

超短パルス光と全光スイッチング

田島 一人*・中村 滋*・浅川 潔**・杉本 喜正**

Ultrashort Optical Pulses and All-Optical Switching

Kazuhito TAJIMA, Shigeru NAKAMURA, Kiyoshi ASAKAWA and Yoshimasa SUGIMOTO

Symmetric Mach-Zehnder (SMZ) type all-optical switches achieve ultrafast switching, driven by ultrashort optical pulses. Their switching capability is discussed in terms of the driving optical pulse-width. As an example of application of such high speed switching, error-free demultiplexing of 42 Gbps signal pulses from a 336 Gbps signal stream is described. It is also discussed that the size of these optical devices can be drastically reduced by the use of the photonic crystal technology.

Key words: ultrashort optical pulse, all-optical switch, all-optical signal processing, photonic crystal, quantum dot

通信容量の飛躍的増大を実現するために、波長分割多重方式の研究開発が進められている。しかし、波長数が非常に多くなると、システムコストや消費電力の増大、そして装置の大型化などの問題が予想される。また、波長の管理等、ネットワークの運営も複雑になるため、効率の低下が危惧される。そこで、これらの問題を解決する技術の開発が望まれるが、そのひとつの方法は波長ごとの通信速度の増大、すなわち時間多重方式の飛躍的な速度向上である。しかし、従来の電気制御型光スイッチで 100 Gb/s を超える超高速通信に対応することは困難と考えられるため、光で制御される光スイッチ、すなわち全光スイッチの研究が行われている。

超高速全光スイッチ実現のポイントは、超高速動作と低パワー動作の両立、および良好なスイッチング特性の実現である。本稿で紹介する対称マッハ・ツェンダー (SMZ) 型全光スイッチ¹⁻³⁾は、これらの特性を高いレベルで満足することが可能と考えられる。このため多くの研究機関で研究開発が進められ、モノリシック集積技術⁴⁾やハイブリッド集積技術⁵⁾を用いて作製された SMZ 型全光スイッチ

の超高速動作⁶⁾が報告されている。本稿では、ハイブリッド集積 SMZ 全光スイッチおよびそれを用いた超高速パルス分離 (DEMUX) 動作について報告する。また、SMZ 全光スイッチの今後の発展形態として期待される、フォトリソ結晶と量子ドットのナノ構造を融合した超小型 SMZ (PC-SMZ) 全光スイッチの提案例⁷⁾を紹介する。

1. 対称マッハ・ツェンダー (SMZ) 全光スイッチ

図 1 に SMZ 全光スイッチを模式的に示す。SMZ 全光スイッチは、非線形屈折率変化が誘起される非線形エレメントおよびそれに制御光を導入するポートを MZ 干渉計の両アームに有する。このため、対称マッハ・ツェンダー全光スイッチとよばれる。非線形エレメントとしては、制御光パワーの低減のために半導体光増幅器 (SOA) 型が用いられる場合が多い。

SMZ 全光スイッチは差分位相変調方式により超高速スイッチングを行うが、その動作を同図に模式的に示す。まず、スイッチオン制御パルスを上ポートから入射させ、同 SOA 内に非線形屈折率変化を誘起する。これにより、ス

*日本電気(株)ネットワークング研究所 (〒305-8501 つくば市御幸が丘 34) E-mail: k-tajima@da.jp.nec.com

**フェムト秒テクノロジー研究機構 (〒300-2635 つくば市東光台 5-5)

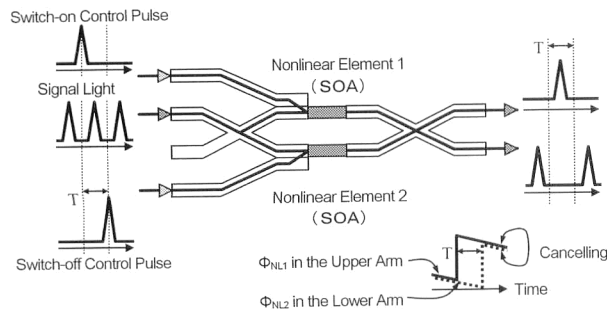


図1 対称マッハ・ツェンダー全光スイッチの模式図. 差分位相変調における信号パルス光, 制御パルス光のタイミングと上下のアームにおける屈折率変化を概念的に示す.

