

# 光信号処理用全光シリアル-パラレル変換回路の研究（延長）

代表研究者

高畑 清人

早稲田大学 大学院情報生産システム研究科 准教授

## 1 はじめに

デジタルトランスフォーメーション (DX) とそれを可能にするための IT 技術は社会構造、人々の生活に変革をもたらすものとして従来にも増して重要性が増大している。SNS (Social Network Service)、動画配信サービス、IoT (Internet of Things) 等の普及によりデータ通信トラフィックが急激に増加し続けており、通信ネットワークでは基幹系、メトロ系だけではなく、5G の普及に向けては非常に重要となるアクセス系についても通信容量増大のために光ファイバ通信技術が導入されるようになった。リンク容量については、近年、デジタルコヒーレント光伝送技術やマルチキャリア伝送技術、マルチコアファイバ伝送技術の進展により飛躍的な増大が可能となった。一方で、ネットワークのノード系装置においては、信号処理の大部分を電子回路技術に依存しているため、スループット、遅延時間に加えて消費電力も大きな課題となっている。これらの問題を解決するために、光信号のままルート、パケットの制御を行う技術の研究・開発が進められてきた。また、近年ではデータ・センター内のネットワークにおいても膨大なデータ処理を実行する際に同様の課題が深刻になっており、その解決策として光信号処理技術が注目されている。

光パケットスイッチ・ネットワーク [1] におけるパケット・ラベル処理を高スループット、低遅延時間、低消費電力で行うために以下に挙げるような様々な光ラベル処理技術が報告されている。

- ・波長分割多重コードの利用 ([2] Q. Yang 他, 2001)
- ・表面反射型光スイッチの利用 ([3] R. Takahashi 他, 2003)
- ・光クロック動作トランジスタアレイの利用 ([4] R. Urata 他, 2006)
- ・半導体光増幅器による波長変換を利用 ([5] H. Hu 他, 2008)
- ・面発光型レーザーの偏波スイッチの利用 ([6] T. Katayama 他, 2013)
- ・マッハツエンダー遅延干渉計の利用 ([7] H. Kusano 他, 2015)

これらの中の多くが高速光シリアル信号を低速パラレル信号に変換してから信号処理を行う方法を提案しており、光シリアル-パラレル変換器が重要な構成要素となっている。しかしながら、多くの光シリアル-パラレル変換器は高速シリアル信号をパラレル展開する際にビット間隔に応じて段階的に遅延長を変えた光遅延線をビット数分備える構成を用いており、この光遅延線が光シリアル-パラレル変換器全体のサイズ小型化を阻害する要因となっている。この問題を解決するために、我々は 2019 年度に研究助成を受け、シリコンフォトリソ技術に基づいた新しい小型光遅延ユニットを提案し、基礎検討と基本設計を実施した。2020 年度の研究では継続してこの課題に取り組み、小型光遅延ユニットと組み合わせて光シリアル-パラレル変換動作を実行するためのもう 1 つの重要部品となる波長変換器について検討を行ったので報告する。

## 2 光シリアル-パラレル変換器内の波長変換器

図 1 に前年度に提案し基礎検討を行った小型光シリアル-パラレル変換器を示す。本変換器は直列に接続された複数の回折格子とそれらの間に配置された遅延光導波路から成る小型光遅延ユニット、光サーキュレータ、及び波長変換部分で構成されており、以下のように動作する。

- ① 波長の異なる搬送波パルスビット数に応じて用意。(光周波数コム技術、スペクトルスライス技術等により生成。)
- ② 波長の異なる複数の搬送波パルスをサーキュレータ-1 を介して光遅延ユニットに入力する。搬送波パルスは各々が波長に応じた回折格子で反射される。
- ③ 搬送波パルスはサーキュレータ-1 を介して光遅延ユニットから出力される。この際に波長毎にサーキュレータ-1 と回折格子の間を往復する伝搬時間が段階的に  $\tau$  ずつ異なるため、ユニットからの出力はシリアル搬送波パルス列となる。
- ④ ③の搬送波パルス列と入力シリアル光信号を波長変換器に入力し、入力信号の情報を搬送波パルス列に乗せる。

