

■5 群(通信・放送)- 3 編(光伝送技術)

---

## 6 章 超高速光信号処理

**【本章の構成】**

6-1 ETDM 伝送

6-2 OTDM 伝送

6-3 超高速光信号処理

## ■5 群-3 編-6 章

### 6-1 ETDM 伝送

(執筆者：吉田 英二) [2010年4月 受領]

ETDM (Electrical Time Division Multiplexing) 伝送は、複数の低速電気信号を時間領域で多重し高速化する伝送方式であり、実用化されている光伝送方式で広く用いられている。現在の商用装置では 1 波長当たり 43 Gbit/s にまで高速化されており、1 波長当たりの速度を 100 Gbit/s から数 100 Gbit/s までに高速化する技術が活発に研究されている。光領域での多重・分離を行わず、電気領域での多重・分離をベースに高速化を図る伝送方式は、多重変調技術を含め ETDM 伝送方式とみなすことができる。

近年、通信トラフィックは増大を続け年率 50%程度での成長で推移している。アクセス系の帯域は、音声を主体とした 64 kbit/s の電話回線から近年は映像サービスを扱える 10 Mbit/s 以上に変化しつつある。また LAN 系では、次世代イーサネット技術として 40 GbE、及び、100 GbE の標準化が進展している。本節ではこのような背景を踏まえ、主に ETDM をベースにした(光領域での多重・分離を行わない) 100 Gbit/s 以上の高速化技術に関して説明する。

#### 6-1-1 技術動向

ETDM 技術を基盤に、光ファイバ 1 本での伝送容量が年とともにどのように変化してきたかを図 6・1 に示す<sup>1)</sup>。光伝送システムでは 1 波長当たりの伝送速度(すなわち伝送容量)を増加させることが重要であり、1980 年から 1990 年代後半にかけては ETDM 技術そのものの発展により高速化が図られ、1 波長当たり 10 Gbit/s の光伝送システムが実用化された。その後、光増幅を用いた波長多重技術により、光ファイバ 1 本で伝送できる容量は「1 波長当たりの容量」×「波長数」となり飛躍的に向上した。したがって、大容量化のポイントは ETDM 技術を基盤に 1 波長当たりの伝送速度(伝送容量)をどこまで高めるかという点と、波長数をいかに増やすかという点に集約される。現在では 1 波長当たりの伝送速度 43 Gbit/s、光ファイバ 1 本当たりの容量 1.6 Tbit/s (40 G/s×40 波長) の大容量伝送システムが実用化されている。

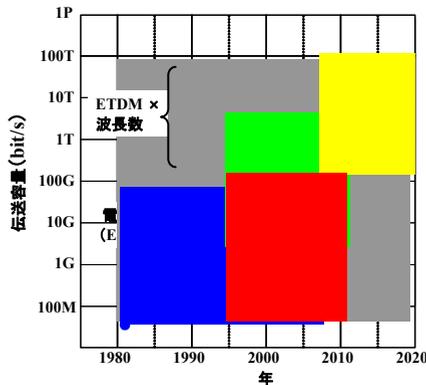


図 6・1 ETDM 技術を基盤にした伝送容量の拡大

図 6・1 に示すように従来の高速化は光トランスポート側（WAN 側）が牽引してきたが、100G に関しては LAN 側が先行するかたちになり、100GbE の標準化に関しては IEEE 802.3ba にて 2010 年 6 月に完了する予定である。これに歩調を合わせて、ITU-T では 100GbE をクライアント信号として収容し、長距離伝送可能な光トランスポートネットワーク (OTN) の 100G インタフェース OTU4 を標準化した。OTN では管理用信号、誤り訂正符号 (FEC) などのオーバーヘッドを付加するため、伝送速度は 112Gbit/s になる。100GbE の光信号はパラレル伝送を行うが、OTN では大容量化を実現するためのシリアル伝送が重要となる。この 100G シリアル伝送を実現するのに重要な役割を果たすのがデジタルコヒーレント技術であり、光伝送における高速化・大容量化を実現するブレイクスルー技術として期待されている。

### 6-1-2 イーサネット技術

100 GbE に関しては 4 種類のインタフェースが規格化される予定である<sup>2)</sup>。100G 信号を複数のビットストリームに分けてマルチレーン伝送することが特徴であり、送信側にてレーンマーカーを挿入し、受信側で伝播遅延差 (スキュー) の調整とレーン識別を行い復元する。シングルモードファイバを用いた標準インタフェースとしては、表 6・1 に示すように 10 km を対象にした 100GBASE-LR4 と 40 km を対象にした 100GBASE-ER4 がある。両者とも 1.3  $\mu$ m 帯の波長 4 波を用いて 800 GHz 間隔で波長多重する。

表 6・1 100GbE 標準インタフェース

| 規格            | 特徴   | 媒体           | 距離   |
|---------------|--|--------------|------|
| 100GBASE-CR10 | 10×10.3125Gbit/s                                 | 多心同軸ケーブル     | 7m   |
| 100GBASE-SR10 | 10×10.3125Gbit/s<br>0.8 $\mu$ m 帯, リボンファイバ       | マルチモード光ファイバ  | 100m |
| 100GBASE-LR4  | 4×25.78125Gbit/s<br>1.3 $\mu$ m 帯, 800GHz 間隔 WDM | シングルモード光ファイバ | 10km |
| 100GBASE-ER4  | 4×25.78125Gbit/s<br>1.3 $\mu$ m 帯, 800GHz 間隔 WDM | シングルモード光ファイバ | 40km |

### 6-1-3 高速化技術

#### (1) 伝送システムにおける課題

1 波長当たりの高速化 (100G 化) にあつて主に考慮すべき点は、① 電気部品の高速度性、② 受信感度、③ 波長分散耐力、④ 偏波モード分散 (PMD) 耐力、⑤ 光スペクトル帯域などである。① 電気部品の高速度性に関しては、10 Gbit/s における最も一般的な変調方式は NRZ 変調 (2 値のオンオフキーン) であるが、この延長線上で高速化を実現しようとすると、送受信部を構成する変調器、電気多重化回路、ドライバアンプ、電気光変換部、電気分離化回路などの動作速度を 100G にまで向上させる取組みが必要である。例えば、部品レベルでは 80 Gbit/s 以上で動作する電気分離回路なども報告されている<sup>3)</sup>。③ 受信感度に関しては、伝送速度の増加に伴い最低受信感度、すなわち、光信号対雑音比 (OSNR) 耐力が低下する。10.7 Gbit/s との比較において、43 Gbit/s では 4 dB、112 Gbit/s では 10 dB 程度の速度の違いが

あり、これが OSNR 耐力の低下に反映される。③ 波長分散耐力、と④ 偏波モード分散 (PMD) 耐力に関しては、伝送速度が高速化するにつれ、信号のタイムスロットが短くなく耐力が減少することが課題である。波長分散耐力は伝送速度の 2 乗に反比例し、PMD 耐力はラインレートに反比例して小さくなる。⑤ 光スペクトル帯域に関しては、WDM 伝送において容量を増やすためには周波数利用効率を増加させる必要があり、そのためには光スペクトル帯域が狭くする必要がある。例えば NRZ 信号 (変調速度 B) の場合、スペクトル帯域は約 2B になり、変調速度の高速化が光スペクトル帯域の増加につながる。

