素子の多数集積化の実現に取り組むとともに、こうして集積化した光スイッチの次世代光ネットワーク・ノードへの適用を目指してきた。本稿では、その現状と今後の展開の可能性について紹介する。

### 1. 次世代光ネットワーク・ノードへの取り組みと光スイッチへの期待

広域光ネットワークでは、従来から光レイヤーでのフレキシビリティ向上の必要性が認識されているが、今後の通信需要の増大とその需要変動の増大に対応していく上で、その必要性はますます高まると考えられる。広域光ネットワークのノードである ROADMs (reconfigurable optical add drop multiplexer) においては、波長選択スイッチの導入により多方路化が進み始めている。従来の二方路の ROADMs においては、図1の左側に示すように、光送受信器(トランスポンダー)は固定波長で固定方路に対して運用されており、送信側のトランスポンダーから受信側のトランスポンダーまでの光パスの設定は波長も経路も固定的であった。すなわち、トランスポンダーを別波長あるいは別方路の光パスに対して運用しようとする、伝送路とトランスポンダーの間の光経路を手で繋ぎ換える必要があった。これに対し多方路 ROADMs では、図1の右側に示すように、多方路の光伝送路と多数のトランスポンダーが繋がることになるため、その間の光経路をフレキシブルに接続する CDC (colorless, directionless, contentionless) 化が望まれている<sup>2,3)</sup>。すなわち、光伝送路とトランスポンダーの間を光スイッチで接続し、トランスポンダーを任意波長 (colorless)・任意方路 (directionless) の光パスに対して運用可能とし、さらに、その際、複数方路に対する

同一波長の光パス設定も制約なく行える (contentionless) ようにするものである。これにより、例えば、需要変動に応じて異なる方路・波長の光パスへ迅速にトランスポンダーを割り当てる、あるいは、任意の方路・波長の光パスに対する障害回復用バックアップ・トランスポンダーを共有する等が可能になり、光レイヤーでネットワーク再構成を行うためのフレキシビリティが格段に増すことになる。

CDC-ROADMs の構成としては、図1に点線枠で示すように、多方路の光伝送路が繋ぎ込まれるカットスルー部と、多数のトランスポンダーが繋ぎ込まれるトランスポンダー・アグリゲーター部から成る。カットスルー部は、 $1 \times N$  の WSS を各方路の入出力に配備することが想定されている。トランスポンダー・アグリゲーター部は、多方路の光伝送路から分岐されるアッドドロップのポートと多数のトランスポンダーを接続する部分で、基本的には光スイッチ機能と光合波機能の組み合わせで構成される。具体的な例として、例えば石英光導波路をベースとした構成が報告されている<sup>4,5)</sup>。デジタル・コヒーレント受信を行うトランスポンダーを接続する場合には、光分波機能の役割を局発光とのミキシングで担い、分岐・選択型とよばれる光スイッチを用いてトランスポンダー・アグリゲーター部を構成する方法が有力視されている。トランスポンダーの配備数増加に合わせて増設していく必要性を考えると、小型の光スイッチを増設していく手法が好適であると考えられる。

上記のように、必要性が顕在化してきた広域光ネットワークの領域に加え、アクセス系あるいはデータセンター内といった短距離の光ネットワークにおいても、光レイヤーでの効率的な再構成を可能にする光スイッチへの期待が高まりつつある<sup>6)</sup>。小型化・低電力化への要求は一層高くなると考えられるが、これに加えて、仕様のおもな違いとして切り替え速度の違いが予想される。光スイッチの切り替えにはパス確立のための手順が必要であり、広域光ネットワークの場合には、100 km 離れた装置間で光ファイバーを通してパス確立のための制御信号のやりとりを行う際に、距離に起因する分だけで 1 ms の時間を費やす。一方、短距離の光ネットワークでは、1 km なら 10  $\mu$ s、100 m なら 1  $\mu$ s ということになり、これに応じた光スイッチ切り替え速度の高速化が求められると考えられる。

従来の MEMS ミラー、液晶、石英光導波路を用いる光スイッチでは、一般に、サイズが大きい、電圧もしくは電力が大きい、切り替え速度が遅い等の課題があった。これに対し近年、シリコンフォトニクスが、サイズや電力、さ

