

# 全光信号変換回路を用いたフォトニックネットワーク技術に関する研究

松浦基晴

電気通信大学先端領域教育研究センター特任助教

## 1 はじめに

フォトニックネットワークは、伝送回線を全て光技術で構成することで、電子回路の処理速度制限を受けられることなく、広帯域・超高速伝送を実現出来ることから、将来の情報通信基盤技術として活発に研究が進められている。このようなネットワークは、網の目状に張り巡らされた光ファイバ伝送路と、それらをつなぐ光中継ノードで構成されるが、構成上、それぞれの光伝送路の伝送距離は千差万別となる。高品質な伝送特性を有するネットワークを実現するには、それぞれの光伝送路において、伝送距離に応じた伝送特性の最適化を行うことが重要である。光信号の波形（パルス幅）は、受信器の受信感度と伝送路の波長分散耐性にトレード・オフの関係を持つことから、任意の伝送距離を持つ光伝送路に対して、適切なパルス幅の光信号を送り送らせることで、より高品質な伝送特性を得ることが可能である[1-4]。

通信トラフィックの増大に伴い、大規模なフォトニックネットワーク構築の必要性が急速に高まっている。ネットワークの各光中継ノード間で高い伝送品質を確保することは、きわめて重要な技術課題となっている。一般的な品質補償技術としては、伝送路の受信側で波長分散補償や波形整形技術によって伝送品質を補償する手法がよく用いられているが、本研究では、全光型の光波形変換回路を構成し、各光中継ノード（伝送路の送信側）において、光送信信号のパルス幅を制御し、任意の伝送路に対して高い伝送品質を実現するフォトニックネットワークのための新しい品質補償技術を実現するものである。提案する光波形変換回路は、小型化が容易で、光信号を光のまま変換することが可能であるため、将来の伝送速度の高速化に対して、省電力動作に有効である。将来のネットワーク高品質化ならびに省電力化に寄与出来る新しいフォトニックネットワーク技術の研究を実施した。

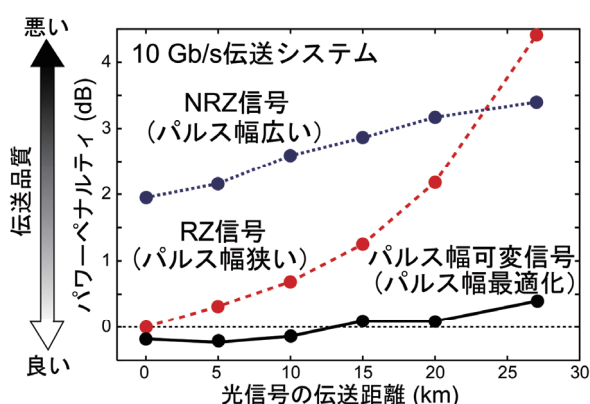


図1：伝送距離に対する光信号の伝送品質

本研究に先駆けて、我々は、半導体光増幅器を用いたパルス幅可変光源を構成し、その詳細な伝送特性評価を実施している[3]。図1に著者らの過去の研究で示された伝送距離に対する光信号の伝送特性を示す。NRZ (Non-Return-to-Zero) 信号はパルス幅が広いので、受信感度は悪い（パワーペナルティ大）反面、波長分散耐性に優れているので、長い距離を送り送らせても、伝送品質は劣化しにくい（青点線）。一方、パルス幅の狭いRZ (Return-to-Zero) 信号は、受信感度は良い反面、分散耐性が悪いので長い距離を送り送らせると伝送品質は急激に劣化する（赤波線）。これに対し、パルス幅可変光源では、伝送距離に応じてパルス幅を最適化することで、図に示すように、伝送距離によらず、優れた伝送品質を維持することが可能である。

これにより、全光信号波形変換回路とその特性を駆使することで、将来のフォトニックネットワークに有効な新しい光信号処理技術の実現が期待出来る。

## 2 ラマン増幅器型パルス圧縮器を利用した全光信号変換

### 2-1 研究目的

先述したように、任意の伝送距離を有する光ファイバ伝送路では、最も良い伝送特性を得られる最適な光パルス幅が存在することになるので、光信号波形（パルス幅）制御によって、伝送特性を最適化することが可能になる。我々は、これまでに光半導体素子の非線形現象を活用した光信号波形技術に関する研究に取り組んできた。これまでの光信号波形制御の独自技術では、入力光信号に対し、パルス幅の長い方への波形制御が可能であったが、短い方への波形制御は原理的に困難であった。そこで、この研究では、ラマン増幅過