## (2) 変調方式 (送受信技術)

上記の課題を克服し高速化を実現するための変調方式として種々の方式がある。本節では① NRZ (OOK) 方式、② DQPSK (差動 4 値位相変調) 方式、③ 偏波多重 QPSK 方式、④ 光 OFDM (直交周波数多重) 方式、⑤ QAM (直交振幅変調) 方式について説明する。① NRZ 方式に関しては、100G 変調時に帯域が不十分になる点を残留側帯波フィルタリングにより波形整形を行う方法などがあるが、前述したように課題が多く 40G でも長距離伝送には適していない。③ DQPSK 方式は、主に 40G で実用化されている。DQPSK 方式は四つの位相を用いビット間の位相差を情報として伝送する方式で、1 信号に対し 2 ビット情報が送れる。例えば伝送速度 43 Gbit/s の場合は、シンボルレートは 21.5GBaud になり、信号光のタイムスロットは 2 倍になる。そのため、電気速度の負荷は低減し、波長分散耐力と PMD 耐力は向上する。また遅延干渉計を用いて差動送受信することにより、NRZ に比べ受信感度は 3dB 程度向上し、さらに RZ 化することにより 1 dB 程度の改善が図れる。③の偏波多重 QPSK 方式は QPSK 方式に偏波多重技術を組み合わせた方式である。偏波多重技術は、光ファイバを伝搬する二つの直交した偏波 (x 偏波, y 偏波) のそれぞれに情報を載せる多重方式であり、単一偏波を用いる方式に比べ 2 倍の情報量が送れる。本方式はシンボルレートを 1/4 に低減でき、112 Gbit/s に対しては 28GBaud となる。偏波多重では高速な偏波変動 (kHz 以上) に追従して偏波分離を行う必要があり、その実現性が課題となっていた。最近ではデジタルコヒーレント技術と組み合わせてデジタル信号処理にて、偏波分離だけでなく波長分散及び PMD による波形歪みを電氣的に補償することができるため、最も有力な方式となっている。差動受光素子を用いてコヒーレント受信することにより、NRZ に比べ受信感度は 3 dB 以上向上する。100G に関しては現在、受信部で使用するデジタル信号処理部をリアルタイムにて動作させる取組みが進められている。112 Gbit/s における偏波多重 QPSK 方式と NRZ 方式との比較を表 6・2 に示す。④ OFDM 方式はサブキャリアを用いて伝送する方式である。無線技術を光伝送に適用し、送信側でフーリエ変換を用い多数のサブキャリアを発生させシンボルレートを大きく下げることにより、分散補償をなくすことが可能になる。また、光領域でサブキャリアを発生させ、ガードインターバル信号なしで OFDM 伝送を行う方法もある。⑤ QAM 方式は二つの直交した (位相関係が  $90^\circ$  になっている) 信号光の振幅、及び、位相の両方に情報を載せる変調方式であり、16QAM は一度に 4 ビット分の情報、64QAM は一度に 6 ビット分の情報が送れるため、100 Gbit/s より高速のポスト 100 Gbit/s を実現する技術の一つと期待されている。多値数が上がるにつれ受信感度は低下するが、周波数利用効率の向上には有利である。最近では偏波多重 16QAM 方式により、1 波長当たり 171 Gbit/s まで高速化した光信号を用いた 69 Tbit/s の超大容量伝送実験が実現されている<sup>4)</sup>。また、64QAM 方式に

よる 1 波長当たり 240 Gbit/s 信号なども報告されている<sup>5)</sup>。

**表 6・2** 112 Gbit/s における NRZ 方式と偏波多重 QPSK+デジタルコヒーレント方式の比較

| 項目       | NRZ (2 値 OOK)         | 偏波多重 QPSK+デジタルコヒーレント      |
|----------|-----------------------|---------------------------|
| シンボルレート  | 112GBaud              | 28GBaud (電気速度の負荷低減)       |
| OSNR 耐力  | 10G NRZ に比べ 10dB 程度低下 | コヒーレント受信により改善             |
| 波長分散耐力   | 10G NRZ に比べ 20dB 程度低下 | デジタル信号処理により 10G NRZ と同等以上 |
| PMD 耐力   | 10G NRZ に比べ 10dB 程度低下 | デジタル信号処理により 10G NRZ と同等以上 |
| 光スペクトル帯域 | 224GHz 程度             | 56GHz 程度 (周波数利用効率の向上)     |

■参考文献

- 1) 神野正彦, 木村秀明, 日比野善典, 上原一浩, 久々津直哉, 伊藤文彦, 松岡伸治: “超高速大容量ネットワークの実現に向けて”, NTT 技術ジャーナル, **20**, 11, pp.54-59 (2008)
- 2) 大原拓也, 石田修: “OTN の標準化動向”, NTT 技術ジャーナル, **21**, 1, pp.71-74 (2009)
- 3) J. H. Sinsky and P. J. Winzer: “100-Gb/s Optical Communications”, IEEE microwave magazine, **10**, 2, pp.47-57 (2009)
- 4) A. Sano, H. Masuda, T. Kobayashi, M. Fujiwara, K. Horikoshi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, M. Matsui, M. Mizoguchi, H. Yamazaki, Y. Sakamaki and H. Ishii: “69.1-Tb/s (432 x 171-Gb/s) C- and Extended L-Band Transmission over 240 km Using PDM-16-QAM Modulation and Digital Coherent Detection”, OFC/NFOEC2010, PDPB7 (2010)
- 5) A. Sano, T. Kobayashi, K. Ishihara, H. Masuda, S. Yamamoto, K. Mori, E. Yamazaki, E. Yoshida, Y. Miyamoto, T. Yamada, and H. Yamazaki: “240-Gb/s Polarization-Multiplexed 64-QAM Modulation and Blind Detection Using PLC-LN Hybrid Integrated Modulator and Digital Coherent Receiver”, ECOC2009, PD2.2 (2009)

## ■5群-3編-6章

### 6-2 OTDM 伝送

(執筆: 村井 仁) [2010年5月 受領]

OTDM (Optical Time Division Multiplexing, 光時分割多重) 方式は、同一波長を有する複数の光データ系列を時間領域で多重・分離する技術であり、原理的に電子デバイスの処理速度に制限されることなく、多重数に応じた単一波長・超高速信号を生成することが可能となる。OTDM 信号発生では、多重チャンネルが互いに干渉しないようにするための超短光パルス発生技術、多重チャンネルを個別にデータ変調しビット多重を行う光 MUX 技術が重要な要素となる。受信に際しては、OTDM 信号に同期したクロックを再生するクロック抽出技術、多重したチャンネルをクロストークなく取り出す光 DEMUX 技術が必要となる。本節では、これらの要素技術の概要とともに OTDM 伝送方式の現状について概観する。

#### 6-2-1 OTDM トランシーバ

OTDM 送受信系は、図 6-2 に示すように、送信部の短パルス光源、光 MUX 回路(a)、及び受信部のクロック抽出器、光 DEMUX 回路(b)により構成される。