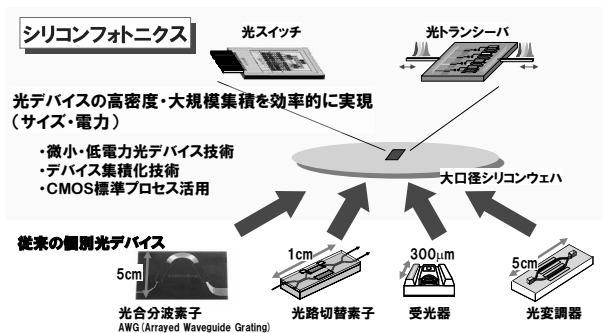


図2 シリコンフォトニクスの基本的な考え方.

らには切り替え速度の観点で、メリットを打ち出していける技術として期待されるようになってきた<sup>7-19)</sup>。他方で、シリコンフォトニクスが前提とする CMOS プロセス活用の考え方とどう整合させていくかが、実用化に持つていく上で重要なポイントと考える。

## 2. シリコンフォトニクスに対する基本的な考え方

シリコンフォトニクスは、図2に示すように、

- 1) シリコンをコアとし石英をクラッドとする高屈折率差の光導波路をベースとする各種の微小光デバイス
- 2) 微小光デバイスを要素とする光回路集積化および光回路・電子回路融合集積化
- 3) LSI 産業で発展してきた CMOS プロセスの活用による経済的にリーズナブルな高精度加工

で特徴づけられる。すなわち、光デバイス小型化・集積化という技術的な観点と、これらの試作・量産において高精度の加工技術が適用可能という経済的な観点の両面が重要である。また、その応用領域も、広域光ネットワークから

光インターコネクタまで多様な方向への展開が期待され、これらを共通基盤技術上に展開することで開発効率が高まることも期待される。

光インターコネクタの領域では、製品化例として、Luxtera 社が 10 Gbps×4 ch の光変調器・受光器・それらに接続するドライバやアンプ等の電子回路をシリコンのワンチップにモノリシック集積し、active optical cable (AOC) 規格にパッケージした例がよく知られている<sup>20)</sup>。シリコンフォトニクスが提供する光デバイス小型化・集積化の技術は、このような光インターコネクタ領域に加え、当然、広域光ネットワーク向けにも魅力的であり、取り組みが活発化している。

シリコンフォトニクスにおいて重要なポイントは、標準的な CMOS プロセスの活用である。LSI の分野では Moore の法則に沿う形で微細加工技術が進展してきており、最近の約 10 年で線幅 (ハーフピッチ) は 130 nm → 90 nm → 65 nm → 45 nm → 32 nm と進んできた。最近では微細化された分だけ LSI の動作電圧、動作電力を低減することは困難になっているが、微細化自体の進展は著しいものがある。しかし、最先端の微細加工技術はまだマスクもプロセスも高価であり、大量の汎用 LSI の生産に用いることで初めて経済的に成り立つものであるから、光デバイスに対しては想定する市場規模に合わせて何世代か前の加工技術の活用が前提となる。見方を変えれば、後々の市場規模の拡大に伴い高精度の加工技術を適用しようとしたときに、そのためのプロセス基盤が用意されていると考えることもできる。微細化の世代ごとに規定される加工精度に対して光導波路断面をはじめとする光デバイスの設計を合わせていく必要

