

300ギガビット光ゲートの第2時定数誘起波形歪を取り除く独自方式の研究

電子工学専攻 上野研究室 西田 武洋

1. はじめに

現在の光通信システムには、送信した光信号を一度、電気信号に変換し、電氣的な処理を施した後、再び光信号に戻す方式を用いている。その為、電子の動作速度限界により、通信速度が制限 (< 40-Gb/s) を受けてしまう。将来の超高速大容量フォトニックネットワーク実現の為に、電氣的処理を介さない全光信号処理技術に関する研究が、近年世界中で盛んに行われている。その全光信号処理を担う全光スイッチング素子には、半導体光増幅器 (semiconductor optical amplifier, SOA) を含む全光半導体ゲートが有望視されており、超高速応答 (100-400 Gb/s もしくはそれ以上)、低エネルギー動作 (< 10 pJ)、小型集積化可能といった長所を持ち合わせている。半導体光ゲート機能の一つである全光波長変換に関して、これまでに、遅延干渉型波長変換器 (delayed-interference signal-wavelength converter, DISC) で 160 Gb/s の実験検証¹や、DISC に短波長シフトさせた光バンドパスフィルタ (optical bandpass filter, OBF) を加えることで、320 Gb/s の実験検証²が、それぞれ報告されている。

パルス幅の狭いパルス入力 (< 2~3 ps) が誘因となり、SOA 内のキャリア密度緩和波形に、キャリア注入による遅い緩和時定数 (第1時定数) に加えて、キャリア温度緩和による速い緩和時定数 (第2時定数) を発生させる (図1)。この時定数差が、DISC 型ゲート出力波形に歪を生じさせることが、明らかになっている^{3,4}。更に言えば、2つ以上の時定数は、他の超高速光材料である、量子ドットやサブバンド間遷移

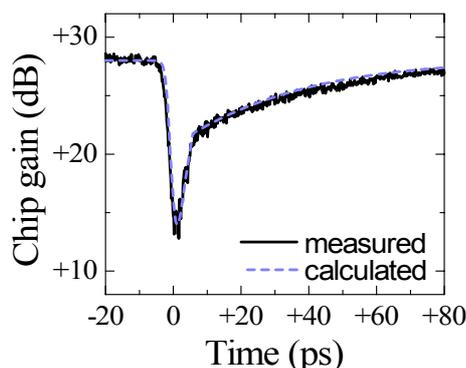


Fig. 1. Measured (solid) and calculated (dashed) SOA gain recoveries of a standard SOA (which differs from the SOA in Sections 2 and 3), after it amplified a 1.25-GHz, 2.1-ps, 10-fJ input pulse. The first- and second-slowest recovery time constants were 54 ps and 6.5 ps, respectively.

(intersubband transition, ISBT) 材料にも現れる^{5,6}。従って、波形歪に関する課題は、将来の全光通信技術の発展にとって、重要と言える。この波形歪を解消する為、周波数領域で光パルス整形を行う複素光スペクトル合成 (optical-spectrum-synthesizer, OSS) 型の独自の全光ゲートが、新規提案され、理論的にその有効性が示されている⁷。周波数制御型パルス整形研究成果として、アレイ型導波路回折格子 (arrayed-waveguide grating, AWG) システムを用いた、hyperbolic-secantパルスから矩形パルスへのパルス整形の実験検証⁸や、InP 基盤上に AWG 型波形整形システムを構築し、分散補償の調査⁹などが、これまでに報告されている。

本研究では、標準的な SOA を使い、波形歪を解消する独自方式ゲートの検証実験を行った。また、300ギガビットゲート検証に向けて、短パルス生成実験を行った。

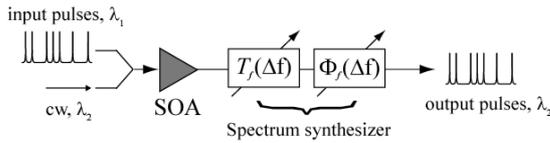


Fig. 2. The new scheme of our all-optical gate which contains an optical spectrum's phase-and-amplitude synthesizer⁷.

2. 複素光スペクトル合成器を含む全光ゲート

図2に光スペクトル合成器 (OSS) を含む全光波長変換ゲートの概略図を示す。SOAに入射された入力データパルス (λ_1) は、誘導放出を介して、キャリア密度を消費し、SOAの利得と屈折率振動を引起す。この振動により、同時に入射された連続 (continuous wave, cw) 光は、相互利得変調 (cross-gain modulation, XGM) と相互位相変調 (cross-phase modulation, XPM) を受ける。XGMとXPMを受けたcw光は、計算モデルに基づく透過・位相プロファイル⁷を施したOSSに入射される。最終的に、時間領域で波形整形されたパルスを得る。

3. 複素光スペクトル合成実機 (VBS) 特性評価実験と、その特性を考慮した計算シミュレーション

3.1 VBSを用いた光時間多重実験

複素光スペクトル合成器を用いた独自方式ゲートの検証実験を行う前に、図3に示す実験セットアップで、スペクトル合成実機の周波数分解能、消光比などの特性評価を行った。入力クロックパルス光源に、繰り返し周波数 10 GHz、半値全幅 2 ps のモー

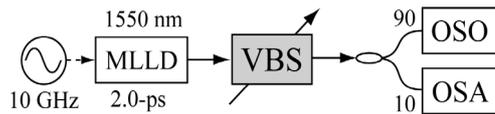


Fig. 3. Experimental setup for characterizing our proto-type variable bandwidth spectrum shaper (VBS), with which we tried to multiplex our mode-locked pulse train in the time domain.

