

光領域での信号再生技術

渡 辺 茂 樹

All-Optical Regeneration Technology

Shigeki WATANABE

Recent development in all-optical regeneration technology is described and features required for optical devices are shown. Essential functions for 160 Gbit/s optical 3R regenerator with a recent experimental results and technical issues for further development are shown.

Key words: optical signal processing, optical regeneration, 3R, nonlinear optics, optical fiber

近年の情報通信量の飛躍的な増大と、将来の光ネットワーク化への要求に対応するため、より高度な情報通信技術の実現に向けた研究開発が世界的に活発化している。波長多重 (wavelength division multiplexing: WDM) や光時分割多重 (optical time division multiplexing: OTDM) といった光多重化技術を用いた高速・大容量化により、毎秒テラビット (Tbit/s) を超える規模の超大容量光通信システムが実現しつつある。今後の需要に対処するためには、さらなる高速・大容量化が必要であるが、従来技術を用いた高速・大容量化には、すでに物理的な限界がみえはじめている。こうした限界を打破しつつ、通信サービスに対する利用者ニーズの多様化への対応を可能とするより高度な光ネットワークを実現するため、光信号を電気信号に変換することなしに処理可能な、光領域の信号処理技術の実現が強く期待されている¹⁾。なかでも、伝送や分岐などにより劣化した光信号の品質を回復するための光信号再生技術は、こうした課題を解決するために不可欠な技術として、その実現が特に期待されている。

本稿では、光領域での信号再生技術の研究動向と現状技術を概観し、将来展望と課題について述べる。

1. 光信号再生技術

光信号再生技術としては、従来光信号をいったん電気信号に変換し、電氣的論理回路を用いて信号再生した後再び光信号に変換する、光・電気変換 (opto-electronic: O-E) 型とよばれるものが一般的である。しかし、O-E 型信号再生では、異なる信号速度 (ビットレート) ごとに電子回路を個別に用意する必要があるため融通性に欠け、また電子回路の動作速度の制限上、40 Gbit/s を超える超高速信号への適用には限界がある。一方、電気処理を介さず光レベルのみで処理する全光信号再生は高速性にすぐれており、将来の 160 Gbit/s など超高速光通信システムや柔軟な光ネットワークを実現するための要素技術のひとつとして期待されている。

図 1 に光 3R 再生器の基本構成を示す。光 3R 再生は、reamplification (振幅増幅)、retiming (タイミング再生)、reshaping (波形整形) の 3 つの機能からなり、品質劣化した信号光をもとの品質に復元し、伝送距離制限を打破する究極の技術として期待されている。このうち、retiming なしに reamplification と reshaping のみ行うものを、特に光 2R 再生とよんでいる。

光 3R 再生のうち reamplification は、線形の光増幅と同様な機能であり、光ファイバー通信の波長域であれば、

(株)富士通研究所ネットワークシステム研究所 (〒211-8588 川崎市中原区上小田中 4-1-1) E-mail: shigeki@flab.fujitsu.co.jp

Er³⁺-ドープ光ファイバーアンプ (EDFA) などが適用可能である。retiming 機能は、基準のクロック周波数で発生させたクリーンな光パルス列に、入力信号光のタイミングを同期させることにより得られる。入力信号光をいったん電気変換し、ここから電氣的に抽出した繰り返し周波数の信号でモードロックレーザーを発振させる方法などが一般的であるが、電気変換なしに直接光レベルでクロック再生光パルスを発生させる方法も提案されている^{2,3)}。光 retiming の応用として、再生クロック信号で、ソリトンパルス信号に同期変調をかけることによりジッター雑音を除去し、振幅雑音がジッター雑音に転化する光ソリトンの性質を用いて 3R 再生する方式⁴⁾も研究されている^{3,5)}。reshaping は、一般に光 3R 再生されるべき信号光と再生光クロックパルスを光信号の識別回路としての光ゲートに入力し、AND 動作により信号光のもつデータを再生光クロックパルスに転写することにより実現する。これまでにマッハ・ツェンダー干渉器 (MZI) 型光ゲートスイッチ^{1,6)}、非線形光ループミラー (NOLM) スイッチ^{7,8)}、電解吸収 (EA) 型変調器⁹⁾などを用いる方法が提案されている。光 2R 再生は、上記光ゲートによる reshaping 機能を用いても実現されるが、非線形媒質内での自己位相変調 (SPM) によりスペクトルを拡大し、波長シフトした成分を狭帯域の光フィルターで抽出することによる方法も提案・実証されており¹⁰⁾、すぐれた性能とともに、簡易でトランスペアレントな方法として注目される^{11,12)}。