- ⑤ ビット毎に波長の異なるシリアル光信号をサーキュレータ-2 を介して②とは逆側のポートから光遅延ユニットに入力する。シリアル光信号パルスは各々が波長に応じた回折格子で反射され、サーキュレータ-2 を介して光遅延ユニットから出力される。この際に波長毎にサーキュレータ-2 と回折格子の間を往復する伝搬時間が異なり、ユニットからは波長の異なる全パルスが同一のタイミングで出力される。
- ⑥ これら全パルスをも波長分波器を用いて波長毎に異なる出力ポートに導波させることで、パラレル光信号を得る。

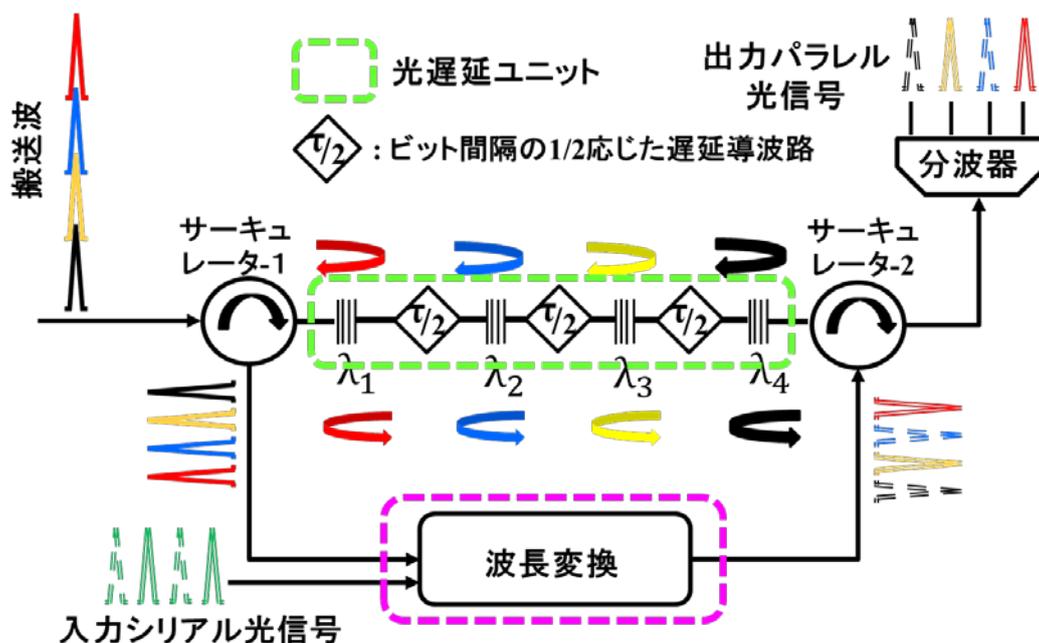


図1 提案する光シリアル-パラレル変換回路構成法

光遅延ユニットは②と⑤の動作において、波長の異なる入力搬送波パルス（②）と波長変換後のシリアルパルス列（⑤）に対して波長毎に信号のビット間隔に応じた異なる遅延時間を与える機能を担う重要な構成部品である。昨年度はこの部品の小型化に重点を置き、新しい小型光遅延ユニットの構造の提案とレイアウト設計、及びシミュレーションによる基本機能の確認を実施した。

今年度は④の動作を担う波長変換器について2種類の方法を検討したので、その結果を以下に述べる。

### 3 波長変換の検討

#### 3-1 半導体光増幅器を用いた波長変換

光波長変換は波長分割多重（WDM）伝送システムにおいて重要な要素技術の1つであり、1990年代から活発に研究され様々な方法が報告されている [8-10]。それらの中でも光半導体増幅器を用いた波長変換は、非常に小さい半導体チップ（チップ長<1 mm）で波長変換動作を実現できるため、小型化を主な目的とする本シリアル-パラレル変換器に適用する有力な技術である [8, 9]。