程で発生するソリトン現象を利用し[5]、ラマン励起光源の励起光強度を制御することで、光データ信号波形の制御が可能な光信号制御技術の開発し、その性能評価を行った。

### 2-2 実験構成

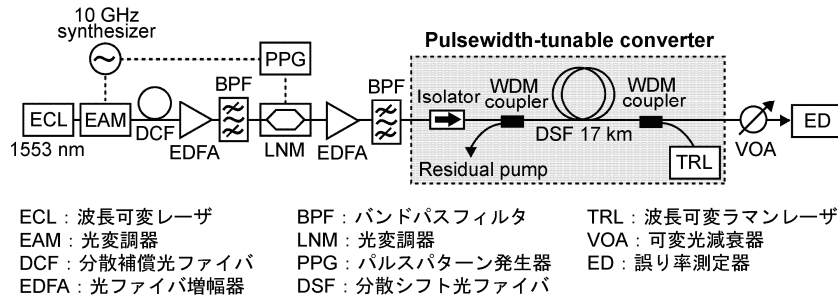


図 2：光信号波形変換の実験構成

図 2 に光信号波形変換の実験構成を示す[6]。波長可変レーザの出力光から前段の光変調器 (EAM) を用いて、RZ 光クロック信号を発生している。この際、光変調器で発生する光信号の周波数チャージングを補償するため、逆分散特性を有する累積分散-40 ps/nm の分散補償光ファイバ (DCF) を光変調器の後段に配し、DCF 直後で、パルス幅 14.7 ps の RZ 光信号を得ている。光ファイバ増幅器 (EDFA) で増幅された光信号は、後段の光変調器を用いてデータ変調を行い、伝送速度 10 Gbit/s の光データ信号を生成している。パルス幅変換器 (グレー部) では、17 km の分散シフトファイバに波長可変ラマンレーザによる後方励起によって、ラマン増幅器を構成している。ここで、入力するラマン励起光パワーを変えることで、ソリトン条件に基づき、伝搬する光パルスのパルス幅が変化するので、光信号波形制御が可能になる。尚、本系は、パルス幅圧縮原理に基づいて、信号波形変換を行っているので、入力・出力信号の波長はシフトすることがなく、信号波形変換に適した波長シフトフリー動作を行えるのが特長である。