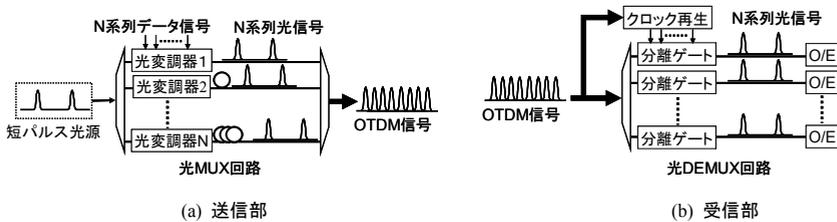


図 6-2 OTDM 方式の送受信部構成

#### (1) 光パルス光源

短パルス光源としては、低ジッタであることが重要である。ジッタが白色ガウス分布に従うとすれば、許容ジッタ (RMS 値) :  $\sigma$  の概算値は受信時の光 DEMUX ゲート幅 :  $T_w$  を用いて、 $\sigma < T_w / (2Q)$  となる<sup>1)</sup>。Q は、信号の Q ファクタに相当し、例えば、 $Q > 12$ 、 $T_w = 5$  で規定すると、0.2ps 以下のジッタが要求される。また、パルス幅 (半値全幅) は、OTDM 信号の単位時間スロットに対して、少なくともデューティ比 50% 以下となる必要がある。これらに加え、光パルスの消光比も重要なパラメータである。多重チャンネル間の干渉によるレベル偏差やアイ開口劣化を抑制するためには高いパルス消光比が要請され、多重度が上がるにつれ厳しいものになる。例えば、4 多重の OTDM 方式の場合、パルス消光比に由来するアイ開口劣化を 0.5dB 程度にするためには、少なくとも 32dB の消光比が必要となる。また、8 多重になると 40dB 程度の消光比が要求される<sup>2,3)</sup>。表 6-3 に、160Gb/s-OTDM 信号に適用できる代表的な光短パルス光源の特性を示す。

モード同期レーザは OTDM 信号用の短パルス光源として広く用いられ、ファイバレーザを用いたもの<sup>4)</sup>、半導体レーザをベースにしたものが主に開発されている<sup>5,6,7)</sup>。オペレーションの柔軟性という観点では、EA (Electroabsorption) 変調器などを用いた外部変調型のパルス光源<sup>8,9)</sup>も有用である。

表 6-3 各種短パルス光源の特長

|                        |       | パルス幅  | ジッタ     | 消光比    | 光出力    | 波長可変性能              |
|------------------------|-------|-------|---------|--------|--------|---------------------|
| モード同期レーザー              | ファイバ  | < 2ps | < 200fs | > 30dB | > 10mW | 可変                  |
|                        | 半導体   | ~ 2ps |         | > 30dB | 数 mW   | 集積型ほぼ固定<br>外部共振型:可変 |
| 外部変調型パルス光源<br>(EA 変調器) | シングル  | ~ 5ps |         | ~ 15dB | < 1mW  | 可変                  |
|                        | カスケード | ~ 3ps |         | > 30dB |        |                     |

## (2) 光 MUX 回路

光MUX回路では、図 6-2(a) に示したように多重チャネルごとに個別に符号化を行う光変調器が必要である。40 Gb/sを基本レートとする160 Gb/s-光MUX回路では、4台の光変調器が必要であり、これらを効率良くコンパクトに実装することが重要である。これに対して、全光学的に変調を行うための周期分極反転LiNbO<sub>3</sub> (PPLN) 素子と石英導波路 (PLC) によるハイブリッド集積回路<sup>10)</sup> やモジュラ型EA変調器を実装した空間結合光学回路<sup>9)</sup>による、光MUX回路が実現されている。

光ファイバによる遅延干渉計構成と異なり、コンパクトにパッケージ化された光MUX回路では、多重ビット間の光位相差の安定化とともに、熱光学効果などによる制御も可能になる。これにより、CS-RZ (Carrier Suppressed RZ) 信号に代表される非線形耐性に優れた位相制御信号の生成も可能となっている<sup>9)</sup>。一方、光MUX回路では、その構成の複雑さゆえ、多重度が大きくなるほど挿入損失が増えることが課題である。これまでに実現された4多重光MUX回路では、原理損失9 dBに対して挿入損失は20 dB程度であり、多重度の増加によるさらなる高速化に向けて、結合損等の過剰損失、変調器挿入損失の低減が必須である。

## (3) クロック抽出回路

超高速OTDM信号に適用するクロック抽出回路では、入力信号と局発信号のタイミングズレを検出する位相比較手法がポイントとなる。プリスケールクロック抽出方式は、位相比較器への負担が少ないため有力な手法の一つである。プリスケラには、高速性に優れたSOA (Semiconductor Optical Amplifier) や偏波依存性が小さく安定性に優れたEA変調器が用いられることが多い。これまでに、SOAで生じる四光波混合を用いた方式<sup>11)</sup>では400 Gb/sにおいて、EA変調器を用いた構成では160 Gb/sにおいて、安定なクロック抽出動作が実現されている<sup>8,9)</sup>。EA変調器、SOAは高速の位相比較器としても適用可能である。例えば、OTDM信号を双方向入力したEA変調器のゲート出力からタイミング誤差を検出する方式<sup>12)</sup>では、320 Gb/sにおけるクロック抽出動作が実現されている。また、SOAで生じるXPMによる周波数チャープ変動を誤差信号に用いる方式<sup>13)</sup>では、640 Gb/sにおけるクロック抽出動作が報告されている。

## (4) 光 DEMUX 回路

光DEMUXゲートとしては、EA変調器、SOAなど小型で安定性に優れた半導体光素子や、超高速ゲーティングが可能な光ファイバベーススイッチがあげられる。特に偏波依存性が小

さく、40 GHzゲート動作が可能なEA変調器は、160 Gb/s級のOTDM信号の分離(1:4)に重用されている<sup>8,9,14)</sup>。一方、SOAを集積したSMZ (Symmetric Mach-Zehnder Interferometer)<sup>15)</sup>、UTC-PD (Uni-traveling-carrier Photodiode)を集積したTW-EA (Traveling-wave-electrode EA) 変調器<sup>16)</sup>では、320 Gb/s以上でのゲート動作も報告されている。また、SOAの重要な応用例として、SOAアレイをPLCにハイブリッド集積した1:8光DEMUX回路<sup>10)</sup>が実現されており、160 Gb/sにおいて全チャンネル同時分離が報告されている。高速性に優れた光ファイバベースゲートとしては、NOLM (Nonlinear Optical Loop Mirror) 構成<sup>17)</sup>が広く採用されており、本章6-2-2節で紹介するテラビット級OTDM伝送を実現するキー技術の一つとなっている。

## 6-2-2 OTDM 信号伝送

160 Gb/s-OTDM伝送技術においては、DPSK (Differential-phase-shift-keying) に代表される高度な変調方式、適応PMD (Polarization Mode Dispersion) 補償、FEC (Forward Error Correction) などの導入により、伝送性能の改善が進んでいる。例えば、これまでOOK (On-off-keying) 方式では1200 kmの単一波長伝送<sup>18)</sup>が最長であったが、DPSK方式の導入により4300 kmにまで長距離化<sup>19)</sup>が進んだ(いずれも偏波多重、FECを適用)。また、光フーリエ変換によるユニークな波形等化技術を適用した単一偏波DPSK伝送実験<sup>20)</sup>では、安定な1000 km級エラーフリー伝送が実現されている。さらに、フィールド伝送実験による性能検証<sup>21, 22, 23)</sup>が多数報告されるなど、技術的には成熟しつつある。