本研究では、波長変換動作の検討のために図2に示す検証モデルを光伝送シミュレータ上に構築した。この検証モデルでは、波長 1550 nm の CW 搬送光と NRZ (Non-Return to Zero) 変調された波長 1520 nm の信号光を同時に半導体光増幅器に入力し、光増幅器内で生じる相互利得変調により搬送光が変調される。光増幅器からは両方の波長が出力されるので光帯域フィルタを用いて必要な波長変換光信号のみを取り出してオシロスコープで波形を観測する構成となっている。半導体光増幅器の相互利得変調では、搬送光のみが入力されて注入電流により光増幅器内で励起されたキャリアはすべて搬送光の増幅に用いられている状態であるところに信号光が入力されると、励起キャリアが信号光の増幅にも消費されることになり、その結果搬送光が得ていた利得が減少し、半導体光増幅器から出力される搬送光の強度が変調される。この動作原理からわか

るように、相互利得変調では出力される波長変換信号は入力光信号に対してオンとオフが反転した信号となる。本検討で用いた光半導体増幅器モデルは共振器長 500  $\mu\text{m}$  で、バイアス電流は 200 mA の条件で波長変換動作のシミュレーションを行った。

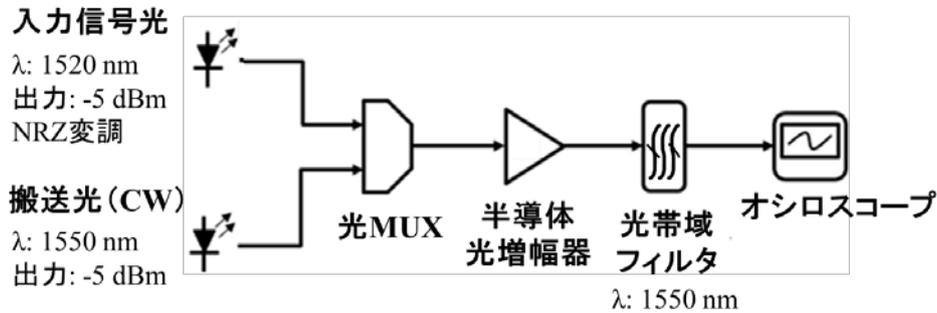


図2 半導体光増幅器を用いた波長変換の評価モデル

図3に10 Gbit/s (図3 (a), (b))、及び20 Gbit/s (図3 (c), (d)) の入力信号を用いた場合のシミュレーション結果を示す。10 Gbit/s では図3 (b)に示されるようにオン、オフ信号どちらにも強度のばらつきは見られるものの、そのばらつきは比較的小さく、入力信号に追従した波長変換信号が得られているとみなせる。しかし、20 Gbit/s では図3 (d)に示されるようにオン、オフ信号どちらにも強度のばらつきが顕著であり、信号振幅も小さくなっている。これは信号速度に対して半導体光増幅器内部のキャリア回復時間が長いためである。キャリア回復時間はバイアス電流の増加や長共振器化によって短縮が可能ではあるが、発熱等の別の問題も生じる。本検討では、相互利得変調を用いる方法で目標とする40Gbit/s級の波長変換動作を検証することは容易ではないと判断し、次に相互位相変調を用いた波長変換の検討を実施した。