光 3R (2R) 再生に用いる光デバイスには、信号速度やパルスの形状などに依存せずに動作するトランスペアレントな特性が不可欠である。特に、reshaping 機能は非線形光学効果を用いて実現される場合が多く、その際に用いる非線形光学効果がトランスペアレントであることに注意が必要である。上記のように、O-E 型の信号再生が 10 Gbit/s まで実現している現状では、光 3R (2R) 再生が必要となるのは、主に 40 Gbit/s 以上、特に 160 Gbit/s などの超高速システムにおいてであろう。したがって、高速性能にすぐれていることが必須条件であり、波形整形器の動作速度が信号速度に比べて十分に速いことが必要となる。特に、160 Gbit/s を超える速度やテラヘルツを超える帯域を用いた光通信に適用しようとすれば、ピコ秒以下の処理速度が必要となる。半導体光アンプ (SOA) を用いて構成した MZI (SOA-MZI) 光ゲートスイッチにおいて、2つの経路の光路長差をパルスのビット長程度に制御して高速性を高めた超高速非線形干渉器 (ultrafast-nonlinear interferometer: UNI) とよばれるタイプ^{13,14)}、あるいは光ファイバーを用いた光スイッチ¹¹⁾などが有望である。

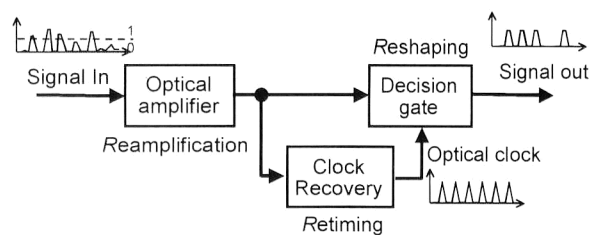


図1 全光 3R 再生器の基本構成。

以下に、主な信号再生用デバイスの特徴と課題をまとめる。

(1) 光半導体デバイス

SOA-MZI など光半導体デバイスを用いた信号再生については、非常に多くの研究が行われてきた¹⁾。半導体中の三次非線形効果には、(i) キャリヤー密度変調 (carrier density modulation) 効果、(ii) キャリヤー温度変調 (carrier heating) 効果、および (iii) スペクトルホールバーニング (spectral hole burning) 効果の3種の効果が混在し、その応答時間は (i) では約 100 ps、(ii) では 100 fs~ps、(iii) では数十 fs 程度である。この応答時間に相当して、動作帯域としては (i) が約 0.1 nm、(ii) が約 10 nm であり、(iii) では 50 nm 以上の帯域が期待できる。(ii) および (iii) による相互位相変調 (XPM) などの効果を用いると、高速・広帯域な信号再生が実現可能であるが、(i) に比べて非線形効果の効率が非常に低いため実用に至っていない。(i) の効果を有効に用い、しかも高速性を高めた UNI の研究が精力的に行われており、これまでに、320 Gbit/s の光 demultiplexing (時分割多重分離) などの発表がなされている¹⁵⁾。こうした高速光スイッチを reshaping に適用するためには、データのパターン依存性をなくするなどの改良の必要があるものの、今後の展開が注目される。

SOA などの光半導体を用いた場合の最も大きな特徴は、小型で集積化が可能という点である。コンパクトで実用的な信号再生器を実現するうえで光半導体デバイスの高速化の進展が期待される。量子ドット光アンプの利得飽和を用いる場合には、ピコ秒以下の動作速度を実現できる可能性があり¹⁶⁾、今後の発展に特に期待したい。

(2) 光ファイバー

光ファイバー内の三次非線形効果は、応答時間がフェムト秒以下と非常に高速であるため、数十 Tbit/s を超える超高速かつきわめて広帯域の信号処理が期待できる¹⁷⁾。これまでに、分散フラットファイバーで構成した NOLM を用いた 640 Gbit/s 信号の光 demultiplexing 実験の報告¹⁸⁾などがなされている。光ファイバー内で高速光パルス間の非線形相互作用を有効に実現するためには、分散管理が特