一方、2000年に報告された1.28 Tb/s-70km伝送実験<sup>24)</sup>を皮切りに、OTDM方式の特長である拡張性を活かした、単一波長テラビット級伝送も報告されている。表6・4に、いくつかの報告例<sup>25, 26, 27)</sup>を示す。

表6・4 テラビット OTDM 伝送の報告例

| 年    | 速度(距離)              | 方式            | 要素技術, 特長  | 文献  |
|------|---------------------|---------------|---|-----|
| 2000 | 1.28Tb/s<br>(70km)  | 偏波多重<br>OOK   | 単一偏波シンボルレート: 640Gbaud<br>短パルス光源 (0.2ps): ML-FL+パルス圧縮<br>3次, 4次前置一括分散補償<br>640G-to-10G 光 DEMUX ゲート: NOLM   | 24) |
| 2005 | 2.56Tb/s<br>(160km) | 偏波多重<br>DQPSK | 単一偏波シンボルレート: 640Gbaud<br>短パルス光源 (0.42ps): ML-SL+パルス圧縮<br>640Gbaud クロック抽出<br>640G-to-40G 光 DEMUX ゲート: NOLM | 25) |
| 2009 | 5.1Tb/s<br>(-)      | 偏波多重<br>16QAM | 単一偏波シンボルレート: 640Gbaud<br>短パルス光源 (0.54ps): ML-SL+パルス圧縮<br>偏波ダイバーシティディジタルコヒーレント受信                           | 26) |
| 2010 | 5.1Tb/s<br>(-)      | 偏波多重<br>DQPSK | 単一偏波シンボルレート: 1.28Tbaud<br>短パルス光源 (0.2ps): ML-SL+パルス圧縮<br>1.28Tbaud-to-40Gbaud 光 DEMUX (NOLM)              | 27) |

ML-FL: Mode locked fiber laser, ML-SL: Mode locked solid-state laser

傾向として、DQPSK (Differential Quaternary Phase Shift-keying) やQAM (Quadrature Amplitude

Modulation) など多値変調方式の導入がビットレートの増加を可能していることが伺える。16QAM変調による 5.1 Tb/s-コヒーレントOTDM方式<sup>26)</sup>では、ベースレートの短パルス光源を局発光に用いたデジタルコヒーレント受信器により、光DEMUX、及び復調を一括で行うなど、コヒーレント方式ならではの長が活かされている。

テラビット級 OTDM 方式に必須であるサブピコ秒光短パルス発生には、モード同期レーザに加え非線形光学処理による高度なパルス圧縮が不可欠である。また、コヒーレント光通信方式の導入に際しては、送信/局発いずれの側においても、狭スペクトル線幅を有する高コヒーレントなサブピコ秒短パルス光源が必須となるものと考えられる。

## 6-2-3 おわりに

OTDM 方式の要素技術ならびに OTDM 伝送の現状について述べた。160 Gb/s 級の OTDM 伝送については、光短パルス発生から光時分割多重/分離、クロック抽出の各要素技術、さらには、変調方式の高度化、波形等化技術の進展により、技術的には成熟しつつある。また、多値変調方式との組合せによりマルチテラビット級の単一波長伝送を実現するなど、超高速光伝送を実現する有力な方式として、これからも重要な役割を担うものと期待したい。

### ■参考文献

- 1) M. Jinno, "Effect of timing jitter on an optically controlled picosecond optical switch", *Opt. Lett.*, vol.18, no.17, pp.1409-1411 (1993)
- 2) A.T. Clausen, H.N. Poulsen, L.K. Oxenløwe, A.I. Siahlo, J. Seoane, and P. Jeppesen, "Pulse source requirements for OTDM systems", *LEOS2003*, vol.1, pp.382-383, TuY2 (2003)
- 3) H. Ishikawa, "Ultrafast All-Optical Signal Processing Devices", pp.17-19, Wiley (2008)
- 4) E. Yoshida, N. Shimizu, and M. Nakazawa, "A 40-GHz 0.9 ps regeneratively mode-locked fiber laser with a tuning range of 1540-1560 nm", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.11, no.12, pp.1587-1589 (1999)
- 5) K. Sato, K. Wakita, I. Kotaka, Y. Kondo, and M. Yamamoto, "Monolithic strained-InGaAsP multiple-quantum-well lasers with integrated electroabsorption modulators for active mode locking," *Appl. Phys. Lett.*, vol.65, no.1, pp.1-3 (1994)
- 6) H. Yokoyama, "Highly reliable mode-locked semiconductor lasers," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E85-C, no.1, pp.27-36 (2002)
- 7) Y. Katoh, S. Arahira, and Y. Ogawa, "40 GHz actively mode-locked DBR laser diodes with a wide (800 MHz) locking range," *OFC2001, WC5-1* (2001)
- 8) E. Lach, K. Schuh, and M. Schmidt, "Application of electroabsorption modulators for high-speed transmission systems", *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*, Springer New York, vol.2, no.2, pp.140-170 (2005)
- 9) H. Murai, M. Kagawa, H. Tsuji, and K. Fujii, "EA-modulator-based optical time division multiplexing/demultiplexing techniques for 160-Gb/s optical signal transmission", *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol.13, no.1, pp.70-78 (2007)
- 10) T. Ohara, H. Takara, I. Shake, K. Mori, K. Sato, S. Kawanishi, S. Mino, T. Yamada, M. Ishii, I. Ogawa, T. Kitoh, K. Magari, M. Okamoto, R. V. Roussev, J. R. Kurz, K. R. Parameswaran, and M. M. Fejer, "160-Gb/s OTDM Transmission Using Integrated All-Optical MUX/DEMUX With All-Channel Modulation and Demultiplexing", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.16, no.2, pp.650-652 (2004)
- 11) O. Kamatani and S. Kawanishi, "Prescaled timing extraction from 400 Gb/s optical signal using a phase lock loop based on four-wave mixing," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.8, no.8, pp.1094-1096 (1996)
- 12) C. Boerner, V. Marenbert, S. Ferber, C. Schubert, C. Schmidt-Langhorst, R. Ludwig, and H. G. Weber, "320 Gb/s clock recovery with electro-optical PLL using a bidirectionally operated electroabsorption modulator as phase comparator," *OFC'05, OTuO3* (2005)