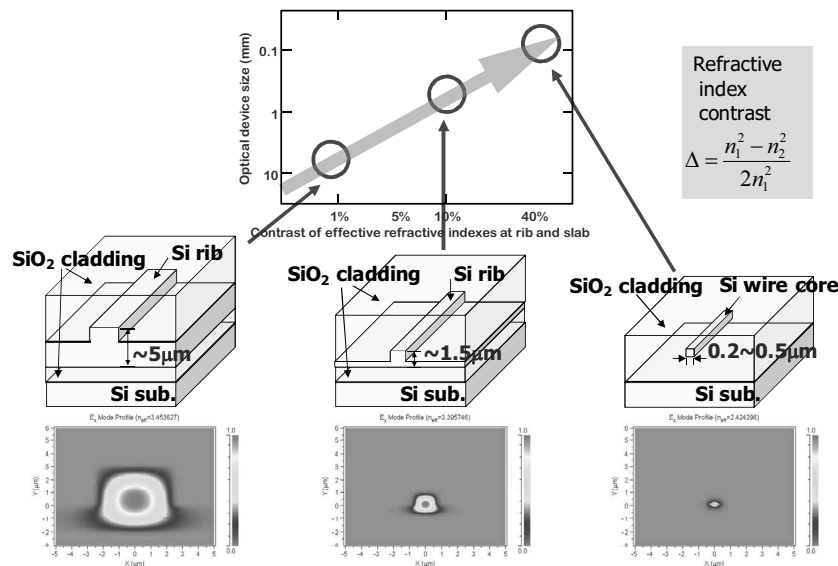


図3 シリコン光導波路断面構造の選択肢.



があるが、例えば、シリコン光導波路の断面積は、図3に示すように、リブ型から細線型まで調整することが可能である。

シリコンフォトニクスでは、LSI産業と同様のファブリスメーカーおよびファウンダリーの組み合わせの形態で試作・量産を進めていく枠組みが想定される。研究開発段階で利用可能な試作ファウンダリー・サービスは、欧州のimec, LETI, シンガポールのIME, 米国のOpSISプロジェクト等の研究機関から提供されており、サービス内容の整備も進んできた。他方で、量産ファウンダリーへの移行には、市場規模の見通しや活用するプロセス技術の世代を見極めながら枠組みを構築していくことが求められる。少なくとも、現時点で、光スイッチ向けに最先端プロセスを適用することは考えにくい。

### 3. シリコン熱光スイッチ素子

シリコン光導波路を用いた光スイッチ素子としては、これまでにさまざまな方式が提案されているが、大別すれば、光の位相を変化させる方法として、屈折率の温度依存性に基づく熱光学効果、または、屈折率のキャリア濃度依存性に基づくキャリアプラズマ効果、の2つがあり、その光位相変化を出力光ポート切り替えに変換する形態として、リング共振器またはマッハ・ツェンダー (Mach-Zehnder; MZ) 干渉計の2つがある<sup>9-19)</sup>。これらの素子を多数集積化して構成される光パス制御用の光スイッチとしては、小型、低電力という特徴に加え、基本的な特性としては、低損失、高消光比、偏光無依存が求められ、さらに、多くの場合、環境温度無依存、高均一な波長特性等が望まれる。したがって、まず、光スイッチを構成する素子自体が小型、低電力、低損失である必要がある。キャリアプラズマ効果を用いる場合、高速動作が可能であるが、熱光学効果を用いる場合に比べて単位長さあたりの位相シフト量を得にくく、光損失も大きくなる。リング共振器を用いる場合、著しく小型化できる可能性はあるが、均一な波長特性が求められる場合には使いにくいし、環境温度に著しく依存する。これらの観点から、われわれとしては、光スイッチ素子を多数集積し、特に、多段接続して集積光回路を構成する場合には、熱光学効果を用いるMZ型素子による構成が有望と考えている<sup>11-16)</sup>。

図4(a)および(b)は、集積光回路の基本要素となるMZ型熱光スイッチ素子の構造とオンオフ特性例である。Si層厚1.5 $\mu\text{m}$ のsilicon-on-insulator (SOI)基板上に形成したリブ型光導波路を用いており、8インチウェハに対する248nmUV露光を用いた標準的なCMOSプロセスを用

