シリコンフォトニクスによる光デバイスの小型化と集積化

中村 滋

NEC グリーンイノベーション研究所 (〒305-8501 茨城県つくば市御幸ヶ丘34)

Ultra-Small Optical Devices and Their Integration with Silicon Photonics Technology

Shigeru NAKAMURA

Green Innovation Res. Labs., NEC Corporation, 34 Miyukigaoka, Tsukuba, Ibaraki 305-8501

(Received March 23, 2012)

Developing ultra-small optical devices and integrating them are quite useful for realizing energy efficient optical devices and also constructing ICT systems with newly introducing such optical devices. For this purpose, silicon photonics is quite promising. In this report, we briefly review recent silicon photonics technology trends and then focus on optical switching devices based on silicon photonics. A silicon thermo-optical switch element is driven with low heating power. To integrate many elements and construct functional devices with energy efficiency, we need to establish several points, such as high uniformity, polarization independence, and ambient temperature independence. We demonstrate high extinction ratio switching of the 1×8 optical switch with meeting above-mentioned points for energy efficiency. Such optical switches can be applied to R-OADMs in photonic networks, which provide flexible optical path setup and thus contribute to energy efficient systems.

Key Words: Silicon photonics, Optical switch, Thermo-optical effect, Photonic integration, Photonic network

1. はじめに

情報処理・伝送技術(ICT)の役割は、今や、その利活用により持続可能社会を構築するという現代社会の根本的な課題解決のためのインフラとして重要になってきている。役割の拡大に伴い扱う情報量の拡大が今後も予想されているが、これに対応していくために、ICTの基盤としての光伝送技術にも、システムを構成する様々なレイヤでの省エネルギー化の実現が求められている。

光伝送技術の分野では、光デバイスの小型化・集積化を進めることで、光デバイスそのものを省エネルギー化すると共に、光デバイス・光伝送が導入可能な領域を拡大してICT機器・システムを省エネルギー化する取り組みが進められてきた。この光デバイス小型化・集積化の今後を担う技術として、近年、シリコンフォトニクスへの注目が高まっている。本誌では、2007年に「シリコンフォトニクスの最前線」が特集されており各種の微小光デバイスに関する優れた解説がある¹⁾。その後、様々な応用領域への導入を念頭に集積化技術が急速に進んできた。本稿では、シリコンフォトニクスによる集積化の現状を概観すると共に、我々が取り組みを進めている広域光ネットワーク向け光スイッチ技術に関して、省エネルギー化への貢献ポイントを中心に紹介する。

2. シリコンフォトニクス

Fig. 1に示すように、シリコンフォトニクスという技術領域は

- 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、各々の技術は、近年、急速な広がりを見せている。その応用領域も、光伝送にとどまらない可

Fig. 1 Concept of silicon photonics.

能性も持っているが、光伝送における応用領域としては、

- a) 装置間、装置内ボード間、ボード内チップ間、チップ内の光インターコネク
- b) 広域光ネットワーク向けの光トランシーバ
- c) 広域光ネットワーク向けの光スイッチ等の光パス制御が考えられ、各々、実用化に向けた動きが活発になっている。

光インターコネクの領域では、Luxtera社が装置間接続用にいち早く実用化を進め、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)規格のパッケージで製品化した²⁾。ただ、その後のLuxtera社の動向を見ると、光回路と電子回路は個別に作成した後にハイブリッドに集積するという方向に向かっているようであり、また、VCSEL等の競合技術でも実現できるAOCではなくシリコンフォトニクスの小型・集積化メリットをより打ち出せるボード間接続あるいはチップ間接続に向かっているように思われる³⁾。ボード間接続あるいはチップ間接続では、将来的に1~10 Tbps級の容量が必要となることが想定されており、これに向けて光変調器および受光器の高密度集積化、これらの光回路や電子回路とのハイブリッド集積化の実証が進み始めている⁴⁻⁶⁾。チップ内接続に向けては光回路と電子回路のモノリシック集積化の展望が開けるかどうかのポイントとなるが、当面はハイブリッド集積化への取り組みが中心になると思われる。

広域光ネットワーク向けには市場規模からみてシリコンフォトニクスのメリットを生かせるのかどうかという議論もあるが、活用を想定するCMOSプロセスの世代を広く捉えればメリットを生かせる可能性は高いと考える。光トランシーバの領域では、デジタルコヒーレント光信号の送受信部の光回路⁷⁾、あるいは、マルチコア