- 13) H. C. Hansen Mulvad, E. Tangdiongga, H. de Waardt, and H. J. S. Dorren, "40 GHz clock recovery from 640 Gbit/s OTDM signal using SOA-based phase comparator", *Electron. Lett.*, vol.44, no.2, pp.146-148 (2008)
- 14) B. Mikkelsen, G. Raybon, R.-J. Essiambre, K. Dreyer, Y. Su, L. E. Nelson, J. E. Johnson, G. Shtengel, A. Bond, D. G. Moodie, and A. D. Ellis, "160 Gb/s single-channel transmission over 300 km nonzero-dispersion fiber with semiconductor based transmitter and demultiplexer", *ECOC'99, Postdeadline Paper 2-3* (1999)
- 15) S. Nakamura, Y. Ueno, and K. Tajima, "Error-free all-optical demultiplexing at 336Gb/s with a hybrid-integrated symmetric-Mach-Zehnder-switch", *OFC2002, FD3* (2002)
- 16) S. Kodama, T. Yoshimatsu, and H. Ito, "320 Gb/s error-free demultiplexing using ultrafast optical gate monolithically integrating a photodiode and electroabsorption modulator", *Electron. Lett.*, vol.39, no.17, pp.1269-1270 (2003)
- 17) M. Nakazawa, E. Yoshida, T. Yamamoto, E. Yamada, and A. Sahara, "TDM single channel 640 Gb/s transmission experiment over 60 km using 400 fs pulse train and walk-off free, dispersion flattened nonlinear optical loop mirror", *Electron. Lett.*, vol.34, no.9, pp.907-908 (1998)
- 18) E. Lach, K. Schuh, M. Schmidt, B. Junginger, G. Charlet, P. Pecci, and G. Veith, "7 x 170 Gbit/s (160 Gbit/s + FEC overhead) DWDM transmission with 0.53 bit/s/Hz spectral efficiency over long haul distance of standard SMF", *ECOC2003, Th4.3.5*, pp.68-69, (2003)
- 19) S. Weisser, L. Raddatz, A. Benz, R. Ludwig, S. Ferber, C. Boerner, and H.G. Weber, "Single-Channel 170 Gbit/s Transmission up to 4000 km using Dispersion-Managed Fiber Spans and all-Raman Amplification", *ECOC2005, We.3.2.3* (2005)
- 20) T. Hirooka, M. Okazaki, and M. Nakazawa, "A straight-line 160-Gb/s DPSK transmission over 1000 km with time-domain optical Fourier transformation", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.20, no.13, pp.1094-1096 (2008)
- 21) 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 Gb/s transmission over 116 km field-installed fibre using 160 Gb/s OTDM and 40 Gb/s ETDM," *Electron. Lett.*, vol.37, no.7, pp.443-445 (2001)
- 22) T. Miyazaki, M. Daikoku, I. Morita, T. Otani, Y. Nagao, M. Suzuki, F. Kubota, "Stable 160-Gb/s DPSK transmission using a simple PMD compensator on the photonic network test bed of JGN2," *OECC/COIN 2004, 14C3-2*, pp.462-463 (2004)
- 23) M. Schmidt, M. Witte, F. Buchali, E.Lach, E. Le Rouzic , S. Salaun, S. Vorbeck, R. Leppla, "8x170 Gbit/s DWDM field transmission experiment over 430 km SSMF using adaptive PMD compensation", *ECOC2004, PD TH4.1.2* (2004)
- 24) M. Nakazawa, T. Yamamoto, K. R. Tamura, "1.28 Tbit/s-70 km OTDM transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator", *ECOC2000, post-deadline paper PD2.6* (2000)
- 25) H. G. Weber, S. Ferber, M. Kroh, C. Schmidt-Langhorst, R. Ludwig, V. Marembert, C. Boerner, F. Futami, S. Watanabe, and C. Schubert, "Single Channel 1.28 Tbit/s and 2.56 Tbit/s DQPSK Transmission", *ECOC2005, Post-deadline paper 4.1.2* (2005)
- 26) C. Schmidt-Langhorst, R. Ludwig, D. Groß, L. Molle, M. Seimetz, R. Freund, and C. Schubert, "Generation and coherent time-division demultiplexing of up to 5.1 Tb/s single-channel 8-PSK and 16-QAM signals", *OFC2009, PDPC6* (2009)
- 27) H.C. Hansen Mulvad, M. Galili, L.K. Oxenløwe, H. Hu, A.T. Clausen, J.B. Jensen, C. Peucheret, and P. Jeppesen, "Demonstration of 5.1 Tbit/s data capacity on a single-wavelength channel", *Opt. Expr.* vol.18, no.2, pp.1438-1433 (2010)

## ■5群-3編-6章

### 6-3 超高速光信号処理

(執筆者：渡辺茂樹) [2010年5月 受領]

情報通信トラフィックの急激な増大に対応し、柔軟なネットワークを構築するため、光の帯域利用効率を極限まで向上する光通信方式をはじめとする、多くのブレイクスルー技術の研究が展開されている。一方、特に最近、環境・エネルギー問題の観点から、情報通信分野にかかわるエネルギーの増大が大きな問題として議論されつつあり、今後は、エネルギー効率に優れた光技術開発の必要性が高まっていくと考えられる。光ファイバ通信は、光ファイバの低損失特性と可透性を基盤とするエネルギー効率に優れた伝送システムである。しかし、情報の送受信や再生、ルート切替えなどの処理において、光/電気変換が必要となる場合に、大きなエネルギー損失が発生する。光信号処理は、光/電気変換を伴わずに、光レベルで直接各種の信号処理を行う技術であり、電気処理では実現できない超高速動作とともに、今後、光ネットワークのエネルギー効率向上への貢献が期待される。

光信号処理の技術課題には、光変調、光増幅、光スイッチング、波長変換、光論理・演算、光制御、光モニタ等々、非常に広範なテーマが含まれ、その実現には、小型で高速・広帯域特性に優れた非線形光デバイスが不可欠である。近年、光半導体技術、光導波路技術、非線形ファイバ技術、シリコン (Si) フォトニクス技術などの研究の進展が顕著であり<sup>1, 2, 3, 4, 5)</sup>、これらの先端光技術から生み出される新しい非線形光デバイスには、将来の光信号処理を実現するための中核デバイスとなり得るものも多く、今後の発展が強く期待される。

#### 6-3-1 超高速光スイッチ

将来の光ネットワークには、超高速・大容量情報を効率的にルーティング可能な超高速光スイッチが必要となる<sup>1)</sup>。従来にはない新機能とともに、低消費電力での実現が重要である。

従来の光スイッチにおいては、光信号を一旦電気信号に変換し、電氣的にスイッチした後、LDや光変調器により再び光信号に変換する、トランスポンダ型方式が多く用いられている。既に10~40 Gb/sの信号速度で動作可能な光スイッチが実用化されており、現在、100 Gb/sあるいはさらに高速化を目指した研究開発が行われている。さらなる高速化には、エレクトロニクスの動作速度限界とそれに起因する消費電力の増大が大きな制限要因となる。

光/電気変換を伴わない超高速光スイッチとしては、まずニオブ酸リチウム (LiNbO<sub>3</sub>) 光変調器や電界吸収 (EA) 型変調器などを、電気信号を用いて駆動する方式が研究されている<sup>6)</sup>。また、最も高速な光スイッチは、光パルスを用いて光直接処理を行う全光型の光スイッチにより実現されている。光半導体増幅器による相互利得変調、相互位相変調、光半導体のサブバンド間遷移による相互位相変調等を用いた方式<sup>7, 8, 9)</sup>、疑似位相整合構造のLiNbO<sub>3</sub> 導波路 (PPLN) を用いた差周波生成 (2次非線形光学効果) による方式、非線形光ファイバの自己位相変調、相互位相変調、四光波混合、光パラメトリック増幅等の3次非線形光学効果を用いた方式<sup>10, 11, 12, 13)</sup>などが研究されている。いずれも、数百Gb以上の超高速スイッチが期待でき、すでにTb級の動作が報告されている。

これらの超高速光スイッチは、光時分割多重信号を構成する個別信号の分離 (光DEMUX) はもとより、計測分野などへの応用も期待される。例えば、光信号パルスを低速の繰返し間