スイッチオン制御パルス以降に入射した信号パルス光の位相が変調される (ϕ_{NL1}) ため, 信号光出力ポートが切り替えられる. もしここで, 前記 SOA 内の屈折率変化が徐々に緩和するのを待てば, 出力は屈折率変化の緩和に従い徐々にもとのポートに戻る. これは従来の相互位相変調型全光スイッチの動作である. しかし, この緩和を待たずに他方のアームをスイッチオフ制御パルス光で励起すれば, 同図右下に示したように両アームの非線形屈折率変化を相殺することが可能である. この結果, SOA 内のバンド充填効果のような高効率非線形光学効果の遅い緩和に制限されない超高速低パワースイッチングと, 矩形型に近いスイッチング窓型が可能である.

SMZ 全光スイッチの構造は, 光集積素子化に適している. 図2に, 試作したハイブリッド集積 SMZ (HI-SMZ) 全光スイッチの構造を示す⁵⁾. 本素子は, 常圧気相成長法

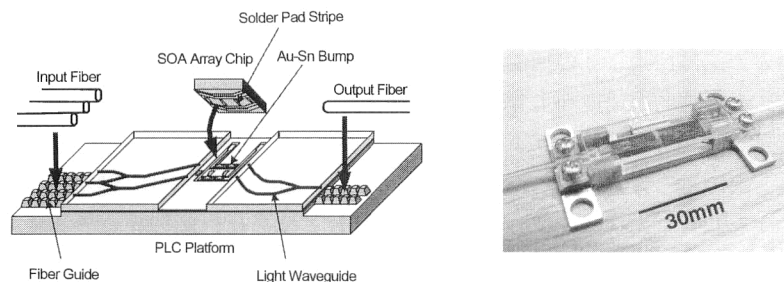


図2 ハイブリッド集積対称マッハ・ツェンダー全光スイッチの構成と写真.

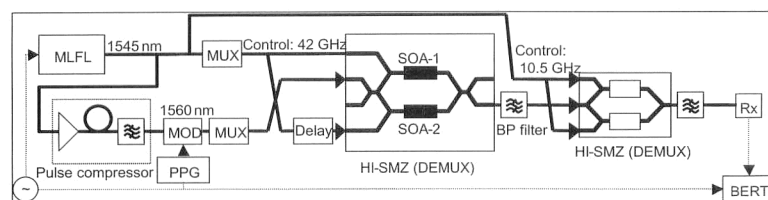


図3 336 → 42 Gbps DEMUX 実験系の概略. MOD: EO 光変調器, PPG: パルスパターン発生器, Rx: 受信系, BERT: 符号誤り率測定系.

(AP-CVD) による平面光波回路 (PLC) 技術を用いて作製されたものである. 光導波路部は PLC により形成され, その中に非線形導波路として 1 対の InGaAsP 半導体光増幅器 (SOA) が組み込まれている. PLC プラットフォームのサイズは約 20×5 mm で, その中に 4 個の SMZ が集積されている. 消光比は 20 dB 以上で, 集積素子の特徴である高い動作安定性が確認された. 図2の右に試作した素子の写真を示す.

2. SMZ 型全光スイッチによる超高速全光信号処理

上記のハイブリッド集積対称マッハ・ツェンダー (HI-SMZ) 全光スイッチを用いた超高速全光信号処理の一例として, 8 系統の 42 Gbps 信号が時間多重された 336 Gbps 光信号パルス列より, もとの 42 Gbps 信号を無エラーで分離 (de-multiplexing; DEMUX) した実験を紹介する. この DEMUX 実験系の概略を図3に示す. HI-SMZ スイッチは, 繰り返し周波数 42 GHz の制御光で駆動され, 336 Gbps の信号パルス光入力から 42 Gbps の信号パルス光を分離する. 制御光は, モード同期ファイバーレーザー (MLFL) からの出力光 (波長 1545 nm, 繰り返し周波数 10.5 GHz) を光遅延多重化回路により 42 GHz へ多重化 (MUX) したものをを用いた. 336 Gbps 信号パルス光は, 上記制御光源として用いた MLFL からの出力光を一部切り出し, パルス圧縮および波長変換 (波長 1545 → 1560 nm) を行った後, 疑似ランダムパターンで変調し, さらにそれ自身を 8 回時間多重することにより生成した. 低雑音パルス圧縮と波長変換は, ファイバー中のスーパーコンティニ