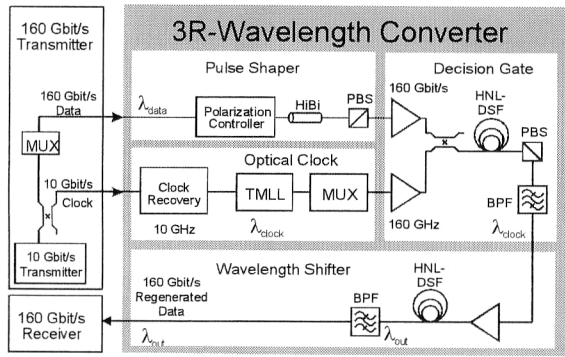


図2 160 Gbit/s 3R 再生波長変換実験構成.

に重要である。四光波混合などの光波ミキシングを用いる場合に位相整合をとり、光スイッチとして動作させる際の光パルス間のすれ違い (walk-off) を十分小さく抑えるためである。分散値を小さく抑えた分散シフトファイバー (DSF) が用いられるが、その場合、ファイバーのゼロ分散波長 λ_0 の高精度管理が特に重要となる。

長さ L 、損失 α のファイバー内での非線形位相シフト ϕ_{NL} は、次式で近似可能である¹⁷⁾。

$$\phi_{NL} = \gamma P l \quad (1)$$

ここに、 P は入力信号光パワー、 $l = (1 - e^{-\alpha L}) / \alpha$ は非線形相互作用長を表し、

$$\gamma = \frac{\omega n_2}{c A_{eff}} \quad (2)$$

は三次非線形定数を表す [単位は $W^{-1} km^{-1}$]。ここに、 n_2 および A_{eff} は、ファイバー内の非線形屈折率および有効コア断面積である。式(1)より、例えば長さ 300 m のファイバーを用いて π 位相シフトを実現するには、 $\gamma \sim 10/P$ 程度の非線形効果が必要であることがわかる。 $P \sim 100$ mW とすれば、 $100 W^{-1} km^{-1}$ 程度の γ 値をもつファイバーの開発がひとつの目標となる。一方、式(2)より明らかのように、基本的にはモードフィールド径を小さくしてパワー密度を向上させるとともに、コアの n_2 を増大すれば非線形効果を向上させることができる。これらの効果は、高非線形ファイバー (highly-nonlinear fiber: HNLF) において確認されており (コアに GeO_2 を高濃度ドープ)、 $20 W^{-1} km^{-1}$ を超える γ 値が実現している^{19,20)}。この値は、通常の DSF に比べ 10 倍程度大きな値であり、HNLF においては、1~2 km 程度の長さを用いて十分に大きな位相シフトを実現できる。非線形効果の発生効率をさらに大きくするために、カルコゲナイドガラスファイバーを用いる方法が提案され、通常のシリカファイバーに比べ 30 倍程度大きな n_2 が可能であることが実証されている²¹⁾。また最近では、フォトニック結晶ファイバー (PCF)、

特に Holey ファイバーを用いた、 $500 W^{-1} km^{-1}$ を超えるようなきわめて大きな γ 値の報告例もある²²⁾。このように大きな非線形性を有するファイバーを用いれば、数十 m 程度の短い長さでも十分な信号処理を実現できる可能性がある。所要長を短くできれば、ゼロ分散波長を長手方向に管理するうえで有利であることから、こうした非線形効果の大きなファイバーの進展が、実用化に向けて特に期待される。

2. 160 Gbit/s-3R 再生波長変換実験

光 3R 再生の波形整形器として用いる光ゲートにおいては、再生された光クロックパルスデータをデータ信号でスイッチする必要があるため、超高速でトランスペアレントな特性が要求される。光半導体を用いたものでは、これまで 80 Gbit/s²³⁾ および 84 Gbit/s¹³⁾ での実験が報告されている。

160 Gbit/s 信号の光 3R 再生を実現するためには、さらに高速の光スイッチが必要である。

図 2 に、光ファイバーを用いて構成した 160 Gbit/s の光 3R 再生波長変換実験の構成を示す²⁴⁾。160 Gbit/s 用送信機²⁵⁾、3R 再生器、受信機²⁵⁾ から構成される。送信機において、波長 1554 nm で単一偏波の 160 Gbit/s データ信号光 (パルス半値全幅 1.3 ps) を発生した。光 3R 再生器は、パルス整形器 (pulse shaper)、光クロック再生、識別再生用の光ゲートおよび波長シフターから構成される。