### 2-3 実験結果

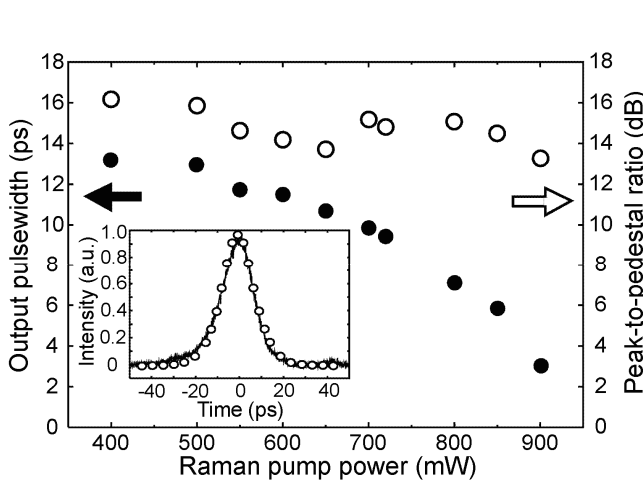


図 3：パルス幅とピーク・ペデスタル比の関係。

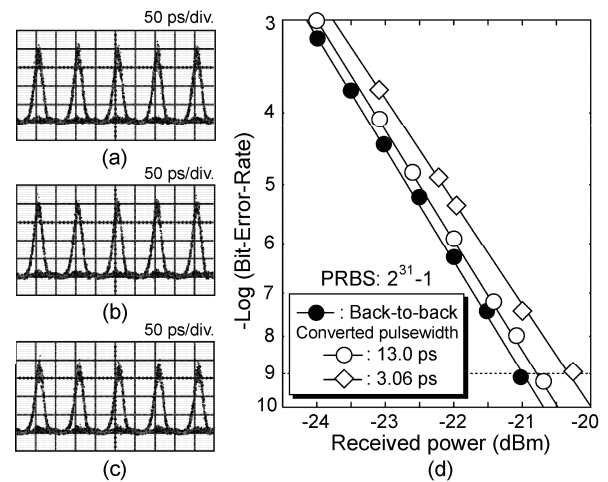


図 4：出力パルス幅 (a) 13.0 ps、(b) 9.86 ps、(c) 3.06 ps での出力信号アイパターンと (d) 符号誤り率特性。

図 3 に励起光パワーを変化させたときのパルス幅とピーク・ペデスタル比の関係を示す。励起光パワーを変化させることで、パルス幅は 13.0 ps から 3.06 ps まで自在に制御可能であることがわかる。また、ピーク・ペデスタル比も全てのパルス幅の範囲で 12 dB 以上であり、高品質なパルス波形が得られることが確認された。図 4 にパルス幅を変化させた際の出力光信号アイパターンと符号誤り率 (BER: Bit-Error-Rate) 特性を示す。アイパターンにおいては、3 つのパルス幅において、いずれも優れたアイ開口が得られることが確認された。尚、アイパターンにはパルス幅の変化が見られないが、これは測定に使用した測定器の帯域制限によ

るものである。図 4 (d) には、パルス幅変換前の元信号 (Back-to-back) と 2 つの変換信号の BER 特性を示す。測定結果から、光信号波形制御を行っても、データ信号の品質劣化はほとんど見られなかった。これにより、提案した光波形制御技術では、高い信号品質を維持したまま、光信号波形の制御を行えることを明らかにした。今後は、変換された光信号の伝送特性などの性能評価も実施し、その有効性を明確化していきたいと考えている。

### 3 多波長一括型全光信号変換

#### 3-1 研究目的

これまで、全光信号変換回路は、そのほとんどが単一チャネルの光信号を用いて、動作してきた。しかし、波長多重 (WDM: Wavelength-Division-Multiplexing) 伝送での実利用を想定すると、多波長一括型全光信号変換も重要な技術となってくる。本研究では、半導体光増幅器 (SOA: Semiconductor Optical Amplifier) 型波長変換素子での波形変換機能と非線形光ファイバ中での光ゲート動作を組み合わせた全光信号変換回路を構成し、その動作確認と特性評価を行った。

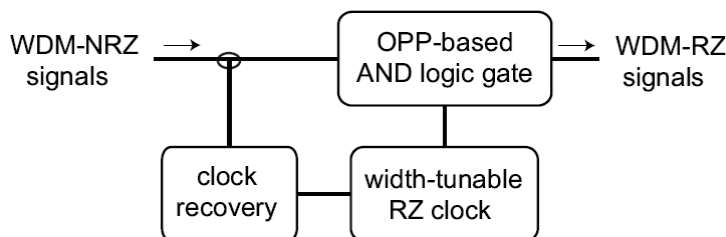


図 5 : 多波長一括型全光信号波形変換の基本構成

図 5 に多波長一括型全光信号変換回路の基本構成を示す[7]。入力光信号は、多チャネルの NRZ 信号とし、一方は、非線形光ファイバによる光ゲート回路 (OPP-based AND logic gate) に入力され、もう一方は、クロック抽出回路で得られたクロック信号を元にパルス幅 (波形) 可変型 RZ クロック再生器で RZ 信号を生成する。これにより、入力された多チャネル NRZ 信号とパルス幅可変 RZ クロック信号との光ゲートスイッチで、パルス幅可変の多波長 RZ 信号に変換することが可能である。

