

# シリコン光導波路における超高速光デバイス

山本 直克・T. K. LIANG・赤羽 浩一・土屋 昌弘

## Ultrafast All-Optical Switching Device by Using Silicon Nano-Wire Waveguide

Naokatsu YAMAMOTO, T. K. LIANG, Kouichi AKAHANE and Masahiro TSUCHIYA

A silicon waveguide structure has been investigated widely for integrating opto-electric functional-devices on a Si chip. In this paper, we propose an ultra-fast Si nano-wire all-optical switching device. Regarding the all-optical switch, we have found out that two-photon absorption process is highly enhanced in a silicon nano-wire structure and gives rise to ultrafast all-optical switching action. Indeed, we have successfully demonstrated approximately 3 ps switching with fairly low energy. This scheme was extended to an all-optical high-speed NOR-gate demonstration with approximately 80 Gbps speed. Those results imply that the silicon photonics technologies are potentially applicable to all optical switching elements, which are considered to be key components for a next generation photonic networks.

**Key words:** silicon nano-wire waveguide, two-photon absorption, optical nonlinearity, ultrafast optical switch, photonic network

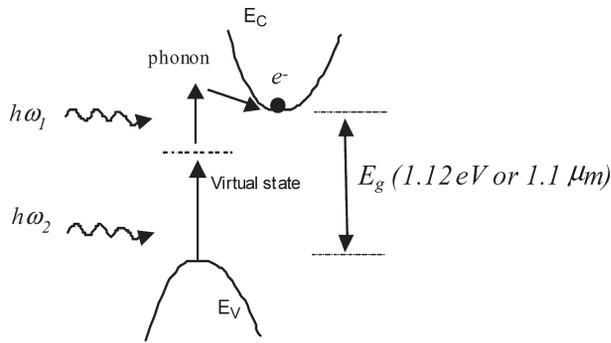
シリコン半導体は現在の情報化社会を支える電子集積回路の重要な材料であり、ナノメートルスケールの高度な加工技術蓄積がなされてきた。また、エネルギーバンドギャップが1.1 eV (波長換算: 約1.1  $\mu\text{m}$ ) であることから、光ファイバー通信に広く利用されるCバンド帯 (波長1.55  $\mu\text{m}$  帯) の光がシリコンを透過する。このことから、「シリコンフォトリクス」として、シリコン光導波路構造をベースとした新機能デバイス開発が盛んに研究されている<sup>1)</sup>。

光導波路構造を作製するためには、一般に屈折率の異なるコア・クラッド構造が必要であるが、シリコン光導波路作製ではSOI基板 (silicon on insulator) が広く用いられる。コアとクラッドはそれぞれ単結晶シリコン (屈折率  $n=3.45$ ) と酸化シリコン ( $n=1.46$ ) で構成され、非常に高い屈折率コントラストによる光閉じ込めが実現される。このことから、シリコン光導波路の有効な機能として次のような特徴が生じる。①数ミクロンの曲率半径で基板内の光配線が可能、②シリカ材料に比べコンパクトな光導波路が作製可能、③サブミクロン光導波路が実現できることから非常に狭い有効モード断面積 ( $<0.1 \mu\text{m}^2$ ) が実現する。特徴①、②は従来のPLC (planar lightwave

circuit) を小型化できる大きなメリットがある、一方、従来あまり利用されることのなかったシリコン非線形光学現象がデバイス動作原理として利用可能であることが特徴③により示される。非線形光学現象として誘導ラマン増幅、四光波混合、二光子吸収などさまざまあり、これらをシリコン光導波路内で実現し、それをもって積極的にデバイス応用につなげる研究が盛んに行われている<sup>2)</sup>。本稿では、特にシリコン光導波路の二光子吸収現象による高速スイッチデバイスと全光ロジック動作について紹介する。ここで述べるこれらのデバイスは、光通信波長帯で高速に動作することから、新世代フォトリックネットワークへの応用が期待される技術である。

### 1. シリコン光導波路光スイッチ

半導体光導波路を用いた光スイッチは、高速な光信号処理のために重要なキーデバイスと考えられている。そのなかでも、超高速動作が期待される非線形特性による全光動作は大きな研究テーマになっている<sup>3)</sup>。シリコン光導波路ではナノスケールのシリコン光導波路構造による微小モード断面積が実現されることから、低入力パワーで高光強度を得ることができ、効率的な非線形光学現象の利用が可能