160 Gbit/s 信号のように、1~2 ps 程度の短パルスで構成される信号の 3R 再生においては、波形整形用光ゲートのスイッチング時間間隔 (window とよぶ) を、パルス間隔 (6.25 ps) に比べて十分に狭くする必要がある。このため、信号光パルスにジッター雑音がある場合には、光ゲートのスイッチングにより、ジッター雑音が振幅雑音に変換されてしまい問題となる。これを回避するためのひとつの方法は、光ゲートの window 形状を矩形に近いものにするのである。そこで、本光 3R 再生器においては、パルス整形器を用いて入力信号パルスの形状をピークが平坦な形に変換した。パルス整形器は自動偏波制御器、高複屈折性 (HiBi) ファイバーおよび偏光ビームスプリッター (PBS) で構成され、160 Gbit/s 信号光の偏波状態を、HiBi ファイバーの 2 つの偏波主軸方向に等パワーに分配するように設定してある。用いた HiBi ファイバー (長さ 0.5 m) の 2 つの偏波主軸方向の群速度遅延は 0.85 ps であり、PBS による偏波再合成後に図 3 に示した形状の光パルスを得た。ピークが平坦な形状 (半値全幅は 2.9 ps) で、前後両エッジは入力パルスの形状をそのまま反映したものとなっている。160 GHz のクロックパルスは、10 GHz クロック光を抽出後、

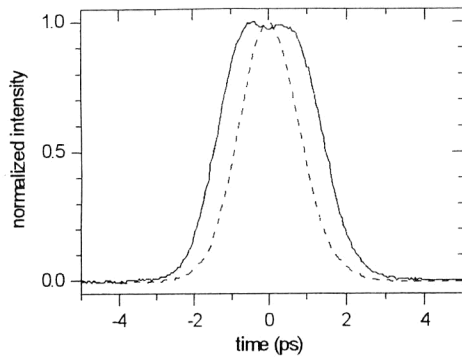


図3 クロスコリレーターで観測したパルス整形器への入力パルス形状 (---) および出力パルス形状 (—). クロスコリレーションは 650 fs の sech² 型プローブパルスを用いて観測.

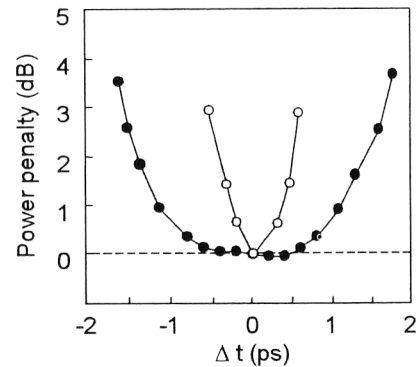


図4 データパルスとクロックパルスの遅延時間 Δt に対するパワーペナルティ (@BER=10⁻⁹). (●) パルス整形あり, (○) パルス整形なし.

160 GHz に OTDM して生成した (波長 1537 nm, パルス半値全幅 1.8 ps)²⁶⁾. 平坦化した 160 Gbit/s 信号を光ゲートである光カススイッチに入力し, 160 GHz の再生光クロック信号をスイッチした. 光カススイッチは, 1.6 km の HNLF ($\gamma=20 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$) と PBS により構成し, 信号光により HNLF 内で発生する相互位相変調 (XPM) による偏波回転により再生光クロックパルスをスイッチした. このとき, 160 Gbit/s 信号光の HNLF への平均入力パワーは +18 dBm であった.

波長シフターは, 3R 再生信号光の波長を任意の値にシフトするためのものである. 前段の光ゲートで波長がシフトするケースが多いので, 3R 再生信号光の波長を入力信号光のそれに一致させるためにも必要な機能である. 波長シフターには, 完全なトランスペアレント特性が必要であり, しかも簡易な構成であることが望ましい. 実験では, 長さ 850 m の HNLF に 3R 再生光を入力し, HNLF 内で発生する自己位相変調 (SPM) により拡大したスペクトルから, 帯域光フィルターを用いて波長シフトした成分を抽出する方法を用いた. このスペクトル拡大あるいはスーパーコンティニューム (SC) を用いた波長シフトにおいては, 2R 再生機能も同時に付加することが可能である¹⁰⁾.