#### 3-2 実験構成

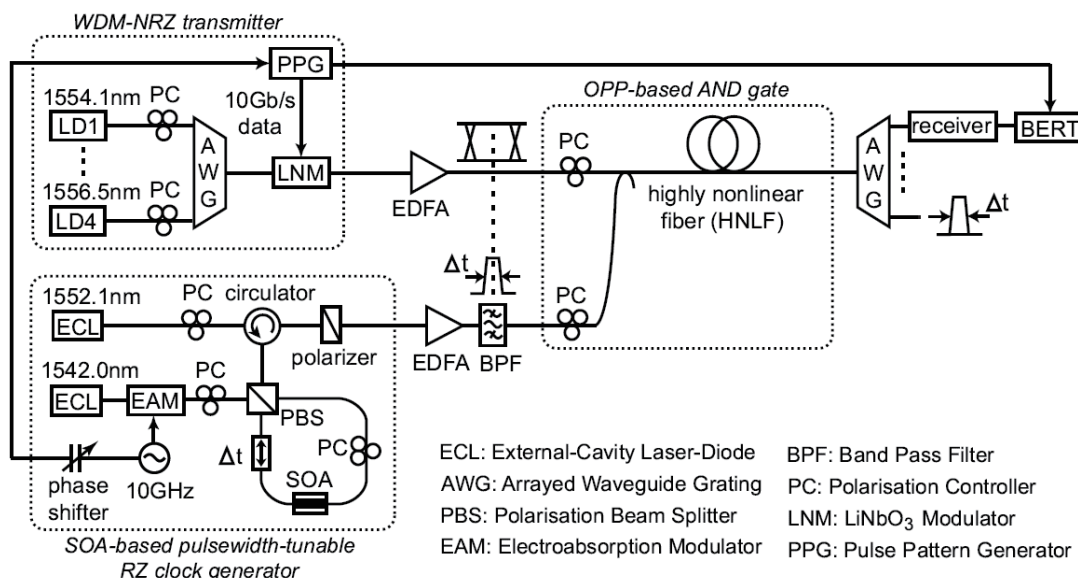


図 6 : 多波長一括型全光信号波形変換の実験構成

図 6 に実験構成を示す。多チャネル NRZ 信号は、4 チャネルでそれぞれのチャネル間隔が 100 GHz の光信号を利用した。パルス幅可変 RZ クロック生成器は、過去の我々の研究で使用したサニャック干渉系で構成さ

れた SOA 型波長変換素子を利用している [8]。それぞれの光信号は、長さ 500 m の高非線形光ファイバ (HNLF: Highly Nonlinear Fiber) に入力され、四光波混合による光ゲート動作になって、それぞれの NRZ 光信号が別の波長に変換される。変換された光信号は、アレイ導波路回折格子 (AWG: Arrayed Waveguide Grating) によって、分波され、BER 測定、および、サンプリングオシロスコープによって、変換性能の評価を行った。

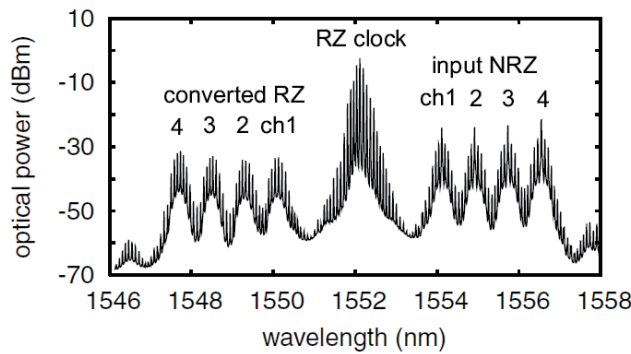


図 7: 多波長一括型全光信号波形変換でのスペクトル波形

図 7 に多波長一括型信号波形変換の HNLF 後段でのスペクトル波形を示す。入力された 4 チャンネル NRZ 信号と RZ クロック信号の四光波混合によって、短波長側に波長変換された 4 チャンネル RZ 信号のスペクトル成分が確認出来る。チャンネルの並び順は、四光波混合の原理により、反対になるものの、変換後の全ての信号において、高い OSNR (光信号対雑音比) が得られていることがわかる。