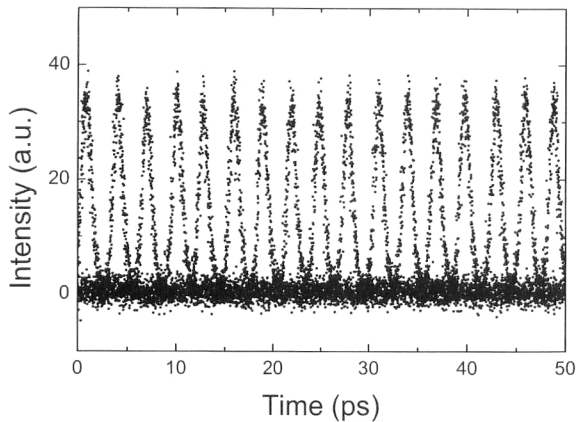


図4 336 Gbps 入力信号光のアイパターン。

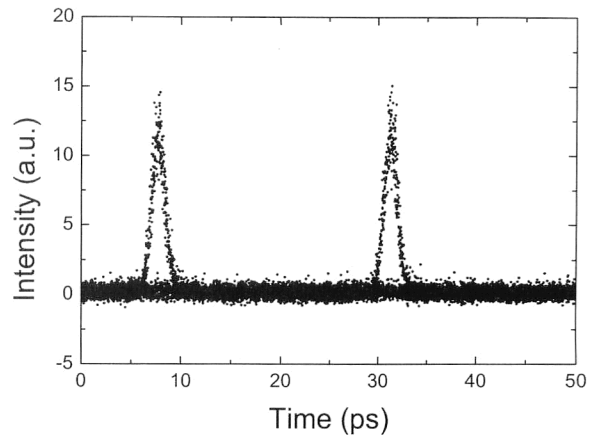


図5 336 → 42 Gbps 光 DEMUX 出力信号光のアイパターン。

ユウム状のスペクトル拡大と波長フィルタによる切り出し、そして分散補償を行うことにより実現した。

本実験では、336 Gbps の疑似ランダム信号のパルス光間隔 3.0 ps、パルス幅 0.9 ps に対し、制御パルス光幅は 1.5 ps と広めに設定している。これは、SOA 型非線形エレメント内のバンド内キャリアダイナミクス効果によるスイッチング特性劣化を最小限にするためである。すなわち、制御パルス光幅が 1 ps 程度もしくはそれ以下になると、スペクトラムホールバーニングおよびそれに伴うキャリアヒーティング効果により、スイッチングエネルギーの増大とともに差分位相変調における緩和のキャンセル作用が劣化する⁹⁾。これに対し、制御パルス光幅を広くしていくと、一般に隣接タイムスロットからの信号光クロストークが大きくなる。しかし、SMZ 型光スイッチでは、スイッチングウィンドウの立ち上がり立ち下がり時間が MZ 干渉計のサイン型伝達関数特性のためパルス幅より多少短縮される。このため、制御パルス光幅が信号パルス光間隔の 2 分の 1 程度まではクロストークの影響があまり大きくなることが、理論的にも実験的にも示されている⁹⁾。したがって、パルス間隔が 3.0 ps の 336 Gbps では、制御パルス光幅を 1.5 ps 程度にすることによってスイッチング特性劣化とクロストークを最小限にできると考えられる。