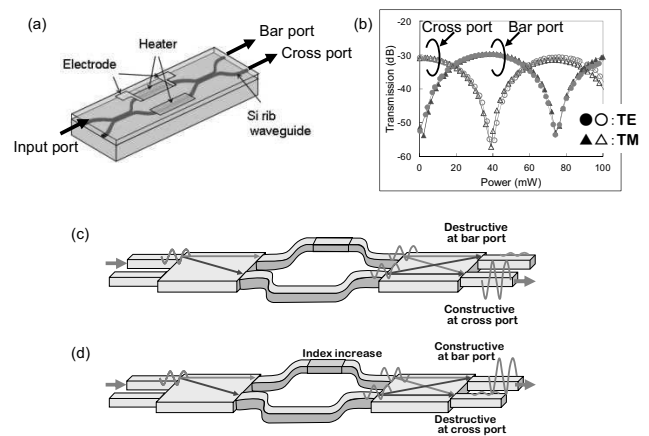


図4 シリコン熱光スイッチ素子の基本特性。(a)基本構造、(b)オンオフ特性、(c)非加熱状態での素子内の光経路、(d)片アーム加熱状態での素子内の光経路。

いて作成している。2 $\times$ 2のMZ型において、熱印加なしでbarポート出力オフ・crossポート出力オン (cross状態)、片アームのヒーターに35~40mW程度の電力を与え加熱した状態でcrossポート出力オフ・barポート出力オン (bar状態)となり、オンオフ消光比25dBが偏光無依存で得られている。シリコンの熱光学効果は石英の20倍程度と高効率であり、加熱電力は小さくてすむ。加熱部の断熱性を高めることで、切り替え速度は犠牲になるものの、1mW以下でのオンオフ動作を実証した報告例もある<sup>21)</sup>。MZ型素子自体の光損失は、分岐合流部2か所での過剰損失 $\sim$ 0.2dB程度<sup>22)</sup>とすることが可能であり、熱印加に伴う光損失の増加はほぼゼロである。また、図4(b)のように、熱印加なしでcross状態またはbar状態を確実に得ることは、多数素子集積を考える場合に重要なポイントであり、もし、cross状態もbar状態も素子個別に熱印加量の調整を行う必要があると、光スイッチを構成するすべての素子に熱印加を行う必要が生じ、集積光回路全体での消費電力が大きくなってしまふ。また、偏光無依存が得られない場合には、偏光ダイバシティーの手法で光回路を構成する必要があるが、基本的には光回路規模が2倍になり、集積光回路全体での消費電力が大きくなってしまふ。すなわち、多数集積化への展望を得るためには、MZ型熱光スイッチ素子として図4(b)の特性を歩留まりよく得ることが重要と考えられる。

集積光回路を非温調で使用することができれば、温調電力が不要になる。リング共振器、非対称MZ, AWG (arrayed waveguide grating)等の波長特性を有する光デバイスをシリコン光導波路で形成した場合には、波長特性はシリコンの屈折率温度係数に基づく温度依存性をもつ。スロット構造化して有機材料等のシリコンと逆の屈折率温度

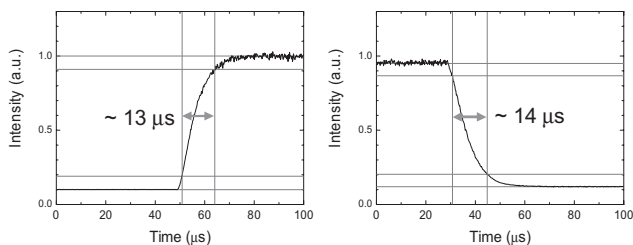


図5 シリコン熱光スイッチ素子の時間応答特性.

依存性を有する材料で埋め込むことで、シリコン光導波路の実効屈折率の温度無依存化を図り、波長特性を有する光デバイスの温度無依存化を目指す取り組み<sup>23)</sup>もあるが、広い温度範囲への適用にはまだ困難があり、当面は温調付きでの使用を考えることになろう。他方、図4(a)に示した対称なMZ型熱光スイッチ素子は、基本的に波長特性をもたないので、熱印加なしの状態であれば温度依存性を示さない。しかし、片アームを加熱した状態では、温度特性を有することに注意する必要がある。ヒーター加熱により生じる屈折率変化( $\Delta n$ )は、次式により与えられる。

$$\Delta n = \frac{dn}{dT} \Delta T = \frac{dn}{dT} \cdot \rho \cdot P = \frac{dn}{dT} \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{R} = \frac{dn}{dT} \cdot \rho \cdot I^2 R \quad (1)$$