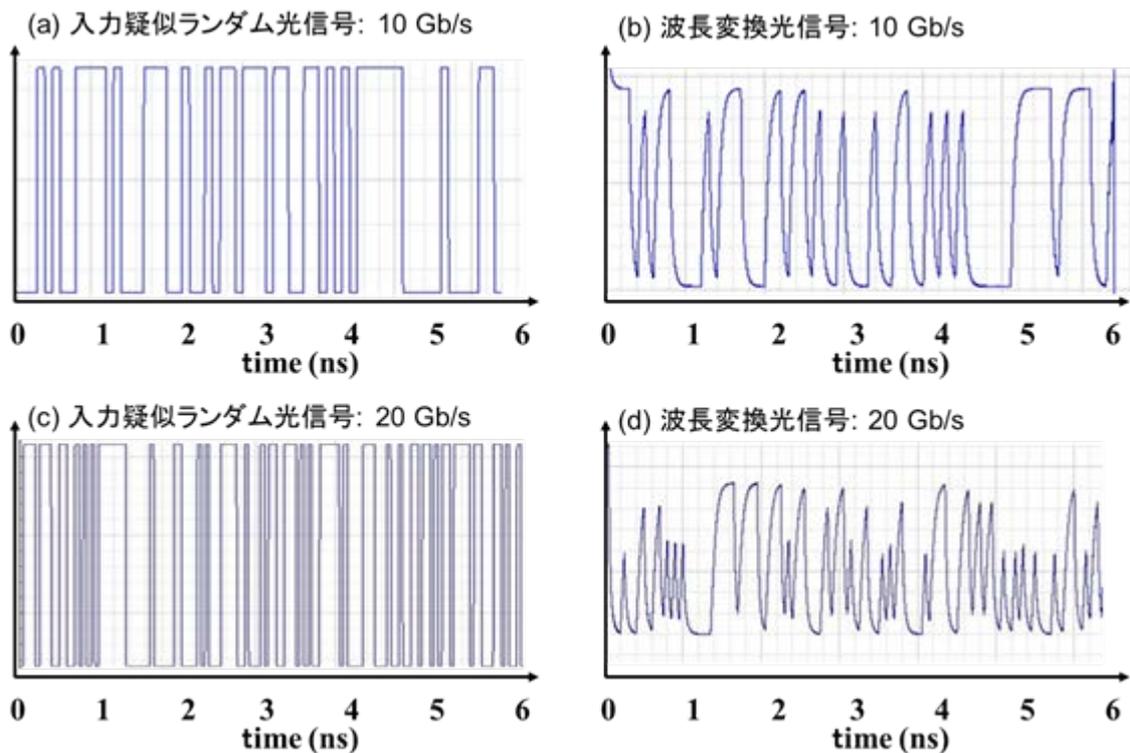


図3 半導体光増幅器の相互利得変調による波長変換動作のシミュレーション結果

### 3-2 高非線形ファイバを用いた波長変換

半導体光増幅器の相互位相変調を用いた波長変換についてもいくつかの研究結果が報告されているが、本研究で用いた光伝送シミュレータの半導体光増幅器モデルには相互位相変調動作を実行する機能が備わっていないため、ここでは高速動作が可能な高非線形ファイバ (HNLF) の相互位相変調を用いた波長変換について基礎検討を実施した[10]。波長変換動作の検討のために図4に示す検証モデルを光伝送シミュレータ上に構築した。

この検証モデルでは、波長 1578 nm のポンプ光と 40 Gbit/s で NRZ (Non-Return to Zero) 変調された波長 1546 nm の信号光を同時に高非線形ファイバに入力し、ファイバ内で生じる相互位相変調により発生する波長変換光を得る。波長変換光には信号光と同じ信号が重畳される。高非線形ファイバからは複数の波長の光が出力されるので、光帯域フィルタによって必要な波長変換光のみを取り出す構成である。フィルタを透過した変換光はフォトダイオードで電気信号に変換され、信号伝送性能を調べるために符号誤り率測定器 (BERT) で評価される。