HI-SMZ スイッチの両アームの SOA に入力された制御パルス光エネルギーは約 50 fJ であった。また、SOA のバイアス電流は約 180 mA であった。この状態で、制御光によって誘起された非線形位相シフト量は約 0.5π と見積もられた。このような干渉計型素子では π シフトにおいて最もよい動作が実現されるため、非線形位相シフトの増大が望まれる。いくつかの方法が考えられるが、SOA 型非線形位相シフターの場合、活性領域の長尺化も有効な手段のひとつである¹⁰⁾。

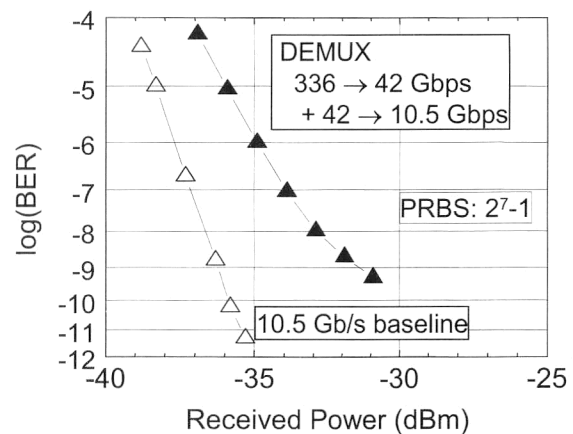


図6 336 → 42 Gbps 光 DEMUX (+42 → 10.5 Gbps 光 DEMUX) 出力に対する BER 測定結果。PRBS: 疑似ランダムビットシーケンス。

336 Gbps の入力信号光のアイパターンを光サンプリングオシロスコープにより測定した結果を図 4 に示す。10.5 Gbps から 336 Gbps への多重化 (MUX) が高均一に行われたことがわかる。また、HI-SMZ による光 DEMUX 動作により分離された 42 Gbps 信号光のアイパターンを図 5 に示す。図 5 からはわかりにくいですが、相互相関測定系を用いた他の平均測定法により消光比を測定した結果では、DEMUX された信号パルス光とそれ以外の信号パルス光の消光比は約 17 dB であった。符号誤り率 (BER) の測定は、別の HI-SMZ スイッチを用い 42 Gbps 信号光をさらに 10.5 Gbps へ DEMUX した後に行った。図 6 に示すように、 $BER < 10^{-9}$ の無エラー動作が達成された。

3. フォトニック結晶による SMZ 全光スイッチの微小・集積化

前章のハイブリッド集積 SMZ (HI-SMZ) 全光スイッチをすべて半導体フォトニック結晶 (PC) で構成すると、飛

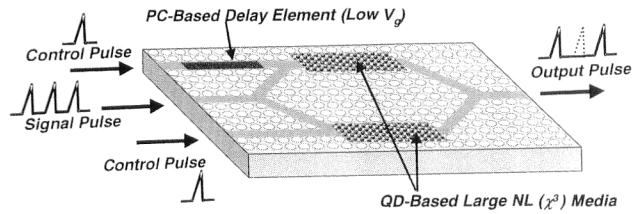


図7 2DPCを用いた超小型SMZ (PC-SMZ) 全光スイッチの模式図。図中、 V_g , $NL(\chi^3)$ はそれぞれ群速度, 非線形 (三次非線形定数) を表す。