ここで、 $dn/dT$ は屈折率温度係数、 $\Delta T$ はヒーター加熱による温度変化量、さらに、この $\Delta T$ はヒーターへの印加電力 $P$ に比例する(比例係数: $\rho$ )とし、ヒーターにおける抵抗 $R$ 、印加電圧 $V$ 、印加電流 $I$ とした。 $dn/dT$ は温度上昇に伴い増加し<sup>24)</sup>、また、 $R$ も一般に金属ヒーターを用いる場合は温度上昇に伴い増加する。したがって、式(1)からわかるように、電流ドライバーで定電流駆動する場合、 $\Delta n$ は温度依存性を示すことになる。すなわち、図4(c)のように熱印加なしの状態では、barポートのdestructive interference、crossポートのconstructive interference、いずれの光レベルも環境温度に依存しない。他方、図4(d)のように片アームに熱印加した状態では、上記に説明したように位相シフト量が環境温度依存性を示すため、barポートのconstructive interferenceでの光レベルの変動は小さく問題ないレベルであるものの、crossポートのdestructive interferenceでの光レベルの変動は大きく、例えば75°Cの温度範囲で10 dB以上の変動がみられている<sup>15)</sup>。環境温度無依存化を図るためには、例えば次章で説明するように、複数素子の構成方法に関する検討が必要となる。

図5に応答時間を示す。15  $\mu$ s程度の応答時間が得られている。加熱部では、熱がヒーター→石英クラッドにはさまれたシリコンコア→基板へと流れる。加熱部の単位長さあたりの熱容量と熱抵抗が応答の時定数を支配し、シリコン光導波路の場合にはクラッドまで含めた導波路断面積が

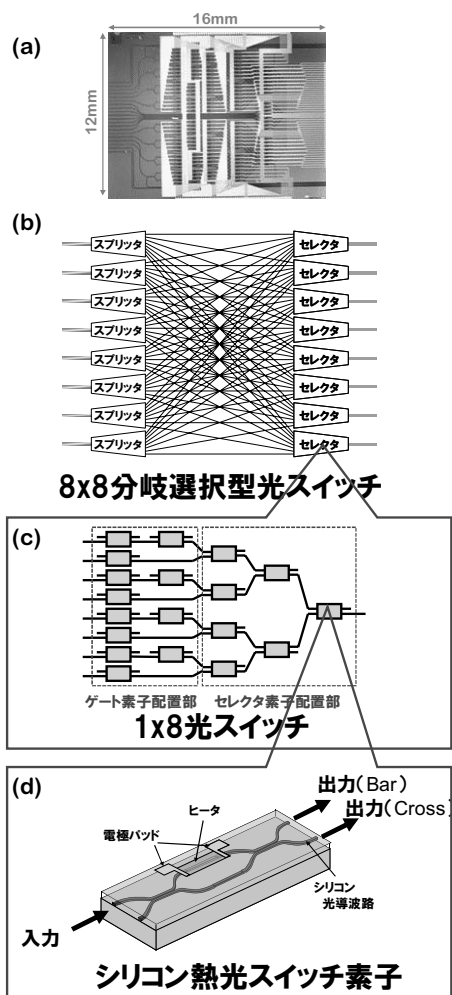


図6 シリコン熱光スイッチ素子とこれによって構成される8×8光スイッチ.

小さいことにより、石英系に比べて速い切り替え速度を示すことになる。この切り替え速度は、今後、短距離光ネットワークへの適用を検討する上で有用なポイントと考えられる。

#### 4. シリコン熱光スイッチ素子を集積化した光回路

上記のMZ型熱光スイッチ素子の多数集積化を可能にすることで、多様な適用形態に応じた光スイッチの実現が可能となる。ここでは、次世代ROADMにおけるトランスポンダー・アグリゲーターへの適用に向けた8×8規模の分岐選択型光スイッチの試作結果に関して示す。図6(a)および(b)は光スイッチのチップ写真と構成図である。この光スイッチは、1×8の光スイッチ8個と1×8の分岐/合流器8個とをメッシュ接続した構成をとっている。チップには152個の熱光スイッチ素子が12 mm×16 mmの領域に集積されている。1×8光スイッチの部分、図6(c)に示すようにゲートの役割をする素子とセレクターの