隔でスイッチし、その低速成分を光／電気変換した後、電氣的に信号処理して波形観測する光サンプリング・オシロスコープでは、エレクトロニクスの処理速度限界を超えた時間分解能での波形観測が可能である。時間分解能は、主にスイッチ用光パルスの時間幅により決まり、サブピコ秒の高分解能が実現されている<sup>14)</sup>。

### 6-3-2 波長変換

波長変換技術<sup>2)</sup>としては、光スイッチと同様、トランスポンダ型や波長選択型光スイッチ(WSS)などが実用化されている<sup>15)</sup>。今後、大容量化と波長数の増大に伴う装置の複雑化・大型化に対応するため、集積化、低消費電力化、あるいは変換速度の向上などの課題解決が必要である。全光型の波長変換は、超高速波長変換や大容量情報の一括波長変換の実現に向け、スーパーコンティニウム型、光スイッチ型、パラメトリック型などの方式が研究されている。

スーパーコンティニウム型は、光信号パルスを光ファイバに入力し、自己位相変調により光スペクトルを拡大させた後、光フィルタで所望の波長を抽出することにより波長変換する<sup>16, 17)</sup>。一方、光スイッチ型は、信号光自身が制御光となり、信号光と同期した異なる波長の光波に信号をスイッチする方式であり、相互位相変調などによる超高速波長変換などの動作報告がある<sup>18, 19, 20)</sup>。また、パラメトリック波長変換型では、位相情報が保持され、(多値)位相変調をはじめ、あらゆる変調方式の光信号に適用可能であるとともに、多波長波長一括変換(波長群変換)も可能である。信号光と制御光を非線形ファイバやPPLN、半導体光アンプ、非線形性を高めたシリコン導波路などに入力し、光パラメトリック効果により波長変換を行う。高非線形ファイバを用いた波長変換では、光ファイバの零分散波長近傍に制御光を設定することにより位相整合が実現し、広帯域の波長変換が可能となる。この方式は、相互作用長を長くとれるため高効率変換が可能であり<sup>21)</sup>、多波長一括変換やテラビットを超える超高速変換の報告例がある<sup>22)</sup>。一方、PPLNによる波長変換は、結晶の周期構造の最適化により信号光と制御光を疑似位相整合させて発生効率を高めている。広帯域特性を有し、大束の信号の波長群変換を可能としている<sup>23)</sup>。また、光デバイスの小型集積化が期待されるシリコン導波路を用いた波長変換では、160 Gb/sでの波長変換等が報告されている<sup>5, 24, 25)</sup>。

### 6-3-3 光再生

光ファイバ伝送では、伝送路の損失や波長分散、非線形光学効果、光増幅器の雑音等の影響による強度や位相の乱れにより、信号光の品質が低下し、伝送容量や伝送距離が厳しく制限される。エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)により、全光増幅(振幅再生)(IR: Re-amplification)は実現されているが、光増幅と波形整形が同時に可能な光 2R (Re-amplification and Re-shaping) や、さらにタイミング再生(Re-timing)も可能な光 3R などの光再生技術を実現するための研究がなされている。

波形整形としては、主に飽和入出力特性を有する光デバイスを用いて、振幅や位相の揺らぎを抑圧する方式の研究が行われている。光パラメトリック増幅器の利得飽和や半導体素子による可飽和吸収を用いることにより、振幅雑音や位相雑音の抑圧が可能である<sup>26, 27, 28)</sup>。また、光デバイスの非線形伝達関数を用いた波形整形の研究も行われている<sup>29, 30)</sup>。一方、光チャープにより拡大したスペクトルの一部を光フィルタを用いて抽出する方式により、振幅雑

音の抑圧が可能である。本方式では、波長シフトにより光雑音と信号光を分離可能であり、波長変換への応用も期待される<sup>31)</sup>。

光 3R再生は、光増幅、タイミング再生及び波形整形の組合せにより構成される。現状では、まず信号光に同期した光クロックを再生し、この再生光クロックに信号光を光スイッチなどを用いて同期させることによりタイミング再生を図っている。また、上記光スイッチによる光同期の際に、光スイッチの飽和特性を併用することにより波形整形を行っている。一方、すでに実用化されている光 3R再生装置では、光信号を電気信号に変換後、電子回路でタイミング再生し、波形整形も電子回路で信号処理を行ったあと、再び光信号に変換するため、ほぼ完璧な信号再生が実現している。これに対して、上記の全光方式では、一部光のアナログ動作を用いているため、従来方式に比べて再生効果は不完全である。しかしながら、超高速光信号に対して、現状方式ではエレクトロニクスの動作速度限界により再生処理ができなくなる可能性がある点や、消費電力の低減が必要となる点などを考慮すると、将来的には全光再生の実現が期待されるところである。全光再生としては、光Kerr効果を用いて 160 Gb/sの信号を再生した光 3R伝送実験の報告例などがある<sup>17, 32)</sup>。なお、光ソリトン伝送においては、光同期スイッチによる位相雑音の抑圧方式により、理想的な光 3R再生が実現可能であり、100万km以上の再生伝送の報告例もある<sup>33)</sup>。

#### 6-3-4 光パラメトリック増幅

光パラメトリック増幅では、2次あるいは3次の非線形光学媒質中において、励起光のエネルギーが励起光と位相整合した信号光へと変換される際に光増幅される。位相整合条件が厳しく管理された結晶や導波路や強い非線形性と高い均一性をもつ非線形光ファイバなどにより実現可能である<sup>34)</sup>。非線形光ファイバを用いた光パラメトリック増幅は、信号光と励起光が位相整合条件を満足すれば、任意の波長帯域の信号光を増幅可能であり、100 nmを超える広い増幅帯域も実証されている<sup>35, 36)</sup>。シングル励起構成においては、単一の励起光波長をファイバの零分散付近に設定し、縮退四光波混合過程を利用する。デュアル励起構成においては、異なる波長の励起光による非縮退四光波混合過程を利用し、均一で広帯域な利得を得ることができる。四光波混合過程は強い偏波依存性をもつため、偏波ダイバーシティ構成などによる偏波無依存化が提案され<sup>37)</sup>、光パラメトリック増幅においても同構成による偏波無依存化が報告されている<sup>38)</sup>。また、飽和利得特性を用いた波形整形も可能であり<sup>26)</sup>、その広帯域応答特性を利用して、前節に示した光再生にも応用されている。

#### 6-3-5 全光補償技術

超高速光伝送において、群速度分散、高次分散、非線形歪等による波形劣化は、伝送距離の制限要因となる。これらの波形劣化についての補償は、分散補償素子、伝送線路の分散管理、電気分散補償、受信後の信号処理等により幅広く行われている。しかし、特に超高速光伝送では、高次分散や非線形歪の影響が顕在化するため、より高度な補償技術が必要となる。

フーリエ限界パルスの光フーリエ変換方式<sup>39)</sup>により、偏波モード分散<sup>40)</sup>、タイミングジッタ<sup>41, 42)</sup>、3次分散<sup>39, 43)</sup>などを補償可能であることが提案・実証されている。また、光位相共役を用いることにより、分散補償や伝送ファイバ内の非線形効果により発生するチャープやクロストークの抑圧が可能であることが提案・実証されている<sup>44, 45, 46, 47)</sup>。これらの全光補償技