ファイバあるいはマルチモードファイバによる空間多重光信号の分離器⁸⁾、等の報告があり、今後ますます複雑化が予想される光信号の変調方式や多重方式に向けて必要となる集積光回路の実現が期待される。また、光スイッチ等の光パス制御の領域は、熱光スイッチ素子⁹⁾を多数集積化した各種の光回路の報告があり¹⁰⁻¹⁶⁾、光ネットワークにおける光パス設定自由度を向上させる手段として期待される。この光スイッチ用途については後述する。

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することが前提となる。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。微細化の世代毎に規定される加工精度に対して光導波路断面を始めとする光デバイスの設計を合わせていく必要があるが、例えば、シリコン光導波路の断面積は、Fig. 2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。研究開発段階で利用可能なファウンドリーサービスが、欧州のimec、LETI、シンガポールのIME等の研究機関から提供されており、LSIと同様のモデルでの研究開発の加速が期待される。

Fig. 2 Option in silicon optical waveguide cross section.

3. シリコン熱光学スイッチ素子と これを集積化した光回路

シリコン光導波路を用いた小型・低電力の光スイッチ素子を多数集積化することにより、多様な光パス制御機能を提供する光スイッチの実現が可能になる。光スイッチは、波長選択スイッチと呼ばれるものも含めると、空間光学系あるいは石英光導波路に基づく方式が、広域光ネットワーク向けの装置に向けて導入されてきている。しかし、今後予想される規模拡大への対応、あるいは、広域光ネットワークにとどまらずデータセンター等の多様な適用領域へ光パス制御の導入を進めようとする、光スイッチにはサイズ・電力・機能集積化の観点で一層の技術革新が求められる。従来にはない小型・低電力・機能集積の光スイッチの実現可能性を有するシリコンフォトリソニクスへの期待は大きい。

シリコン光導波路を用いた光スイッチ素子としては、これまでに様々な方式が提案されているが、大別すれば、駆動方式として熱光学効果またはキャリアプラズマ効果、形態としてリング共振器またはマッハ・ツェンダ(Mach-Zehnder, MZ)干渉計となろう⁹⁻¹⁹⁾。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。まず、集積の対象となる素子自体が小型、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、我々としては、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¹⁰⁻¹⁶⁾。以下、我々の光スイッチに関する取り組みを、特に省エネルギーで駆動可能にするという観点を中心に述べる。

Fig. 3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特性例である。Si層厚1.5 μm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248 nmUV露光を用いた標準的なCMOSプロセスを用いて作成している。2×2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)、片アームのヒータに35~40 mW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、そのオンオフ消光比25dBとなる特性がTE(Transverse-electric)モードに対してはTM(Transverse-magnetic)モードに対しても得られており、偏光無依存動作が得られている。MZ型素子自体の光損失は、分岐合流部2ヶ所での過剰損失~0.2dB程度²⁰⁾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、Fig. 3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、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全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Fig. 3の特性を歩留まり良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持つ。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²¹⁾もあるが、広い温度範囲への適用にはまだ困難があり、当面は温調付きで使用する事を考えることになる。他方、Fig. 3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持たないので、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。ヒータ加熱により生じる屈折率変化(Δn)は、

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

Fig. 3 Silicon thermo-optical Mach-Zehnder switch element. (a) Structure. (b) Typical switching characteristics. TE: Transverse-electric mode. TM: Transverse-magnetic mode.

Fig. 4 Temperature dependence of switching characteristics. (a) Horizontal axis: power. (b)-(c) Horizontal axis: voltage. (d)-(e) Horizontal axis: current.