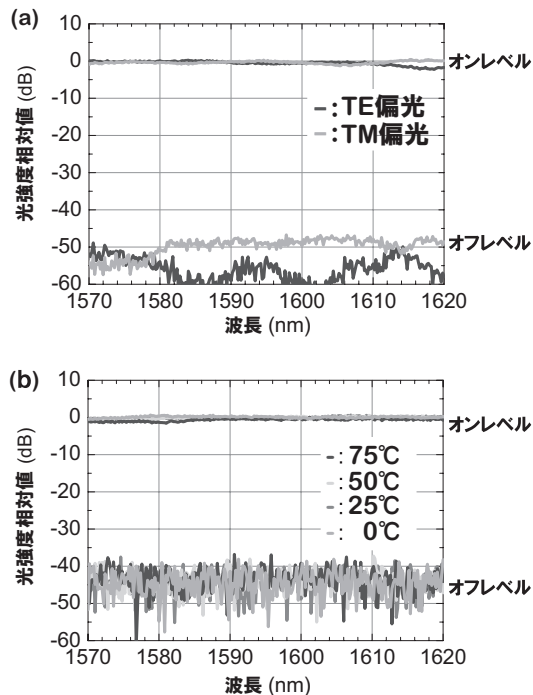


図7 光オンオフ特性評価結果。(a) 偏光無依存特性, (b) 環境温度無依存特性。

役割をする素子で成る。高消光比を得るには、この1×8光スイッチにおいて、選択された1本の光経路に対し、それ以外の7本の光経路において十分な光遮断を行う必要がある。さらに、この高消光比特性を環境温度無依存で得るために、MZ型熱光スイッチ素子の非加熱状態の素子2段で光遮断を行う構成をとっている。これにより高消光比、環境温度無依存での光経路切り替え動作が可能となる<sup>15)</sup>。

図7は、この光スイッチにおいて光経路のオンオフ特性を測定した結果である。波長範囲50 nmで均一、偏光無依存、消光比40 dB以上の特性が確認された<sup>15)</sup>。また、これらの特性を得ることにより、波長範囲30 nmと偏光多重で生成された21.7 Tbpsのスーパーチャネル光信号に対する光スイッチ特性においても良好な結果を得ている<sup>16)</sup>。また、環境温度0~75°Cの範囲でオンオフ特性には違いはみられないことが確認された<sup>15)</sup>。

シリコンフォトニクスにより提供される小型・低電力のメリットを十分に発揮させるには実装技術も重要である<sup>25)</sup>。上記の光スイッチチップに対しては、16本の光ファイバーとの光結合、152個の熱光スイッチ素子駆動用の電気配線の接続が必要となる。熱光スイッチ素子自体の光損失は低いため、上記の光スイッチを構成する光回路内部の光損失は、8分岐に伴う光損失以外は5 dB以下が得られている。大きな課題は、光ファイバーとの結合における光損失の低減である。シリコン光導波路側に作り込むス

ポットサイズ変換器<sup>26-28)</sup>は、通常の単一モード光ファイバーとのバットジョイントにおいて偏光無依存で3 dB以下の光損失が得られている例<sup>28)</sup>等が報告されているが、このような構造を光スイッチチップに作り込んでいくことが今後必要となる。

光ネットワーク技術の分野では、光スイッチの広範な導入が長く期待されてきた。これを実現する上で、飛躍的な小型化・低電力化を見込める技術への取り組みが必要と考えられる。近年、急速に注目が高まっているシリコンフォトニクス技術は、光デバイスの飛躍的な小型化・低電力化をもたらす技術として有望視されている。われわれは、シリコン光導波路における強い光閉じ込めとシリコンの高効率な熱光学効果を活用するシリコン熱光スイッチ素子をベースに、CMOS標準プロセスを活用しつつ多数集積化した光回路の実現に取り組んできた。次世代ROADMにおけるトランスポンダー・アグリゲーターへの適用に向けた8×8規模の分岐選択型光スイッチとして、152個の熱光スイッチ素子を12 mm×16 mmの領域に高密度集積したチップを試作し、高消光比、偏光無依存、環境温度無依存の特性を得た。実用化に向けては、光回路小型化のメリットを十分に発揮できるように光結合等のパッケージング技術も重要であり、これに向けた取り組みを進めている。