### Nondegenerate TPA

図1 シリコンの二光子吸収現象。

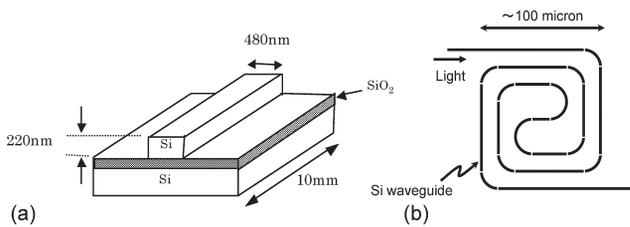


図2 (a) シリコン光導波路光スイッチデバイスと (b) スパイラル型シリコン光導波路デバイス。

となる。しかしながら通常、シリコン光導波路デバイスにおいて用いられているスイッチ原理はプラズマ分散効果であり、スイッチ速度がキャリア寿命の数百 ps~ns 程度に制限されてきた。近年、非常に高速なシリコンの二光子吸収現象に着目した全光スイッチが実証された<sup>4)</sup>。

シリコンの二光子吸収現象の概念図を図1に示す。シリコンは間接遷移半導体であることから、図1のようなエネルギーバンド構造となる。シリコンの二光子吸収では1個の光子エネルギーが1.12 eV 以下であっても、それが2つ吸収されることにより実キャリアが発生する。ここで、間接遷移型半導体のときにはフォノンの吸収・放出がともなわれる。二光子吸収は、光子  $h\omega_1$  (非制御光) が光子  $h\omega_2$  (制御光) により消光されるスイッチ動作としてみることができる。

実験に用いたシリコン光導波路構造を図2に示す。SOI基板を加工することにより、図2(a)に示されるような  $480 \times 220$  nm 断面で長さが10 mmのシリコン細線がシリコン酸化膜上に構成されている。シリコン細線デバイスでは比較的長い導波路が用いられるが、図2(b)に示すような小さな曲率半径のスパイラル構造とすることにより、数百  $\mu\text{m}$  角程度の非常に小さなフットプリント内に収めることが可能である。

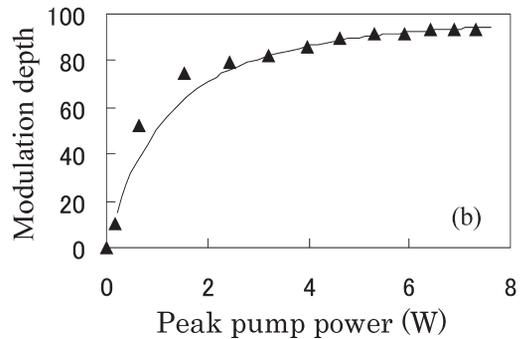
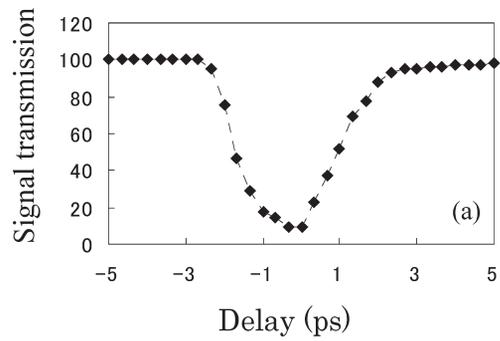


図3 (a) シリコン全光スイッチの動作と (b) その変調深さの励起パワー依存性。

このシリコン光導波路を用い、二波長の時間分解ポンプ・プローブ測定を行い、シリコン光導波路中に強い光励起パルスが存在する条件で弱いプローブ・パルスの非線形透過率が測定された。励起パルスとプローブ・パルスはともに、波長1550 nm 付近で動作する受動モード同期ファイバーレーザーを光フィルターによるスペクトルスライスにより生成した。パルス光源の繰り返し周波数は50 MHzであり、励起パルスの繰り返し周期は導波路内の自由キャリア再結合時間より十分に長くとられている。また、自己相関測定から励起パルスとプローブ・パルスの半値幅はいずれも約1.5 psであった。図3は、ポンプ・プローブ法により測定した相互相関曲線(a)と変調深さの励起パワー依存性(b)を示している。プローブ信号の回復時間は3 ps 未満であり、二光子吸収過程を利用した本スイッチデバイスが非常に高速動作していることがわかる。また、プローブ信号の透過率が90%以上まで回復したことは、導波路内に自由キャリアの大きな蓄積がなかったことを意味している。プローブ・パルスの変調深さは励起パルスのピークパワーが5 W程度で90%を超えており、ナノサイズのシリコン光導波路を用いることにより、二光子吸収現象が比較的低パワーの入力光で実現可能となる。