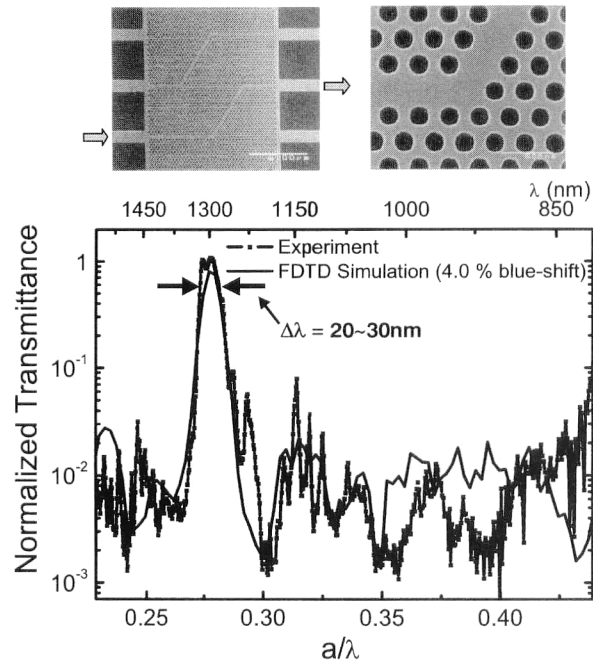


図8 GaAs系エアブリッジ型二次元PC曲がり導波路のパターンSEM写真(上図)および透過スペクトルの計算と実測例(下図)。図の横軸は、規格化周波数 (a/λ) を表す。

躍的な微小化が期待される。PCは屈折率コントラストが大きな周期構造のため光波の不透明領域(バンドギャップ)や強い群速度分散が現れ、このため急激な曲がり導波路や微小な光フィルター・共振器・遅延素子などのような、小型の光部品が実現できる。筆者らは近年、二次元(2D)PCでSMZ光導波回路を構成し、光非線形導波路に量子ドット(QD)を選択的に埋め込んだ極微小なSMZ全光スイッチ(PC-SMZ)を提唱した⁷⁾。

図7は同構造の模式図である。動作原理は従来のHI-SMZと同様であり、スイッチング速度は2つの制御パルスによる差分位相変調により高速化が保たれる^{1,2)}。PCを導入すると、低群速度を利用した光スイッチング・エネルギー(OSE)の低減が原理的に可能である^{11,12)}。これは分散曲線の低スロープ、すなわち低群速度領域を利用するもので、これにより制御光による非線形位相シフト量を増強で

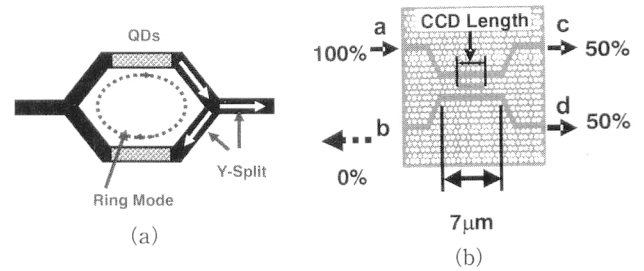


図9 (a) Y分岐導波路で構成されたPC-SMZ導波路の模式図。(b) Y合波部に必要な2DPCからなる3dB分岐DCの模式図。

きるため、所望の位相シフトを誘起する制御光のエネルギーを低減できる。また、低群速度領域を利用すれば差分位相変調に必要な小型の遅延素子もSMZ導波路と同一基板上に得られ、外部の光遅延回路が不要となる。さらに、SMZスイッチが飛躍的に小型化されることで、これらの自在な縦続・並列接続による新たな光信号処理素子の可能性が生まれる。現在、スイッチング速度40 Gbps以上、OSE 1 pJ以下のSMZ型差分位相変調動作をPC導波路で確認することを当面の目標としている。

一方、PC導波路は多くの点でHI-SMZ導波路と異なるため、SMZ導波路の構造・設計には格別の配慮が必要である。一例として非線形導波路の合波部では、従来のような微傾斜合波が困難なため、信号光が反対の非線形導波路に逆行しない構造が必要であり、T型やY型のPC合波器は好ましくない。方向性結合器は解決策の一例である。また、PCが高屈折率コントラスト構造であることから、一般に曲がりや分岐などで不要な反射波が無視できない。これは位相干渉型素子には障害であり、反射は十分低減することが重要である。これらの課題を踏まえたうえで、開発中のPC-SMZの現況を紹介する。

図8の上部に、円孔配列型2DPCで1列のみ配列が除去された60°曲がり導波路のSEM写真を示す。厚み方向はコア層のGaAs系エアブリッジ・スラブ構造で光閉じ込めがなされている^{13,14)}。同図の下部は、透過スペクトルの実測値および計算値(三次元FDTD法)であり、両者はよい一致を示している¹⁵⁾。格子定数、円孔直径、およびスラブ厚はそれぞれ360 nm, 200 nm, 250 nmである。当面、1.3 μm付近に高透過率領域が設計された試料での波長帯域幅は20~30 nmである。透過域は平坦ではないが、PC-SMZ応用の場合、40~160 Gbps程度の制御・信号用短パルス(離調~20 nm)の通過には利用できる。