術は、光通信以外の光情報処理分野等に応用される可能性もあり、今後の展開が期待される。

### 6-3-6 光信号処理デバイス

物質と光波の相互作用である非線形光学効果により、光の振幅、位相や周波数の変化を伴う様々な現象が発現する。これらの現象を用いて、スイッチング、波長変換、増幅などに応用可能である。表 6・5 に代表的な光非線形効果とその効果を利用した機能例を示す。

表 6・5 光非線形効果とその機能

| 光非線形効果               | 機能                               | デバイス                             |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 光高調波発生<br>光混合        | 波長変換, 光発振, 位相共役                  | 疑似位相整合結晶導波路, バルク結晶               |
| 誘導ラマン散乱<br>誘導ブリュアン散乱 | 光増幅<br>OTDR                      | 光ファイバ, シリコン細線導波路                 |
| 四光波混合                | 波長変換, パラメトリック増幅, 位相共役, スwitching | バルク結晶, 光ファイバ, 半導体光増幅器, シリコン細線導波路 |
| 自己(相互)位相変調           | パルス圧縮, 波形整形, 波長変換, スwitching     | 光ファイバ, 半導体光増幅器,                  |
| 可飽和吸収効果              | スswitching                       | 半導体可飽和吸収体, カーボンナノチューブ            |

### 6-3-7 まとめ

将来の大容量光ネットワークにおいて、光信号処理が有効利用されていくためには、高速・広帯域特性に優れた光処理デバイスの開発が不可欠である。高非線形光ファイバやシリコン・フォトニクスによる高い非線形特性を有する光デバイスが活発に研究開発されており<sup>4.5.24</sup>, 小型でエネルギー効率に優れた光処理デバイスの実現が期待される。一方、システム面では、超高速光スイッチが、まず最も簡単な光スイッチングや光サンプリング方式に応用され、すでに波形モニターや超高速データ抽出装置として実用レベルのものが開発されている。今後は、光の超高速・広帯域特性を活かした処理を中心に、高機能性とエネルギー効率の向上が重要なテーマになると考えられる。

#### ■参考文献

- 1) K. E. Stubkjaer: "Semiconductor optical amplifier-based all-optical gates for high-speed optical processing," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 6, 6, pp. 1428-1435 (Nov./Dec. 2000)
- 2) S. J. B. Yoo: "Wavelength conversion technologies for WDM network applications," J. Lightwave Technol., 14, 6, pp. 995-966 (June 1996)
- 3) M. Hirano, T. Nakanishi, T. Okuno, and M. Onishi: "Silica-based highly nonlinear fibers and their application," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron, 15, 1, pp. 103-113 (Jan./Feb. 2009)
- 4) M. Pelusi, F. Luan, T. D. Vo, M. R. E. Lamont, S. J. Madden, D. A. Bulla, D. -Y. Choi, B. Luther-Davies, and B. J. Eggleton: "Photonic-chip-based radio-frequency spectrum analyser with terahertz bandwidth," Nature Photonics, 3, pp. 139-143, 2009.
- 5) C. Koos, P. Vorreau, T. Vallaitis, P. Dumon, W. Bogaerts, R. Baets, B. Esembeson, I. Biaggio, T. Michinobu, F. Diederich, W. Freude, and J. Leuthold: "All-optical high-speed signal processing with silicon-organic hybrid slot waveguides," Nature Photonics, 3, pp. 216-219, 2009.

- 6) C. Boerner, C. Schubert, C. Schmidt, E. Hilliger, V. Marembert, J. Berger, S. Ferber, E. Diertrich, R. Ludwig, B. Schmauss, and H. G. Weber: "160 Gb/s clock recovery with electro-optical PLL using bidirectionally operated electroabsorption modulator as phase comparator," *Electron. Lett.*, 39, 14, pp. 1071-1073, 2003.
- 7) T. Hirooka, M. Okazaki, T. Hirano, P. Guan, M. Nakazawa, and S. Nakamura: "All-optical demultiplexing of 640-Gb/s OTDM-DPSK signal using a semiconductor SMZ switch," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, 20, pp. 1574-1576, 2009.
- 8) E. Tangdiongga, Y. Liu, H. de Waardt, G. D. Khoe, A. M. J. Koonen, and H. J. S. Dorren: "All-optical demultiplexing of 640 to 40 Gbit/s using filtered chirp of a semiconductor optical amplifier," *Opt. Lett.*, 32, pp. 835-837, 2007.
- 9) R. Akimoto, G. Cong, M. Nagase, T. Mozume, H. Tsuchida, T. Hasama, and H. Ishikwa: "All-optical demultiplexing from 160 to 40/80 Gb/s using Mach-Zehnder switches based on intersubband transition of InGaAs/AlAsSb coupled double quantum wells," *IEICE Trans. Electron.*, E92-C, 2, pp.187-193, 2009.
- 10) 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, 24, pp. 2027-2029, Nov. 2000.
- 11) H. G. Weber, R. Ludwig, S. Ferber, C. Schmidt-Langhorst, M. Kroh, V. Marembert, C. Boerner, and C. Schubert: "Ultrahigh-speed OTDM-transmission technology," *Electron. Lett.*, 42, pp. 178-179, 2006.
- 12) H. C. H. Mulvad, M. Galili, L. K. Oxenløwe, H. Hu, A. T. Clausen, J. B. Jensen, C. Peucheret, and P. Jeppesen: "Demonstration of 5.1 Tbit/s data capacity on a single-wavelength channel," *Opt. Express*, 18, pp. 1438-1443, 2010.
- 13) S. Watanabe, F. Futami, R. Okabe, R. Ludwig, C. Schmidt-Langhorst, B. Huettl, C. Schubert, and H. G. Weber: "An optical parametric amplified fiber switch for optical signal processing and regeneration," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 14, pp. 674-680, 2008.
- 14) M. Sköld, M. Westlund, H. Sunnerud, and P. A. Andrekson: "All-optical waveform sampling in high-speed optical communication systems using advanced modulation formats," *J. Lightwave Technol.*, 27, pp. 3662-3671, 2009.
- 15) Y. Itaya: "Milestones in opto-electronics and fiber optics technologies," *IEICE Electronics Express*, 6, 11, pp.640-650 (June 2009)
- 16) S. Watanabe and F. Futami: "All-optical wavelength conversion using ultra-fast nonlinearities in optical fiber," *IEICE Trans. Electron.*, E85-C, pp.889-895, 2002.
- 17) S. Watanabe, R. Ludwig, F. Futami, C. Schubert, S. Ferber, C. Boerner, C. Schmidt-Langhorst, J. Berger, and H. G. Weber: "Ultrafast all-optical 3R-regeneration," *IEICE Trans. Electron.*, E87-C, 7, pp.1114-1118, 2004.
- 18) C. Schubert, R. Ludwig, S. Watanabe, F. Futami, C. Schmidt, J. Berger, C. Boerner, S. Ferber, and H. G. Weber: "160 Gbit/s wavelength converter with 3R-regenerating capability," *Electron. Lett.*, 36, pp. 903-094, 2002.
- 19) M. Galili, L. K. Oxenløwe, H. C. H. Mulvad, A. T. Clausen, and P. Jeppesen: "Optical wavelength conversion by cross-phase modulation of data signals up to 640 Gb/s," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 14, 3, pp.573-579, 2008.
- 20) M. D. Pelusi, V. G. Ta'eed, L. Fu, E. Mägi, M. R. E. Lamont, S. Madden, D.-Y. Choi, D. A. P. Bulla, B. Luther-Davies, and B. J. Eggleton: "Applications of highly-nonlinear Chalcogenide glass devices tailored for high-speed all-optical signal processing," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 14, 3, pp.529-539 (May/June 2008)
- 21) S. Watanabe and F. Futami: "All-optical signal processing using highly-nonlinear optical fibers," *IEICE Trans. Commun.*, E84-B, pp.1179-1189, 2001.
- 22) H. Hu, E. Palushani, M. Galili, H. C. H. Mulvad, A. T. Clausen, L. K. Oxenløwe, and P. Jeppesen: "1.28 Tb/s wavelength conversion for polarization multiplexed RZ-DPSK signals," *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), Paper OWP1*, San Diego, California, March, 2010.
- 23) J. Yamawaku, H. Takara, T. Ohara, A. Takada, T. Morioka, O. Tadanaga, H. Miyazawa, and M. Asohe: "Low-crosstalk 103 channel x 10 Gb/s (1.03 Tb/s) wavelength conversion with a quasi-phase-matched LiNbO3 waveguide," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 12, pp. 521-528, 2006.