図4に, パルス整形によるジッター抑圧効果を示す. 光カススイッチにデータパルスとクロックパルスのタイミングを Δt だけずらした状態で入力し, スwitchされた信号光のパワー・ペナルティ [品質劣化による受信感度劣化; 符号誤り率 (BER)=10⁻⁹における] を測定した. パルス整形を用いない場合に比べてタイミングずれに対する余裕が大幅に拡大し, 0.5 dB のパワー・ペナルティに対するマージンが約 1.7 ps となった. この結果は, 本パルス整形が光 3R 再生に必要なジッター雑音抑圧機能を実現する有効な手段であることを示している. 図5に符号誤り

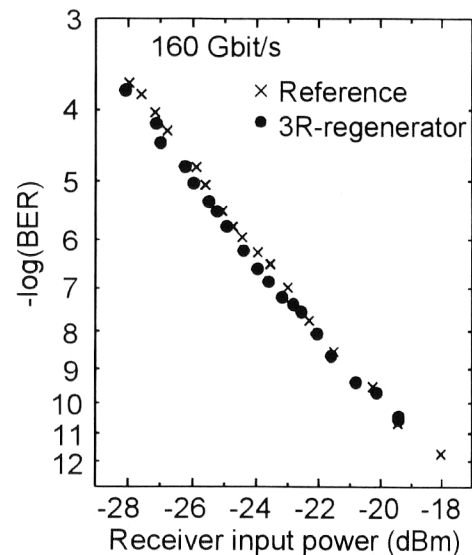


図5 3R 再生波長変換器の符号誤り率特性. (x) 基準, (●) 3R 再生波長変換器出力.

率特性を示す. 160 Gbit/s の光 3R 再生後においてもエラーフリーの良好な特性を得た. 受信感度劣化も観測されず, 160 Gbit/s 信号に対する光 3R 再生器としての機能をほぼ実現した.

3. 今後の展望と課題

光信号再生は, 将来のフォトニックネットワークを実現するための重要な要素技術である. 光レベルでの自由な信号再生が可能になれば, よりフレキシブルなネットワークを実現することが可能となる. 最近, 各種の EDFA やラマンアンプを用いた伝送帯域の拡大に向けた研究が活発である^{27,28)}. 遠からず 100 nm を超える広帯域のフォトニックネットワークが実現し, Tbit/s を超えるような情報を自由にやりとりすることができるようになるであろう. こうした

光ネットワークが実現すると、各ネットワーク間の情報をやりとりする光ノードの機能向上が重要となり、それに伴いトランスペアレントな信号再生器が必要となる。光ノード内のマネージメントを簡易化するためには、ノード内で処理する信号のビットレートをできるだけ高くするのが有利であるため^{11,29)}、160 Gbit/sあるいはそれ以上の超高速信号処理技術の必要性も高まっていくであろう。光ノード内で信号処理後、別のネットワークへ送り出す際には、十分高い品質を保持する必要があるため、超高速の光3R再生が不可欠となる。第2章に示したように、160 Gbit/sのような超高速信号に対して十分な光3R再生を行うためには、特別なデバイスとシステムの検討が必要となる。光半導体デバイスにおいては、パターン依存性を改善し、トランスペアレントな波形整形を実現可能な素子の開発が必要である。量子ドット光アンプの発展に期待したい。光ファイバーの場合には、要求される高精度の分散管理を実現するため、まず非線形光学効果の発生効率を現状よりも1桁以上向上させ、100 m程度の長さで処理可能なレベルのファイバーを開発する必要がある。高非線形ファイバー(HNLF)やフォトニック結晶ファイバー(PCF)/Holeyファイバーなどで行われている非線形光学効果向上のための研究を総合し、真に実用的な新しいファイバーが開発されることを特に期待したい。

光領域での信号再生の実現が光通信技術のブレイクスルーとなり、利用者にとって真に使いやすい光ネットワークの実現と、ひいてはまったく新しい社会と文化の創造に寄与することを希望する。