本報告に記した内容は、高橋重樹、牛田淳、小倉一郎、蔵田和彦、徳島正敏、坂内正宏、樋野智之、竹下仁士、水谷健二、田島章雄、Ming-Bin Yu、Guo-Qiang Loの各氏との共同研究の成果であり、上記の方々に深く感謝する。

## 文 献

- 1) 特集「省エネルギー光信号処理研究の最前線」、レーザー研究, **40** (2012) 332-382.
- 2) E. B. Basch, R. Egorov, S. Gringeri and S. Elby: "Architectural tradeoffs for reconfigurable dense wavelength-division multiplexing systems," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **12** (2006) 615-626.
- 3) P. Roorda and B. Collings: "Evolution to colorless and directionless ROADM architectures," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper NWE2 (2008).
- 4) K. Mizutani, M. Sakauchi and A. Tajima: "Demonstration of multi-degree color/direction-independent waveguide-based transponder-aggregator for flexible optical path networks," *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Paper P3.11 (2010).
- 5) T. Watanabe, K. Suzuki, T. Goh, K. Hattori, A. Mori, T. Takahashi, T. Sakamoto, K. Morita, S. Sohma and S. Kamei: "Compact PLC-based Transponder Aggregator for Colorless and Directionless ROADM," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper OTuD3 (2011).
- 6) N. Farrington, G. Porter, S. Radhakrishnan, H. H. Bazzaz, V.