- 24) B. G. Lee, A. Biberman, N. Ophir, A. C. Turner-Foster, M. A. Foster, M. Lipson, A. L. Gaeta, and K. Bergman: "160-Gb/s broadband wavelength conversion on chip using dispersion-engineered silicon waveguides," Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2009), paper CThBB1, Jun 2009.
- 25) C. Langrok, S. Kumarm J. E. McGeehan, A. E. Willner, and M. M. Fejer: "All-optical signal processing using  $\chi(2)$  nonlinearities in guided-wave devices", J. Lightwave Technol., 24, pp. 2579-2591, 2006.
- 26) K. Inoue: "Optical level equalisation based on gain saturation in fibre optical parametric amplifier," Electron. Lett., 36, 12, pp. 1016-1017, Jun. 2000.
- 27) F. Seguinéau, D. Rouvillain, P. Brindel, H. Choumane, G. Aubin, J.-L. Oudar, B. Lavigne, and O. Leclerc: "Regeneration capabilities of passive saturable absorber-based optical 2R in 20Gbit/s RZ DWDM long-haul transmissions", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2003.
- 28) F. Parmigiani, R. Slavic, J. Kakande, C. Lundström, M. Sjödin, P. Andrekson, R. Weerasuriya, S. Sygletos, A. D. Ellis, L. Grüner - Nielsen, D. Jakobsen, S. Herström, R. Phelan, J. O'Gorman, A. Bogris, D. Syvridis, S. Dasgupta, P. Petropoulos, and D. J. Richardson: "All-optical phase regeneration of 40Gbit/s DPSK signals in a black-box phase sensitive amplifier," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), Paper PDP3C, San Diego, California, March, 2010.
- 29) Q. T. Le, L. Bramerie, S. Lobo, M. Gay, M. Joindot, J.-C. Simon, A. Poudoulec, M. Van der Keur, C. Devemy, D. Massoubre, J.-L. Oudar, G. Aubin, A. Shen, and J. Decobert: "WDM compatible 2R regeneration device based on eight-channel saturable absorber module," Electron. Lett. 43, 23, pp.1305-1306, (Nov. 2007).
- 30) S. Watanabe and S. Takeda: "All-optical noise suppression using two-stage highly-nonlinear fibre loopinterferometers," Electron. Lett. 36, 52-53 (2000).
- 31) P. V. Mamyshev: "All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect," Proc. 24th European Conference on Optical Communications (ECOC'98), pp. 475-476, Madrid, Spain, Sep. 1998.
- 32) H. Murai, Y. Kanda, M. Kagawa, and S. Arahira: "Regenerative SPM-based wavelength conversion and field demonstration of 160-Gb/s all optical 3R operation," Opt. Express, 28, pp. 910-921, 2010.
- 33) M. Nakazawa, E. Yamada, H. Kubota, and K. Suzuki: "10 Gbit/s soliton data transmission over one million kilometers," Electron. Lett., 27, pp. 1270-1272, 1991.
- 34) G. P. Agrawal: "Nonlinear optical fiber optics," pp.387-401, Academic Press, 2007.
- 35) M.E. Marhic, K. K. Y. Wong, and L. G. Kazovsky: "Wide-band tuning of the gain spectra of one-pump fiber optical parametric amplifiers," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 10, 5, pp. 1133-1141, 2004.
- 36) B. P. P. Kuo, N. Alic, P. F. Wysocki, and S. Radic: "Simultaneous NIR and SWIR wavelength-swept generation over record 329-nm range using swept-pump fiber optical parametric oscillator," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), Paper PDP9A, San Diego, California, March, 2010.
- 37) T. Hasegawa, K. Inoue, and K. Oda: "Polarization independent frequency conversion by fiber four-wave mixing with a polarization diversity technique," IEEE Photon. Technol. Lett., 5, 8, pp. 947-949, 1993.
- 38) K. K. Y. Wong, M. E. Marthic, K. Uesaka, and L. G. Kazovsky: "Polarization-independent one-pump fiber-optical parametric amplifier," IEEE Photon. Technol. Lett., 14, 11, pp. 1506-1508, 2002.
- 39) M. Nakazawa, T. Hirooka, F. Futami, and S. Watanabe: "Ideal distortion-free transmission using optical Fourier transformation and Fourier transform-limited optical pulses," IEEE Photon. Technol. Lett., 16, 4, pp. 1059-1061, 2004.
- 40) M. Romagnoli, P. Franco, R. Corsini, A. Schiffrini, and M. Midrio: "Time-domain Fourier optics for polarization-mode dispersion," Opt. Lett., 24, 17, pp. 1197-1199, 1999.
- 41) L. F. Mollenauer and C. Xu: "Time-lens timing-jitter compensator in ultra-long haul DWDM dispersion managed soliton transmissions," Proc. Conf. Lasers and Electro-Optics (CLEO), Postdeadline Paper CPDB1-1, Long Beach, CA, May 2002.
- 42) L. A. Jiang, M. E. Grein, H. A. Haus, E. P. Ippen, and H. Yokoyama: "Timing jitter eater for optical pulse trains," Opt. Lett., 28, 2, pp. 78-80, 2003.
- 43) T. Hirooka, M. Okazaki, and M. Nakazawa: "A straight-line 160-Gb/s DPSK transmission over 1000 km with time-domain optical Fourier transformation," IEEE Photon. Technol. Lett., 20, 13, pp. 1094-1096, 2008.
- 44) A. Yariv, D. Fekete, and D. M. Pepper: "Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation," Opt. Lett., 4, pp. 52-54, 1979.

- 45) S. Watanabe, G. Ishikawa, T. Naito, and T. Chikama: "Generation of optical phase-conjugate waves and compensation for pulse shape distortion in a single-mode fiber," J. Lightwave Technol., 12, pp.2139-2146, 1994.
- 46) S. Watanabe, and M Shirasaki: "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation," J. Lightwave Technol., 14, pp.243-248, 1996.
- 47) S. L. Jansen, D. van den Borne, P. M. Krummrich, S. Spälter, G.-D. Khoe, and H. de Waardt: "Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 12, 4, pp. 505-520, 2006.