図9(a)は、Y分岐・合波路で構成されたPC-SMZ導波路の模式図であり、上述した合波器の不具合を解消する方向性結合器(DC)の構造図を同図(b)に示す¹⁶⁾。DCは1.3

μm 波長帯で結合度 50% (−3 dB 分岐) に設計され、全長はわずか $7\ \mu\text{m}$ と小型化されている。この小型化には、3 列の円孔配列で構成される結合部の結合係数増強のために挿入した円孔欠陥 (長さ $\sim 3\ \mu\text{m}$) の効果が表れている。端子 b での戻り光強度の計算値は 2~3% 以下であるため、本構造は SMZ 素子に適用可能である。また、 $1.3\ \mu\text{m}$ 近傍での −3 dB 分岐も実験的に確認している。図 10 は、このような 50% 結合 DC を 2 段に縦続接続した試料の導波路パターンであり、すでに 100% 結合を実験的に確認していることから、本素子が PC-SMZ に必要な光干渉機能を果たしているといえる。

光スイッチに必要な非線形位相シフトは、非線形媒質としての InAs/GaAs 系 QD (サイズ: $40\sim 50\ \text{nm}$) がナノプロブ加工技術を用いて所望の領域にのみ多層に埋め込まれる¹⁷⁾。QD の選択的成形技術と性能は本稿では割愛するが、QD の非線形屈折率変化が ~ 0.001 であることを想定し¹⁸⁾、さらに PC の低群速度 ($1/3\sim 1/10$) 効果を利用することで、所望の位相シフト ($\pi/2\sim\pi$) に必要な非線形導波路長として $100\sim 300\ \mu\text{m}$ が算出されている¹⁹⁾。この計算により、PC-SMZ のチップサイズを $500\times 500\ \mu\text{m}^2$ に収める見通しを得ている。なお、上述の光遅延素子についても、すでに二次元等価屈折率 FDTD 法によるシミュレーションに着手しており²⁰⁾、図 7 に示したような小型遅延素子のモノリシックな集積も可能である。

各種光部品の小型化を目指した PC 導波路の従来研究は多くが計算にとどまり、一部で実験結果が報告されている。しかし、PC-SMZ のような光回路への検討は少ない。本稿で述べなかったが、個別素子の集積化には構造パラメータの整合や、異種導波路間のモード・群屈折率マッチングなども今後の課題である。これらの課題解決の後には、性能・機能の飛躍的な向上が期待されるため、高精度なシミュレーションやナノ加工技術、能動媒質 (QD など) の組み込み技術など、PC 導波路固有の要素技術の今後の進展がおおいに期待される。

超短パルス光により駆動され、他の超短パルス光の超高速スイッチングが可能な対称マッハ・ツェンダー (SMZ) 型全光スイッチについて述べた。SMZ 型全光スイッチは、差分位相変調方式により超高速低パワースwitchingを実現する。その応用例として、本稿では 336 Gbps から 42 Gbps 光信号の全光 (すなわち光領域での) 分離動作 (DEMUX) について説明した。しかし、SMZ 型全光素子の応用は DEMUX に限られるわけではなく、同スイッチによりさまざまな全光信号処理が可能になると考えられ