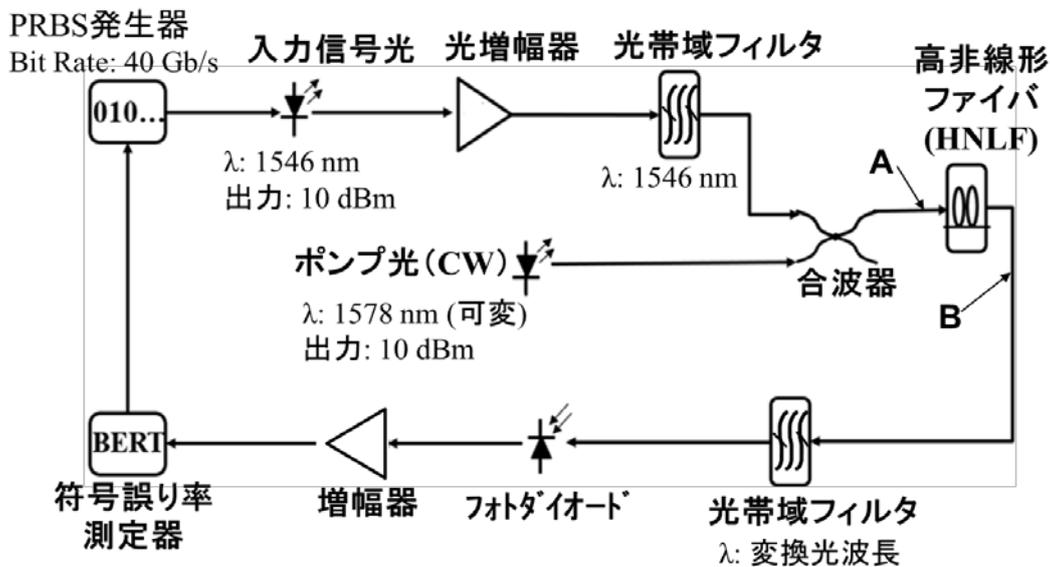


図4 高非線形ファイバを用いた波長変換の評価モデル

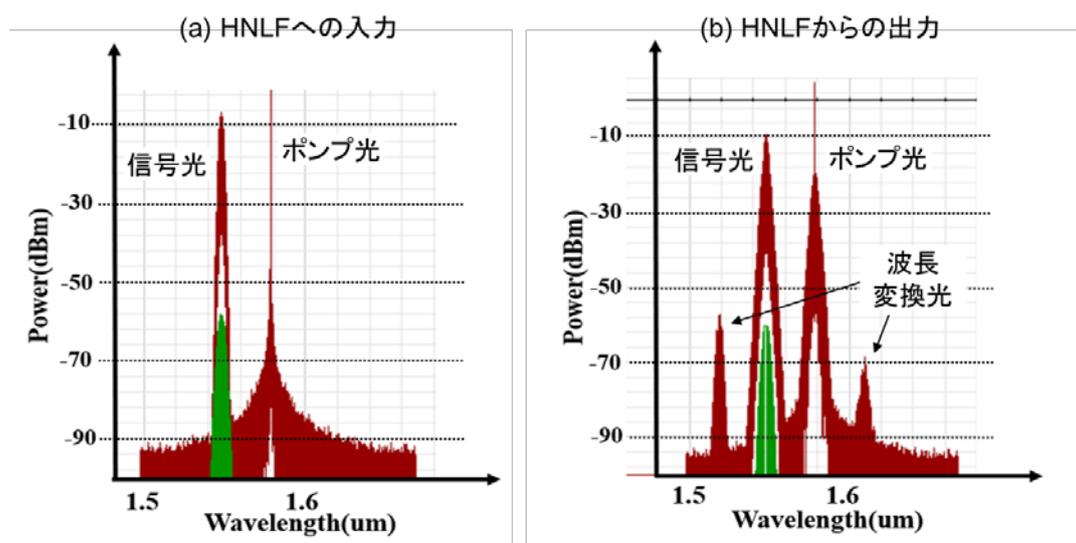


図5 高非線形ファイバを用いた波長変換前後の光スペクトル

図5 (a), (b)に高非線形ファイバ入力端(図4のA点)と出力端(図4のB点)における光スペクトルを各々示す。図5 (b)で明らかなように、高非線形ファイバ通過後には長波側と短波側に各々波長変換光が生成されている。変換光は信号光とポンプ光が同時に入力された時、即ち信号光がオン状態の時にのみ生成されるので、信号光に同期したオンオフ信号となる。このシミュレーションでは波長フィルタにより強度の強い短波側の変換光のみを取り出して符号誤り率を評価し、符号誤り率が $1.0 \times 10^{-12}$ 以下となるエラーフリーの波長変換動作を確認した。次に、波長変換が可能な波長帯域を調べるために、ポンプ光の波長1550~1600 nmで掃引して符号誤り率を評価した。ポンプ光波長が1555~1596 nmの広い波長範囲でエラーフリー動作が得られ、前年度に設計した小型光遅延ユニットの動作波長帯域(8波、波長帯域: 25 nm)に対して本波長変換技術が十分な帯域を有することが確認できた。