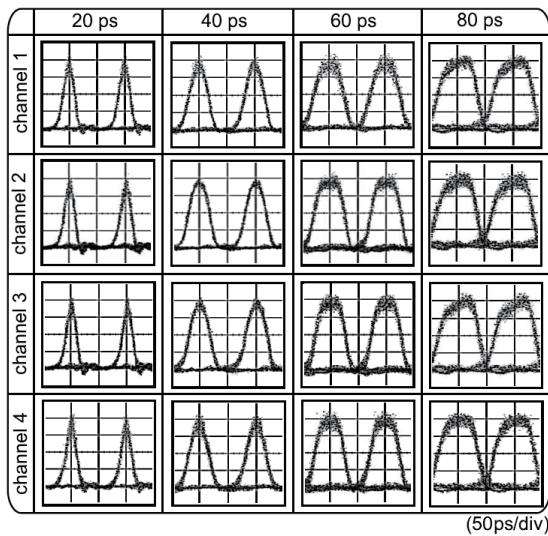


図 8: 各チャンネルでの変換信号波形

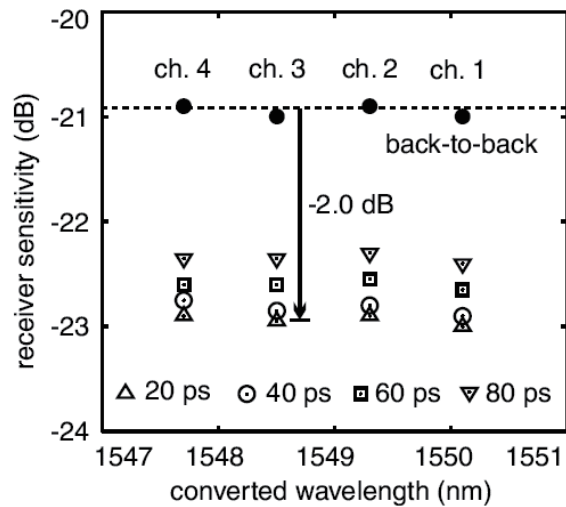


図 9: 各チャンネルでの無エラー時での受信パワー

構成した回路の変換性能を評価するため、変換信号の波形および BER 特性を測定した。図 8 に各チャンネルでの変換信号波形を示す。パルス幅可変 RZ クロック信号生成器の時間設定を 20 ps~80 ps に設定することで、出力変換信号のパルス幅も時間設定に合わせて、変化しているのが全てのチャンネルで確認された。また、図 9 には、その際の無エラー (BER=10<sup>-9</sup>) での受信パワーを示している。変換信号は、光信号パルス幅の受信パワー依存性によって、多少の変動が確認されるものの、入力した光信号と比較しても、低い受信パワー (高い信号品質) を有していることがわかった。これにより、提案した光変換回路において、フレキシブルな波形変換特性と優れた変換性能が実現可能であることを示した。

また、実際に光信号が伝送路を伝送した際に、変換性能に与える影響を評価するため、伝送距離の異なる光ファイバ伝送路を伝送した NRZ 信号と、それを波形変換した際の BER 特性を調べた。その結果を図 10 に示

す。NRZ 信号は、標準単一モード光ファイバ (SSMF : Standard Single-Mode Fiber) を最大 50 km まで伝送させた時の無エラー受信パワーの変化を示している。それ以外は、変換信号 (チャンネル 3) のパルス幅を 20 ps ~ 80 ps まで変化させた時の受信パワーを示している。いずれも、伝送距離が長くなるにつれて、受信パワーも増大しているが、NRZ 信号と変換信号との受信パワーの開きが徐々に大きくなっているのがわかる。これは、全光波形変換回路に信号再生効果があり、信号品質を改善しているためである。