### 2. シリコン光導波路の光ロジック動作

非常に短い回復時間を有するシリコン光導波路光スイッチを用いることで、光論理ゲートが作製された。シリコン

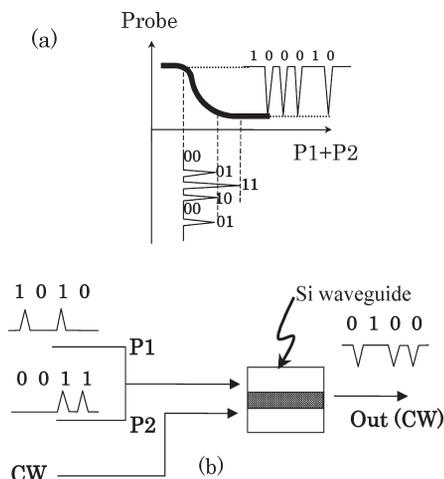


図4 (a) 全光 NOR 演算の動作原理と (b) シリコン光導波路による構成図。

光導波路における非線形透過曲線を用いた NOR ゲートの動作原理と実験概念図を図4 (a) と (b) にそれぞれ示す。ここでは、同じピークパワーをもつ信号  $P_1$  と  $P_2$  を加算して導波路に結合し、導波路の出力において弱い連続波 (CW) プロブ光を  $P_1$  と  $P_2$  の和によって変調した。NOR 演算はダークパルスの形で出力された<sup>5)</sup>。

図5に、シリコン光導波路の二光子吸収を利用した高速 NOR ゲートの実験結果を示す。信号  $P_1$  と  $P_2$  はそれぞれ図5 (a) と (b) に示す。自己相関測定のパルス幅はいずれも半値全幅で 1.6 ps である。サンプリングオシロスコープで測定したパルスは、光検出器の帯域幅の制限によって 13 ps 程度に広がった。干渉を回避し、それによって安定した出力波形が得られるよう、2つの信号には異なる波長を選択した。 $P_1$  と  $P_2$  のピークパワーは 5 W 程度で、対応するパルスエネルギーは 8 pJ 程度となる。そのため、出力ダークパルスの変調深さは 90% を超えると予想される。しかし、帯域幅の限られた光検出器では実際の変調深さを直接測定することができない。図5 (c) より、出力論理 NOR の演算結果が “0100” であることがわかる。今回の2つの信号の時間分離は 12.5 ps であるため、光 NOR ゲートの等価データレートは 80 Gbps となる。また、この光論理ゲートはシリコン光導波路の二光子吸収現象を動作原理としているために、シリコンバンドギャップ以下の任意の長波長域の信号光入力において動作させることができる。

シリコン光導波路を用いた光デバイスのひとつとして、ナノサイズのシリコン光導波路を用いた全光スイッチ・全

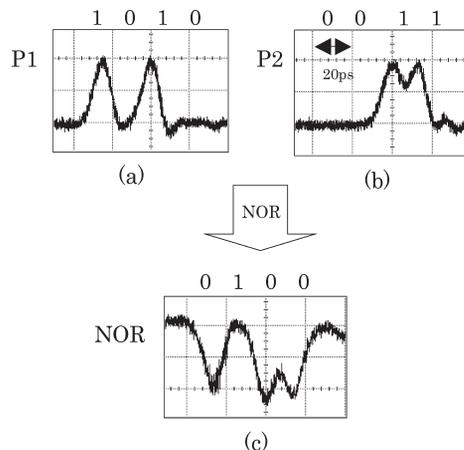


図5 シリコン光導波路による全光 NOR ゲート動作。

光ロジックを紹介した。これらのデバイス動作原理としてシリコン光導波路内の非線形光学現象を用いていることから、超高速な光デバイス動作の実現が可能である。また、動作波長帯域が光ファイバー通信波長 C バンドであることから、このシリコン光導波路デバイスの高速な光情報処理・通信への応用が期待される。

シリコンフォトニクスに基づいた、これら超高速シリコン光導波路デバイスの集積による新機能光・電子デバイス開発が、新世代フォトニックネットワーク構築と高度化のキー技術となることが期待される。

NICT フォトニックデバイスラボ (PDL) のスタッフの皆様、NICT 外林秀之氏、板部敏正氏に感謝します。

## 文 献

- 1) G. T. Reed: “The optical age of silicon,” *Nature*, **427** (2004) 595-596.
- 2) R. L. Espinola, J. I. Dadap, R. M. Osgood, Jr., S. J. McNab and Y. A. Vlasov: “C-band wavelength conversion in silicon photonic wire waveguides,” *Opt. Express*, **13** (2005) 4341-4349.
- 3) T. Kamiya and M. Tsuchiya: “Progress in ultrafast photonics,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 5875-5888.
- 4) T. K. Liang, L. R. Nunes, T. Sakamoto, K. Sasagawa, T. Kawanishi, M. Tsuchiya, G. R. A. Priem, D. Van Thourhout, P. Dumon, R. Baets and H. K. Tsang: “Ultrafast all-optical switching by cross-absorption modulation in silicon wire waveguides,” *Opt. Express*, **13** (2005) 7298-7303.
- 5) T. K. Liang, L. R. Nunes, M. Tsuchiya, K. S. Abedin, T. Miyazaki, D. Van Thourhout, W. Bogaerts, P. Dumon, R. Baets and H. K. Tsang: “High speed logic gate using two-photon absorption in silicon waveguides,” *Opt. Commun.*, **265** (2006) 171-174.

(2007年8月8日受理)