- Subramanya, Y. Fainman, G. Papen and A. Vahdat: "Helios: A hybrid electrical/optical switch architecture for modular data centers," *Proc. of ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)*, (2010) pp. 339-350.
- 7) H. Yamada, T. Chu, S. Ishida and Y. Arakawa: "Si photonic wire waveguide devices," *IEEE J. Select. Topics Quantum. Electron.*, **12** (2006) 1371-1379.
  - 8) T. Chu, H. Yamada, S. Nakamura, M. Tojo, Y. Urino, S. Ishida and Y. Arakawa: "Silicon photonic-wire waveguide devices," *Photonics West*, Paper 6477-08 (2007).
  - 9) 河島 整, 庄司雄哉, 須田悟史, 金高健二, 金相 憲, Guangwei Cong, 並木 周, 挾間壽文, 石川 浩: "集積化シリコン導波路型光スイッチと光バスネットワークへの応用", 電子情報通信学会総合大会, C-3-38 (2011) p. 213.
  - 10) L. Chen and Y. K. Chen: "Compact, low-loss and low-power  $8 \times 8$  broadband silicon optical switch," *Opt. Express*, **20** (2012) 18977-18985.
  - 11) S. Nakamura, T. Chu, M. Ishizaka, M. Tokushima, Y. Urino, M. Sakauchi, I. Nishioka and K. Fukuchi: "Ultra-small one-chip color-less multiplexer/demultiplexer using silicon photonic circuit," *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Paper Tu.4. C.6 (2008).
  - 12) M. Sakauchi, I. Nishioka, S. Nakamura, T. Chu, and Y. Urino: "Demonstration of fast optical protection in ROADM system with one-chip color/direction-independent add/drop multiplexer employing silicon photonic circuit," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper JThA51 (2009).
  - 13) S. Nakamura, S. Takahashi, M. Sakauchi, T. Hino, M.-B. Yu, and G.-Q. Lo: "Wavelength selective switching with one-chip silicon photonic circuit including  $8 \times 8$  matrix switch," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper OTuM2 (2011).
  - 14) T. Hino, M. Sakauchi, J. Kurumida, S. Namiki, S. Takahashi, S. Nakamura and A. Tajima: "Demonstration of transponder aggregator based on silicon photonics for multi-degree color/direction-independent ROADM system," *16th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, Paper 6A1-2 (2011) 174-175.
  - 15) S. Nakamura, S. Takahashi, I. Ogura, J. Ushida, K. Kurata, T. Hino, H. Takeshita, A. Tajima, M.-B. Yu and G.-Q. Lo: "High extinction ratio optical switching independently of temperature with silicon photonic  $1 \times 8$  switch," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper OTu2L3 (2012).
  - 16) T. Hino, H. Takeshita, M. Sakauchi, K. Ishii, J. Kurumida, S. Namiki, S. Takahashi, S. Nakamura and A. Tajima: "Silicon photonics based transponder aggregator for next generation ROADM systems," *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Paper Tu.3. A.5 (2012).
  - 17) N. Sherwood-Droz, H. Wang, L. Chen, B. G. Lee, A. Biberman, K. Bergman and M. Lipson: "Optical  $4 \times 4$  hitless silicon router for optical networks-on-chip (NoC)," *Opt. Express*, **16** (2008) 15915-15922.
  - 18) M. Yang, W. M. J. Green, S. Assefa, J. Van Campenhout, B. G. Lee, C. V. Jahnes, F. E. Doany, C. L. Schow, J. A. Kash and Y. A. Vlasov: "Non-blocking  $4 \times 4$  electro-optic silicon switch for on-chip photonic networks," *Opt. Express*, **19** (2011) 47-54.
  - 19) H. L. R. Lira, S. Manipatruni and M. Lipson: "Broadband hitless silicon electro-optic switch for on-chip optical networks," *Opt. Express*, **17** (2009) 22271-22280.
  - 20) G. Masini, A. Narasimha, A. Mekis, *et al.*: "CMOS photonics for optical engines and interconnects," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Paper OTu2L1 (2012).
  - 21) R. Kasahara, K. Watanabe, M. Itoh, Y. Inoue and A. Kaneko: "Extremely low power consumption thermo-optic switch (0.6 mW) with suspended ridge and silicon-silica hybrid waveguide structures," *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Paper P.2.02 (2008).
  - 22) R. Halir, I. Molina-Fernández, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, D.-X. Xu, P. Cheben and S. Janz: "A design procedure for high-performance, rib-waveguide-based multi-mode interference couplers in silicon-on-insulator," *J. Lightwave Technol.*, **26** (2008) 2928-2936.
  - 23) Y. Atsumi, K. Inoue, N. Nishiyama and S. Arai: "Athermal wavelength characteristics of Si slot ring resonator embedded with benzocyclobutene for optoelectronic integrated circuits," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **49** (2010) 050206.
  - 24) G. Cocorullo, F. G. Della Corte and I. Rendina: "Temperature dependence of the thermo-optic coefficient in crystalline silicon between room temperature and 550 K at the wavelength of 1523 nm," *Appl. Phys. Lett.*, **74** (1999) 3338-3340.
  - 25) F. Kopp, S. Bernabe, B. Ben Bakir, J.-M. Fedeli, R. Orobitchouk, F. Schrank, H. Porte, L. Zimmermann and T. Tekin: "Silicon photonic circuits: On-CMOS integration, fiber optical coupling, and packaging," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, **17** (2011) 498-509.
  - 26) T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, J. Takahashi, M. Takahashi, T. Shoji, E. Tamechika, S. Itabashi and H. Morita: "Microphotonics devices based on silicon micro-fabrication technology," *IEEE J. Select. Topics Quantum. Electron.*, **11** (2005) 232-240.
  - 27) A. Barkai, A. Liu, D. Kim, R. Cohen, N. Elek, H.-H. Chang, B. H. Malik, R. Gabay, R. Jones, M. Paniccia and N. Izhaky: "Double-stage taper for coupling between SOI waveguides and single-mode fiber," *J. Lightwave Technol.*, **26** (2008) 3860-3865.
  - 28) M. Tokushima, A. Kamei and T. Horikawa: "Dual-tapered  $10\text{-}\mu\text{m}$ -spot-size converter with double core for coupling polarization-independent silicon rib waveguides to single-mode optical fibers," *Appl. Phys. Express*, **5** (2012) 022202.

(2013年3月25日受理)