ここで、 dn/dT は屈折率温度係数、 ΔT はヒータ加熱による温度変化量、さらに、この ΔT はヒータへの印加電力 P に比例する(比例係数: ρ)とし、ヒータにおける抵抗 R 、印加電圧 V 、印加電流 I とした。第4式は定電圧駆動、第5式は定電流駆動、に対応する。 dn/dT は温度上昇に伴い増加し²²⁾、また、 R も一般に金属ヒータを用いる場合は温度上昇に伴い増加する。第4式からわかるように定電圧駆動の場合には dn/dT の温度依存性と R の温度依存性は相殺される可能性がある。また、第5式から、定電流駆動の場合には Δn は温度依存性を示すことになる。電流ドライバは通常は定電流駆動であるため、環境温度無依存化のためにはこの熱光学効果の温度依存性に注意する必要がある。Fig. 4は実際にMZ型熱光スイッチ素子の温度特性を評価した結果である。温度 $0^{\circ}\text{C}\sim 75^{\circ}\text{C}$ の範囲で測定を行った。Fig. 4 (a)はヒータ印加電力に対するBarポートからの光出力をプロットしたものであり、Fig. 4 (b)、Fig. 4 (c)は横軸をヒータ印加電圧にとり直して光出力極大値付近(Bar状態)、光出力極小値付近(Cross状態)を示したもので、Fig. 4 (d)、Fig. 4 (e)は横軸をヒータ印加電流にとり直してBar状態、Cross状態での光出力を示したものである。Fig. 4 (b)、Fig. 4 (d)からわかるように光出力極大値では環境温度の影響は小さい。Fig. 4 (c)は、定電圧駆動であれば光出力極小値付近でも環境温度の影響を低減することが可能であることを示している。Fig. 4 (e)は、定電流駆動の場合には光

出力極小値付近で環境温度の影響は大きく現れる。すなわち、環境温度が上昇すると、出力極小値を与える電流値は減少することを示している。なお、Fig. 4 (c)、Fig. 4 (e)いずれの場合も、電圧あるいは電流のゆらぎによる光出力の変動が大きいと予想されることがわかる。

通常の定電流駆動のドライバを用いる場合でも、環境温度に依存せずに高消光比を得るためには光回路の構成上の工夫が必要になる。Fig. 5は、 1×8 光スイッチをゲートの役割をする素子とセレクタの役割をする素子で構成した場合を示す。ゲート部には12個の熱光スイッチ素子を用いているが、各々の素子が小さいので、ゲート部全体でも $1\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ の領域におさまっている。Fig. 6は、この 1×8 光スイッチにおいて各々の光経路のオンオフ特性を測定した結果である。Fig. 5からわかるように各々の光経路がオフになる場合には、2個のヒータ加熱されていない素子で光信号が遮断されており、これにより環境温度に依存せずに高消光比が得られることが期待される。Fig. 6 (a)からわかるように、波長 50 nm の範囲で均一、偏光無依存、消光比 40 dB 以上の特性が確認された。また、Fig. 6 (b)からわかるように、温度 $0^{\circ}\text{C}\sim 75^{\circ}\text{C}$ の範囲でオンオフ特性には違いは見られないことが確認された。

以上、熱光スイッチ素子そのものは、高い屈折率温度係数のおかげで、低電力駆動が可能であり省エネルギーと言えるものの、これを集積した光回路を省エネルギー

Fig. 5 (a) Configuration of 1×8 selector switch. (b) Photograph at gate part.

Fig. 6 Transmission spectra showing on and off states of 1×8 selector switch
(a) Polarization dependence (b) Temperature dependence.

で動作させるには、いくつかポイントがあることを示した。すなわち、素子を個別に調整することを不要にする均一性、偏光ダイバシティを不要にする偏光無依存化、温調を不要にする環境温度無依存化が必要になる。熱光スイッチ素子を集積した光回路で構成する 1×8 光スイッチにおいてこれらの特性を実証した。熱光スイッチ素子自体の光損失は低いが、これを集積化した光回路を活用していく上で、光ファイバとの結合における光損失を十分に抑える必要がある。光回路チップ端面で光ファイバのモード径に整合させるようシリコン光導波路のモード径を拡大させる構造が提案されている²³⁻²⁵⁾。