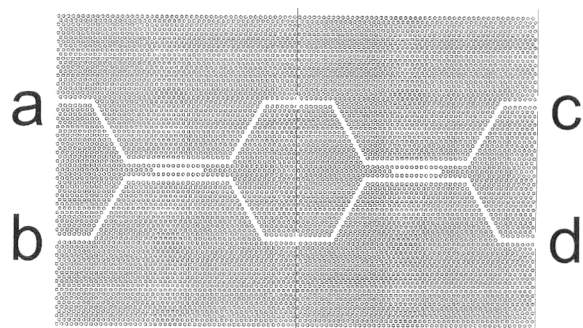


図 10 光干渉確認用 2 段縦続接続型 3 dB 分岐 DC 導波路の模式図。

る。超高速性を示す他の例としては、84 Gb/s 信号パルス光列の無エラー全光再生動作²¹⁾、および 168 Gb/s 信号パルス光列の無エラー全光波長変換動作²²⁾などが実現されている。また、よりシステマ的なファイバーループを用いた長距離伝送実験では、SMZ 型全光スイッチを 2 台カスケード接続した全光信号再生器を用いることにより、40 Gbps で 12000 km 以上の超長距離無エラー伝送²³⁾が実現されている。

最後に、HI-SMZ の今後の発展形態として期待される、フォトニック結晶と量子ドットのナノ構造を融合した超小型 SMZ (PC-SMZ) 全光スイッチの提案例を紹介し、極微小・モノリシック集積・超高速・低光パワーなど期待される性能・特徴・課題と展望を概説した。

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から研究を委託されたフェムト秒テクノロジー研究機構 (FESTA) の研究の一環として行った。

文 献

- 1) K. Tajima: "All-optical switch with switch-off time unrestricted by carrier lifetime," Jpn. J. Appl. Phys., **32** (1993) L1746-L1749.
- 2) S. Nakamura, K. Tajima and Y. Sugimoto: "Experimental investigation on high-speed switching characteristics of a novel symmetric Mach-Zehnder all-optical switch," Appl. Phys. Lett., **65** (1994) 283-285.
- 3) K. Tajima, S. Nakamura and Y. Sugimoto: "Ultra-fast polarization-discriminating Mach-Zehnder all-optical switch," Appl. Phys. Lett., **67** (1995) 3709-3711.
- 4) R. Hess, M. Caraccia-Gross, W. Vogt, E. Gamper, P. A. Besse, M. Duell, E. Gini, H. Melchior, B. Mikkelsen, M. Vaa, K. S. Jepsen, K. E. Stubkjaer and S. Bouchoule: "All-optical de-multiplexing of 80 to 10 gb/s signals with monolithic integrated high-performance Mach-Zehnder interferometer," IEEE Photonics Technol. Lett., **10** (1998) 165-167.
- 5) K. Tajima, S. Nakamura, Y. Ueno, J. Sasaki, T. Sugimoto, T. Kato, T. Shimoda, M. Itoh, H. Hatakeyama, T. Tamanuki and T. Sasaki: "Hybrid integrated symmetric Mach-