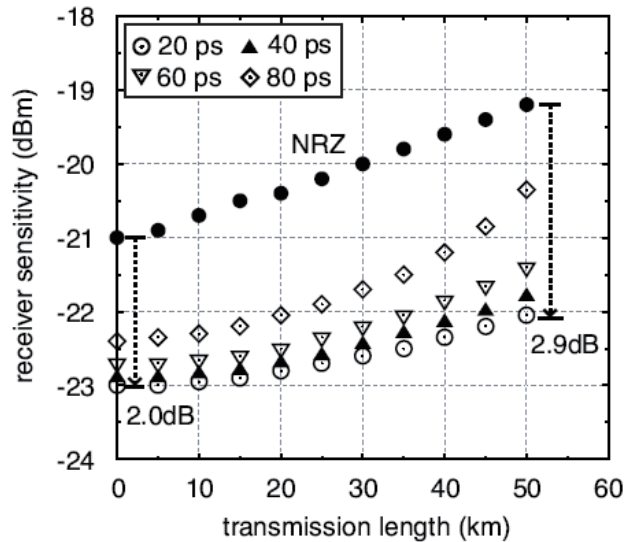


図 10 : NRZ 伝送信号とそれを用いて波形変換を行った変換信号の BER 特性

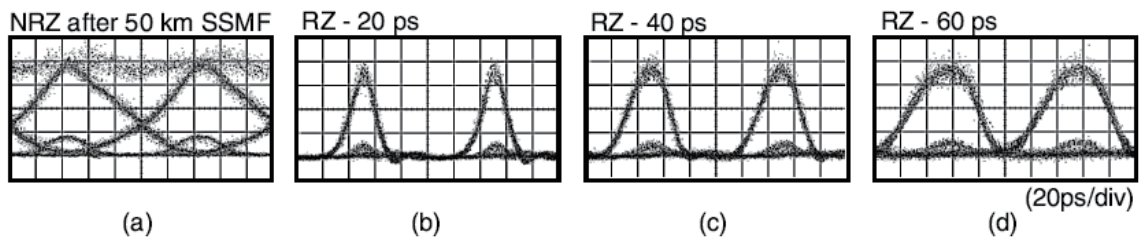


図 11 : それぞれのアイ波形

図 11 に NRZ 信号および変換信号のアイ波形を示す。50 km 伝送後の NRZ 信号は、スペースレベルの中心に波形歪み伴う、パワーレベルの増大が見られ、BER 特性を劣化させている。これに対し、この NRZ 信号を用い、波形変換を行った後の波形では、スペースレベルのパワーが抑制されており、結果として、高い BER 特性が得られたと言える。尚、このような効果は、図 11 の (b) ~ (d) のように、出力パルス幅を変化させても同様に確認され、光波形変換回路が信号品質の改善にも有効であることが示された。

#### 4 まとめ

本研究では、光信号の光波形 (パルス幅) が伝送特性に影響を与えることに着目し、電気的な信号処理を介さず、オール光で波形変換を可能にする全光信号変換回路に関する研究を行った。様々な光信号フォーマットに適用させるべく、様々な回路を構成し、その詳細な性能評価を行った。これらの実験で得られた結果は、提案した全光信号変換回路が高い変換性能を有しており、将来のフォトニックネットワーク技術として、実用性の高い光機能回路の一つであることを示したと言える。

## 【参考文献】

- [1] A. Sano, Y. Miyamoto, T. Kataoka, and K. Hagimoto, "Long-span repeaterless transmission systems with optical amplifiers using pulse width management," *J. Lightwave Technol.* **16**, 977–985 (1998).
- [2] L.-S. Yan, S. M. R. Motaghian Nezam, A. B. Sahin, J. E. McGeehan, T. Luo, Q. Yu, and Alan E. Willner, "Performance optimization of RZ data format in WDM systems using tunable pulse-width management at the transmitter," *J. Lightwave Technol.* **23**, 1063–1067 (2005).
- [3] M. Matsuura, N. Kishi, and T. Miki, "Performances of a widely pulsewidth-tunable multiwavelength pulse generator by a single SOA-based delayed interferometric switch," *Opt. Express* **13**, 10010–10021 (2005).
- [4] H. Nguyen Tan, M. Matsuura, and N. Kishi, "Transmission performance of a wavelength and NRZ-to-RZ format conversion with pulsewidth tunability by combination of SOA- and fiber-based switches," *Opt. Express* **16**, 19063–19071 (2008).
- [5] P. C. Reeves-Hall, S. A. E. Lewis, S. V. Chernikov, and J. R. Taylor, "Picosecond soliton pulse-duration-selectable source based on adiabatic compression in Raman amplifier," *Electron. Lett.* **36**, 623–624 (2000).
- [6] M. Matsuura, B. P. Samarakoon, N. Kishi, "Wavelength-shift-free adjustment of the pulsewidth in return-to-zero on-off keyed signals by means of pulse compression in distributed Raman amplification," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **21**, 572–574 (2009).
- [7] H. N. Tan, M. Matsuura, T. Katafuchi, and N. Kishi, "Multiple-channel optical signal processing with wavelength-waveform conversions, pulsewidth tunability, and signal regeneration," *Opt. Express*, **17**, 22960–22973 (2009).
- [8] M. Matsuura and N. Kishi, "All-optical wavelength and pulse-width conversions with a Sagnac interferometer semiconductor based switch," *Opt. Lett.*, **28**, 132–134 (2003).