光レベルでの信号再生技術の現状を概観し、実現に不可欠である光デバイスの所要特性と可能性を述べた。また、今後必要となるであろう160 Gbit/s信号の光3R再生について、要素機能と最新の実験結果を示すとともに、今後の動向と課題についてまとめた。

本稿に関連する研究に対する協力と有益な議論いただいた富士通研究所の二見研究員、Heinrich-Hertz研究所(HHI)のWeber教授、Ludwig博士および同研究室のメンバーに感謝します。

文 献

- 1) K. E. Stubkjaer: "Semiconductor optical amplifier-based all-optical gates for high-speed optical processing," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (2000) 1428-1435.
- 2) H. Yokoyama, H. Kurita, T. Shimizu, I. Ogura, Y. Hashimoto, R. Kuribayashi, M. Shirane and H. Yamada: "All-optical clock extraction and signal regeneration with mode-locked laser diodes," *7th International Workshop on Femtosecond Technology (FST 2000)*, Technical digest (Tsukuba, 2000) p. 71.
- 3) B. Sartorius, C. Bornholdt, S. Bauer, M. Moehrle, P. Brindel and O. Leclerc: "System application of 40 GHz all-optical clock in a 40 Gbit/s optical 3R regenerator," *Optical Fiber Communication Conference (OFC 2000)*, Paper PD11 (Baltimore, USA, 2000).
- 4) M. Nakazawa, E. Yamada, H. Kubota and K. Suzuki: "10 Gbit/s soliton data transmission over million kilometers," *Electron. Lett.*, **27** (1991) 1270-1272.
- 5) S. Bigo, O. Leclerc and E. Desurvire: "All-optical fiber signal processing and regeneration for Soliton communications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **3** (1997) 1208-1223.
- 6) D. Wolfson, A. Kloch, T. Fjelde, C. Janz, B. Dagens and M. Renaud: "40-Gb/s all-optical wavelength conversion, regeneration, and demultiplexing in a SOA-based all-active Mach-Zehnder interferometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12** (2000) 332-334.
- 7) M. Jinno: "Effects of group velocity dispersion on self/cross phase modulation in a nonlinear Sagnac interferometer switch," *J. Lightwave Technol.*, **10** (1992) 1167-1178.
- 8) J. K. Lucek and K. Smith: "All-optical signal regenerator," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 1226-1228.
- 9) T. Otani, T. Miyazaki and S. Yamamoto: "Optical 3R regenerator using wavelength converters based on electro-absorption modulator for all-optical network applications," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12** (2000) 431-433.
- 10) P. V. Mamyshev: "All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect," *European Conference on Optical Communications (ECOC '98)* (Madrid, Spain, 1998) pp. 475-476.
- 11) S. Watanabe and F. Futami: "All-optical wavelength conversion using ultra-fast nonlinearities in optical fiber," *IEICE Trans. Electron.*, **E85-C** (2002) 889-895.
- 12) G. Raybon, Y. Su, J. Leuthold, R.-J. Essiambre, T. Her, C. Joergensen, P. Steinvurzel, K. Dreyer and K. Feder: "40 Gbit/s pseudo-linear transmission over one million kilometers," *Optical Fiber Communication Conference (OFC 2002)*, FD10 (Anaheim, USA, 2002).
- 13) Y. Ueno, S. Nakamura and K. Tajima: "Penalty-free error-free all-optical data pulse regeneration at 84 Gbps with Symmetric-Mach-Zehnder-type regenerator," *Optical Fiber Communication Conference (OFC 2001)*, MG5-1 (Anaheim, USA, 2001).
- 14) K. L. Hall and K. A. Rauschenbach: "100-Gbit/s bitwise logic," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 1271-1273.
- 15) S. Nakamura, Y. Ueno and K. Tajima: "Error-free all-optical demultiplexing at 336 Gb/s with a hybrid-integrated symmetric-Mach-Zehnder switch," *Optical Fiber Communication Conference (OFC 2002)*, FD3 (Anaheim, USA, 2002).
- 16) T. Akiyama, O. Wada, H. Kuwatsuka, T. Simoyama, Y. Nakata, K. Mukai, M. Sugawara and H. Ishikawa: "Nonlinear processes responsible for nondegenerate four-wave mixing in quantum-dot optical amplifiers," *Appl. Phys. Lett.*, **77** (2000) 1753-1755.
- 17) G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, San Diego, CA, 1995).