#### 4 まとめ

光パケットのラベル処理等の光信号処理において重要な役割を担う光シリアル-パラレル変換回路について、その主要構成部品である波長変換器についてシミュレーションによる基礎検討を行った。はじめに、小型化の点で大きな利点を有する半導体光増幅器を用いた波長変換の検討を実施した。波長1.55  $\mu\text{m}$ 帯において半導体光増幅器の相互利得変調による波長変換を検証するモデルを光伝送シミュレータ上に構築し、NRZ変調された信号光の波長変換を調べた結果、10 Gbit/s 信号光に対しては劣化の少ない変換光を出力可能だが、20 Gbit/s 信号光に対しては変換光の信号劣化が顕著であった。次に、高非線形ファイバの相互位相変調を用いた波長変換について検討を実施した。相互位相変調では高速動作が可能であるため、40 Gbit/s の入力信号光をエラーフリーで波長変換可能であることが確認できた。また、前年度設計した小型光遅延ユニットの動作波長帯域に対して十分に広い波長範囲で波長変換動作が可能であることも確認できた。但し、高非線形ファイバを用いた波長変換は小型化、集積化には適さないため、今後は、半導体光変調器の相互位相変調を再現可能なシミュレーションモデルを構築し、その光シリアル-パラレル変換回路への適用可能性を検証する必要がある。

## 【参考文献】

- [1] A. Takada and P. H. Jin, "Architecture of ultrafast optical packet switching ring network," IEEE J. Lightwave Technol., vol. 20, pp. 2306-2315, Dec. 2002.
- [2] Q. Yang, et al, "WDM packet routing for high-capacity data networks," J. Lightw. Technol., vol. 19, no. 10, pp. 1420-1426, 2001.
- [3] R. Takahashi et al., "1-Tb/s 16-b all-optical serial-to-parallel conversion using a surface-reflection optical switch," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 5, no. 2, pp. 287-289, 2003.
- [4] R. Urata et al., "An optically clocked transistor array with dual serial-to-parallel and parallel-to-serial conversion capability for optical label swapping," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 18, no. 1, pp. 67-69, 2006.
- [5] H. Hu et al., "40-Gb/s All-Optical Serial-to-Parallel Conversion Based on a Single SOA," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 20, no. 13, pp. 1181-1183, 2013.
- [6] T. Katayama et al., "All-optical header recognition and packet switching using polarization bistable VCSEL," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 25, no. 9, pp. 802-805, 2013.
- [7] H. Kusano et al., "Investigation of a Silicon Photonic Optical Serial-to-Parallel Converter with Mach-Zehnder Delay Interferometers and Integrated Ge-PDs," IEEE J. Quantum Electron., vol. 51, no. 8, 6300109, 2015.
- [8] C. Joergensen et al., "All-optical wavelength conversion at bit rates above 10 Gb/s using semiconductor optical amplifiers," J. Selected Topics in Quantum Electron., vol. 3, no. 5, pp. 1168-1180, 1997.
- [9] L. Banchi et al., "All-Optical 10 and 40 Gbit/s RZ-to-NRZ Format and Wavelength Conversion Using Semiconductor Optical Amplifiers," J. Lightw. Technol., vol. 28, no. 1, pp. 32-38, 2010.
- [10] A.-L. Yi et al., "Wavelength Conversion of RZ-OOK PDM Signals Based on XPM in Highly Nonlinear Fiber," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 23, no. 6, pp. 341-343, 2011.

## 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月