4. シリコン集積光回路による光スイッチの 光ネットワーク向け応用

今後の広域光ネットワークでは、R-OADM (Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer) において光パス設定柔軟性のさらなる向上が求められている。特に近年はトランスポンダに対しColor-less, Direction-lessと称される運用形態の導入が望まれるようになってきた²⁶⁻²⁷⁾。従来のR-OADMにおいては、トランスポンダ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から受信側のトランスポンダまでの光パスの設定は波長も経路も固定的であった。これに対し、今後の光ネットワークではトランスポンダを任意波長(Color-less)・任意方路(Direction-less)に対して運用可能とすることにより、光パスを柔軟に設定可能とすることが期待されている。トランスポンダの運用効率が向上すると、より少ないトランスポンダ配備数で障害回復、トラフィック調整、多方路化への拡張等が可能となる。障害回復に必要なバックアップ用トランスポンダの数で考えれば、従来は $1+1$ で必要であったのに対して大幅な削減が可能であり、これによる省エネルギー化の効果も大きい。これを実現するためには、Fig. 7に示すように、光ネットワークの各ノードにおけるトランスポンダと伝送路の接続経路において、任意の経路に対し任意の波長を割当可能とする光パス制御が必要であり、基本的には光スイッチ機能と光合分波機能の組合せが必要となる。具体的には様々な構成が考えられ、例えば石英光導波路ベースでこれを構築した例が報告されている²⁸⁻²⁹⁾。シリコン集積光回路技術は、設置面積や消費電力、さらには切替速度の観点でメリットを打ち出している¹⁰⁻¹⁶⁾。Fig. 7には、上記の用途に向け、3章で示した 1×8 光スイッチをベースに 8×8 分岐選択型光スイッチを構成した例を示した。12 mm $\times$ 16 mmの領域に152個の熱光スイッチを集積した光回路で構成される。光回路内部における光損失は、8分岐に伴う光損失以外は5dB以下であった。

Fig. 7 Optical switches based on silicon photonics for R-OADM.

5. まとめ

光伝送技術の分野では、光デバイスの小型化・集積化を進めることで、光デバイスそのものを省エネルギー化

すると共に、光デバイス・光伝送が導入可能な領域を拡大してICT機器・システムを省エネルギー化する取り組みが進められている。この光デバイス小型化・集積化の今後を担う技術として、近年、シリコンフォトニクスへの注目が高まっている。シリコンフォトニクスによる集積化の現状を概観すると共に、我々が取り組みを進めている光スイッチ技術に関して、省エネルギー化への貢献ポイントを中心に紹介した。シリコン熱光スイッチ素子そのものは、高い屈折率温度係数を利用することにより低電力駆動が可能である。これを集積した光回路を省エネルギーで動作させる上では、素子を個別に調整することを不要にする均一性、偏光ダイバシティを不要にする偏光無依存化、温調を不要にする環境温度無依存化が必要になる。熱光スイッチ素子を集積した光回路で構成する1×8光スイッチにおいてこれらの特性を兼ね備えた形で高消光比特性を実現した。また、これらのシリコン集積光スイッチ技術を広域光ネットワークにおけるR-OADMに適用することでトランスポンダの運用の効率化に有用である。トランスポンダを効率的に運用することで配備する台数を抑えることができれば、システムとしての省エネルギー化が可能になる。さらに、このような小型・低電力のシリコン熱光スイッチ素子の多数集積化を可能にすることにより、広域光ネットワークにとどまらず多様な適用領域への展開も可能となる。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パッケージング技術も重要になってくる。

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を含むものであり、上記の方々に深く感謝する。

参考文献

- 1) 「シリコンフォトニクスの最前線」特集号：レーザー研究 **35** (2007)。
- 2) A. Narasimha, et al.: *Optical Fiber Communication Conference, San Diego, March, 2010*, OMT4.
- 3) G. Masini, et al.: *Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, March, 2012*, OTu2I.1.
- 4) X. Zheng, et al.: *Opt. Express* **19** (2011) 5172.
- 5) Y. Urino, et al.: *Opt. Express* **19** (2011) B159.
- 6) Y. A. Vlasov: *IEEE Comm. Mag.* **50** (2012) S67.
- 7) C. R. Doerr, P. J. Winzer, Y.-K. Chen, S. Chandrasekhar, M. S.