- 18) M. Nakazawa, T. Yamamoto and K. R. Tamura: "1.28 Tbit/s-70 km OTDM transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator," *Electron. Lett.*, **36** (2000) 2027-2029.
- 19) M. Onishi, T. Okuno, T. Kashiwada, S. Ishikawa, N. Akasaka and M. Nishimura: "Highly nonlinear dispersion shifted fiber and its application to broadband wavelength converter," *Integrated Optics and Optical Fiber Communications/European Conference on Optical Communications (IOOC/ECOC '97)*, TU2C (Edinburgh, UK, 1997) pp. 115-118
- 20) S. Watanabe, S. Takeda, G. Ishikawa, H. Ooi, J. G. Nielsen and C. Sonne: "Simultaneous wavelength conversion and optical phase conjugation of 200 Gb/s (5×40 Gb/s) WDM signal using a highly nonlinear fiber four-wave mixer," *11th Integrated Optics and Optical Fiber Communications/23rd European Conference on Optical Communications (IOOC/ECOC '97)*, TH3A (Edinburgh, UK, 1997) pp. 1-4.
- 21) M. Asobe, H. Kobayashi, H. Itoh and T. Kanamori: "Laser-diode-driven ultrafast all-optical switching by using highly nonlinear chalcogenide glass fiber," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 1056-1058.
- 22) T. M. Monro, K. M. Kiang, J. H. Lee, K. Frampton, Z. Yusoff, R. Moore, J. Tucknott, D. W. Hewak, H. N. Rutt and D. J. Richardson: "High nonlinearity extruded single-mode holey optical fibers," *Optical Fiber Communication Conference (OFC 2002)*, FA1 (Anaheim, USA, 2002).
- 23) A. E. Kelly, I. D. Phillips, R. J. Manning, A. D. Ellis, D. Nasset, D. G. Moodie and R. Kashyap: "80 Gbit/s all-optical regenerative wavelength conversion using semiconductor optical amplifier based interferometer," *Electron. Lett.*, **35** (1999) 1477-1478.
- 24) R. Ludwig, C. Schubert, S. Watanabe, F. Futami, C. Schmidt, J. Berger, B. Boerner, S. Ferber and H. G. Weber: "160 Gbit/s 3R-regenerating wavelength converter," *7th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2002)*, PD-1-3 (Yokohama, 2002).
- 25) U. Feiste, R. Ludwig, C. Schubert, J. Berger, C. Schmidt, H. G. Weber, B. Schmauss, A. Munk, B. Buchold, D. Briggmann, F. Kueppers and F. Rumpf: "160 Gbit/s transmission over 116 km field-installed fibre using 160 Gbit/s OTDM and 40 Gbit/s ETDM," *Electron. Lett.*, **37** (2001) 443-445.
- 26) T. Yamamoto, L. K. Oxenlowe, C. Schmidt, C. Schubert, E. Hilliger, U. Feiste, J. Berger, R. Ludwig and H. G. Weber: "Clock recovery from 160 Gbit/s data signals using phase-locked loop with interferometric optical switch based on semiconductor optical amplifier," *Electron. Lett.*, **37** (2001) 509-510.
- 27) M. Yamada, A. Mori, K. Kobayashi, H. Ono, T. Kanamori, K. Oikawa, Y. Nishida and Y. Ohishi: "Gain-flattened telluride-based EDFA with a flat amplification bandwidth of 76 nm," *Optical Fiber Communication Conference (OFC '98)*, PD7 (San Jose, USA, 1998).
- 28) H. Takara, H. Masuda, K. Mori, K. Sato, Y. Inoue, T. Ohara, A. Mori, M. Kohtoku, Y. Miyamoto, T. Morioka and S. Kawanishi: "Ultra-wideband tellurite/silica fiber Raman amplifier and supercontinuum lightwave source for 124-nm seamless bandwidth DWDM transmission," *Optical Fiber Communication Conference (OFC 2002)*, FB1 (Anaheim, USA, 2002).
- 29) S. Watanabe and F. Futami: "All-optical signal processing using highly-nonlinear optical fibers," *IEICE Trans. Commun.*, **E84-B** (2001) 1179-1189.

(2002年9月6日受理)