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Wavelength-shift-free adjustment of the pulsewidth in return-to-zero on-off keyed signals by means of pulse compression in distributed Raman amplification	IEEE Photon. Technol. Lett.	2009年5月
Simultaneous WDM-channel NRZ to RZ format conversion with wide pulsewidth tunability using nonlinearities in SOA and fiber	14 <sup>th</sup> OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2009)	2009年7月
Polarization-insensitive wavelength conversion for polarization shift keying signal based on four wave mixing in highly non-linear fiber	14 <sup>th</sup> OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2009)	2009年7月
Wideband wavelength-flexible all-optical signal regeneration using gain-band tunable Raman amplification and self-phase-modulation-based spectral filtering	OSA Optics Letters	2009年8月
Widely wavelength flexible operation of all-optical regeneration in RZ-OOK signals using gain-band tunable Raman amplifier	35 <sup>th</sup> European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2009)	2009年9月
Preservation of state of polarization and polarization-insensitive wavelength conversion for polarization shift keying signal, based on four wave mixing in highly non-linear fiber	Triangle Symposium on Advanced ICT 2009 (TriSAI 2009)	2009年10月
Multiple-channel optical signal processing with wavelength-waveform conversions, pulsewidth tunability, and signal regeneration	OSA Optics Express	2009年12月
Polarization-insensitive and widely tunable wavelength conversion for polarization shift keying signal based on four wave mixing in highly non-linear fiber	OSA Optics Express	2010年2月
Channel group-delay- and polarization-insensitive wavelength conversion of multichannel polarization-shift keying signal	35 <sup>th</sup> The Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2010)	2010年3月
Optical carrier regeneration for wavelength reusable multicarrier distributed OADM network	The Conference on Lasers and Electro-Optics and The Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2010)	2010年5月
Performances of all-optical wavelength conversion by means of nonlinear polarization rotation in an SOA for WLAN systems using RoF technologies	The Conference on Lasers and Electro-Optics and The Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2010)	2010年5月
Optical carrier regeneration for carrier wavelength reuse in a multicarrier distributed WDM network	IEEE Photon. Technol. Lett.	2010年6月
Carrier wavelength reusable multicarrier distributed WDM ring network using	6 <sup>th</sup> International Conference on IP + Optical network (iPOP 2010)	2010年6月

optical drop-add-drop multiplexers		
Reduction of XGM and FWM for dynamic range improvement in SOA-based multiwavelength amplification using holding beam	15 <sup>th</sup> OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2010)	2010年7月
Wavelength-shift-free multi-channel width-tunable NRZ-to-RZ modulation format conversion using a single SOA-based Sagnac interferometer	15 <sup>th</sup> OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2010)	2010年7月
All-optical picosecond duration-tunable NRZ-to-RZ data format conversion with pedestal suppression	15 <sup>th</sup> OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2010)	2010年7月
Dual-wavelength, duration-tunable picosecond pulse generation using Raman amplifier-based compressor	15 <sup>th</sup> OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2010)	2010年7月
Wavelength tunable operation of the polarization insensitive wavelength conversion based on polarization shift keying signal	15 <sup>th</sup> OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2010)	2010年7月
Carrier wavelength reuse of multicarrier distributed OADM network using optical carrier regeneration	36 <sup>th</sup> European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2010)	2010年9月発表予定 (採択済み)
Raman amplification-based multi wavelength synchronous pulse compressor and its application to all-channel OTDM demultiplexing in a single-parametric-gate	36 <sup>th</sup> European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2010)	2010年9月発表予定 (採択済み)
Enhancement of input power dynamic range for multiwavelength amplification and optical signal processing in a semiconductor optical amplifier using holding beam effect	IEEE/OSA J. Lightwave Technol.	2010年発行予定 (採択済み)