- Rasras, L. Chen, T.-Y. Liow, K.-W. Ang, and G.-Q. Lo: *J. Lightwave Technol.* **28** (2010) 520.
- 8) C. R. Doerr and T. F. Taunay: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** (2011) 597.
- 9) H. Yamada, T. Chu, S. Ishida, and Y. Arakawa: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **12** (2006) 1371.
- 10) T. Chu, H. Yamada, S. Nakamura, M. Tojo, Y. Urino, S. Ishida, and Y. Arakawa: *Photonics West, San Jose, January, 2007*, 6477-08.
- 11) 河島他：電子情報通信学会総合大会（2011年3月）C-3-38.
- 12) S. Nakamura, T. Chu, M. Ishizaka, M. Tokushima, Y. Urino, M. Sakauchi, I. Nishioka, and K. Fukuchi: *European Conference on Optical Communication, Brussels, September, 2008*, Tu.4.C.6.
- 13) M. Sakauchi, I. Nishioka, S. Nakamura, T. Chu, and Y. Urino: *Optical Fiber Communication Conference, San Diego, March, 2009*, JThA51.
- 14) S. Nakamura, S. Takahashi, M. Sakauchi, T. Hino, M.-B. Yu, and G.-Q. Lo: *Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, March, 2011*, OTuM2.
- 15) T. Hino, M. Sakauchi, J. Kurumida, S. Namiki, S. Takahashi, S. Nakamura, and A. Tajima: *Opto-Electronics and Communications Conference, Kaohsiung, July, 2011*, 6A1-2.
- 16) S. Nakamura, S. Takahashi, I. Ogura, J. Ushida, K. Kurata, T. Hino, H. Takeshita, A. Tajima, M.-B. Yu, and G.-Q. Lo: *Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, March, 2012*, OTu2I.3.
- 17) N. Sherwood-Droz, H. Wang, L. Chen, B. G. Lee, A. Biberman, K. Bergman, and M. Lipson: *Opt. Express* **16** (2008) 15915.
- 18) M. Yang, W. M. J. Green, S. Assefa, J. Van Campenhout, B. G. Lee, C. V. Jahnke, F. E. Doany, C. L. Schow, J. A. Kash, and Y. A. Vlasov: *Opt. Express* **19** (2011) 47.
- 19) H. L. R. Lira, S. Manipatruni, and M. Lipson: *Opt. Express* **17** (2009) 22271.
- 20) R. Halir, I. Molina-Fernández, A. Ortega-Moñux, J. G. Wangüemert-Pérez, D.-X. Xu, P. Cheben, and S. Janz: *J. Lightwave Technol.* **26** (2008) 2928.
- 21) Y. Atsumi, K. Inoue, N. Nishiyama, and S. Arai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **49** (2010) 050206.
- 22) G. Cocorullo, F. G. Della Corte, and I. Rendina: *Appl. Phys. Lett.* **74** (1999) 3338.
- 23) T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, J. Takahashi, M. Takahashi, T. Shoji, E. Tamechika, S. Itabashi, and H. Morita: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **11** (2005) 232.
- 24) 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: *J. Lightwave Technol.* **26** (2008) 3860.
- 25) M. Tokushima, A. Kamei, and T. Horikawa: *Appl. Phys. Express* **5** (2012) 022202.
- 26) E. B. Basch, R. Egorov, S. Gringeri, and S. Elby: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **12** (2006) 615.
- 27) P. Roorda and B. Collings: *Optical Fiber Communication Conference, San Diego, March, 2008*, NWE2.
- 28) K. Mizutani, M. Sakauchi, and A. Tajima: *European Conference on Optical Communication, Torino, September, 2010*, P3.11.
- 29) T. Watanabe, K. Suzuki, T. Goh, K. Hattori, A. Mori, T. Takahashi, T. Sakamoto, K. Morita, S. Sohma, and S. Kamei: *Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, March, 2011*, OTuD3.

レーザーワード

熱光学効果(thermo-optical effect)・キャリアプラズマ効果(carrier plasma effect)

固体中では、一般に、光の屈折率は温度に依存する。局所的な加熱により、その領域の屈折率を変化させて、デバイスに活用する場合を、熱光学効果と呼んでいる。熱光学効果の大きさは、屈折率温度係数で表わされ、シリコンの場合、石英の20倍程度である。当然ながら、環境温度等の影響によりデバイス全体の温度が変化すれば屈折率も変化することになる。また、プラズマ中を伝搬

する電磁波の分極率はプラズマ密度に比例する。これと同様の状況は、半導体中で光の屈折率がキャリア(電子または正孔またはその両方)の密度に依存する現象として現れる。これをキャリアプラズマ効果と呼んでいる。シリコン中においても、キャリア密度の変調により屈折率を変調することができる。(中村 滋)