- Zehnder all-optical switch and its ultra-fast, high extinction switching," *Electron. Lett.*, **35** (1999) 2030-2031.
- 6) S. Nakamura, Y. Ueno, K. Tajima, J. Sasaki, T. Sugimoto, T. Kato, T. Shimoda, M. Itoh, H. Hatakeyama, T. Tamanuki and T. Sasaki: "De-multiplexing of 168-Gb/s data pulses with a hybrid-integrated symmetric Mach-Zehnder all-optical switch," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **12** (2000) 425-427.
 - 7) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, K. Asakawa, N. Kawai and K. Inoue: "Fabrication and characterization of different types of two-dimensional AlGaAs photonic crystal slabs," *J. Appl. Phys.*, **91** (2002) 922-929.
 - 8) S. Nakamura, Y. Ueno and K. Tajima: "Femtosecond switching with semiconductor-optical-amplifier-based Symmetric Mach-Zehnder-type all-optical switch," *Appl. Phys. Lett.*, **78** (2001) 3929-3931.
 - 9) S. Nakamura, Y. Ueno, J. Sasaki and K. Tajima: "Error-free de-multiplexing at 252 Gbit/s and low-power-penalty, jitter-tolerant de-multiplexing at 168 Gbit/s with integrated Symmetric Mach-Zehnder all-optical switch," *European Conference on Optical Communication (ECOC 2001)*, Th.F. 2.2 (Amsterdam, The Netherlands, 2001).
 - 10) T. Tamanuki, S. Nakamura, Y. Ueno, K. Tajima, S. Ae, K. Mori, H. Hatakeyama and T. Sasaki: "Dependence of nonlinear phase shift on cavity length of SOA for all-optical signal processing," *Optical Fiber Communication Conference (OFC2003)*, ThX4 (Atlanta, USA, 2003).
 - 11) K. Inoue, N. Kawai, Y. Sugimoto, N. Carlsson, N. Ikeda and K. Asakawa: "Observation of small group velocity in two-dimensional AlGaAs-based photonic crystal slabs," *Phys. Rev. B*, **65** (2002) 121308-1-121308-4.
 - 12) H. Nakamura, S. Nishikawa, S. Kohmoto and K. Asakawa: "Saturation intensity in InAs quantum dot and its application to all-optical switches," *Proceedings of LEOS2001*, Wu2 (San Diego, 2001).
 - 13) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, K. Asakawa, N. Kawai and K. Inoue: "Theoretical and experimental investigation of straight defect waveguides in AlGaAs-based air-bridge-type two-dimensional photonic crystal slabs," *Appl. Phys. Lett.*, **79** (2001) 4286-4288.
 - 14) Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Carlsson, K. Asakawa, N. Kawai and K. Inoue: "Light-propagation characteristics of Y-branch defect waveguide in AlGaAs-based air-bridge-type two-dimensional photonic crystal slabs," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 388-390.
 - 15) K. Inoue, T. Maruyama, K. Miyashita, K. Ishida, Y. Sugimoto, N. Ikeda, Y. Tanaka and K. Asakawa: "Ultra-miniature 60°-bend photonic-crystal waveguide of air-bridge type: Low-loss at 1.3 μm due to the single guided-mode experimentally identified," to be submitted.
 - 16) Y. Sugimoto, Y. Tanaka, N. Ikeda, T. Yang, H. Nakamura, K. Asakawa, K. Inoue, T. Maruyama, K. Miyashita and K. Ishida: "Design, fabrication and characterization of coupling-strength-controlled directional coupler (CC-DC) based on two-dimensional photonic crystal slab waveguides," to be printed in *Appl. Phys. Lett.*, **83** (20 Oct 2003).
 - 17) S. Kohmoto, H. Nakamura, T. Ishikawa and K. Asakawa: "Site-controlled self-organization of individual InAs quantum dots by scanning tunneling probe-assisted nanolithography," *Appl. Phys. Lett.*, **75** (1999) 3488-3490.
 - 18) H. Nakamura, S. Nishikawa, S. Kohmoto, K. Kanamoto and K. Asakawa: "Optical nonlinear properties of InAs quantum dots by means of transient absorption measurements," *J. Appl. Phys.*, **94** (2003) 1184-1189.
 - 19) Y. Watanabe, H. Nakamura, Y. Sugimoto, S. Lan, K. Asakawa, N. Yamamoto, K. Komori and K. Inoue: "Simulation of group velocity-dependent phase shift induced by refractive-index-change in air-bridge-type AlGaAs two dimensional photonic crystal slab waveguide," submitted to *J. Opt. Soc. Am. B*.
 - 20) T. Yang, Y. Sugimoto, S. Lan, N. Ikeda, Y. Tanaka and K. Asakawa: "Transmission properties of coupled-cavity waveguide based on two-dimensional photonic crystals with a triangular lattice of air holes," accepted for *J. Opt. Soc. Am. B*.
 - 21) Y. Ueno, S. Nakamura and K. Tajima: "Penalty-free error-free all-optical data pulse regeneration at 84 Gb/s by using a Symmetric-Mach-Zehnder-type semiconductor regenerator," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **13** (2001) 469-471.
 - 22) S. Nakamura, Y. Ueno and K. Tajima: "168-Gb/s all-optical wavelength conversion with a Symmetric-Mach-Zehnder-type switch," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **13** (2001) 1091-1093.
 - 23) R. Kuribayashi, Y. Hashimoto, S. Nakamura, I. Ogura and K. Tajima: "12,000-km transmission at 40 Gbps with a semiconductor-based optical 3R regenerator," submitted to *Electron. Lett.*

(2003年6月10日受理)