OSO: optical sampling oscilloscope, OSA: optical spectrum analyzer.

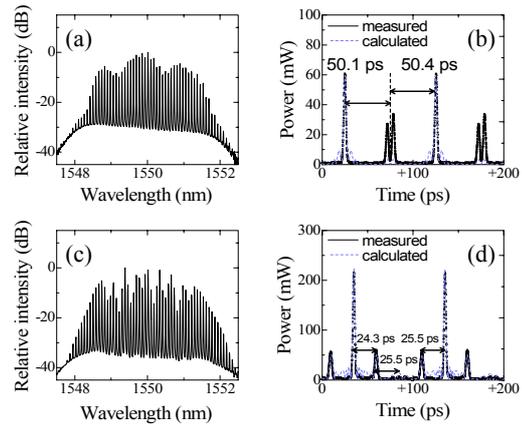


Fig. 4. Optical spectra and waveforms measured at the output of the VBS.

(a), (b): multiplexing from 10 GHz to 20 GHz.
(c), (d): multiplexing from 10 GHz to 40 GHz.

ドロックレーザダイオード (mode-lock laser diode, MLLD) を、スペクトル合成実機に、Cバンド内で位相・透過スペクトルを調整可能な帯域可変スペクトルシェイパ¹⁰

(variable bandwidth spectrum shaper, VBS, Optoquest Co., Ltd.) の3次試作機を、それぞれ用いた。VBSは、空間光変調器 (spatial light modulator, SLM) システムを有するスペクトル合成器である。VBSの透過制御を利用して、VBS出力スペクトル成分が、20 GHzもしくは40 GHz間隔になるように光スペクトルアナライザ (optical spectrum analyzer, OSA) で観測しながら、透過率の調節を施した。同時に時間多重された光時間波形を、光サンプリングオシロスコープ (optical sampling oscilloscope, OSO) で測定した。

図4に、VBSの透過制御を行った出力スペクトルと時間波形を示す。10 GHzから20 GHzへの多重では、VBSの隣接するチャンネルの干渉により、MLLD発振波長成分付近の最大強度比は、+4 dBであった。時間波形の強度成分の間隔は、ほぼ50 psと見積もられた。ただし、一方の波形形状が、2つに割れた様になっている。これは、チャンネル干渉により、消光できなかった10 GHz成分

の影響で現れたと推定した。(b)の時間波形の破線は、(a)の強度スペクトル分布測定データを、計算シミュレータに取り込んで、それに逆フーリエ変換を施して得られた時間波形である。実験値と計算値の形状は、よく一致している、その一方で、強度の不一致が、大きい。これは、強度制御時に発生する位相変動の影響と推定した。

続いて、10 GHz から 40 GHz への多重では、図 4 (c) よりスペクトル強度成分のうち、MLLD 発振波長を中心に 40 GHz (0.32 nm) 間隔で存在する成分に対する、その他の成分との比を、最大で+16 dB 程度にすることができた。(d) のパルス時間波形の強度成分の間隔は、ほぼ 25 ps となっている。実験値と計算値を比較すると、強度とその形状は、概ね一致している。これは、20 GHz の時より、チャンネル干渉の度合いが、和らいだと推定した。以上より、光時間多重可能な最低周波数を 40 GHz とみなし、ゲート実験および計算検証に用いる信号周波数を 40 GHz とすることにした。

また、エルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) の増幅自然放出 (ASE) 出力光を VBS への入力光源とし、透過制御した場合、単一チャンネル、隣接する複数チャンネル操作時で、それぞれ、+13 dB、+22 dB の最大強度消光比を得た。周波数分解能とチャンネルの透過波長の波長依存性を、図 5 に示す。チャンネル周波数間隔は、長波長側ほど、短

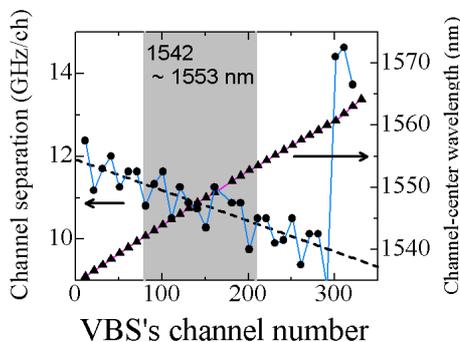


Fig. 5. Channel spectral resolution and channel-center wavelength.

くなっている。ただし、300 チャンネル以降では、急激に間隔が、広がっている。これらは、回折格子が分散特性を持つ為である (VBS 開発者の話より)。一方、透過中心波長は、チャンネル番号の増加に対して、ほぼ一定割合で増加している。ただし、300 ch 以降では、その増加の割合が大きくなっている特徴を持つ。以上、透過特性だけから判断すると、ON-off 比の低い 1552 nm やチャンネル間隔が広い 1560 nm 付近から離れた波長の cw 光を用いてゲート検証を行うのが、良いと判断できる。

3.2 VBS 特性を考慮した計算シミュレーション

3.1 節の結果に従って、パルス幅 2.9 ps、繰り返し周波数 40 Gb/s パルスに対する、最大消光比+22 dB に設定したスペクトル合成型波長変換の計算検証を行った。比較の為、遅延時間 5 ps の DISC 型波長変換の場合も検証した。計算検証には、2005 年度に中本亮一氏が、卒業研究で製作したシミュレータ^{7, 11}を用いた。SOA の第 1 及び第 2 緩和時定数、チップ非飽和利得は、実験検証に使用する予定の SOA の実験値を参考に、それぞれ 30 ps、5 ps、+15.5 dB とした。図 6

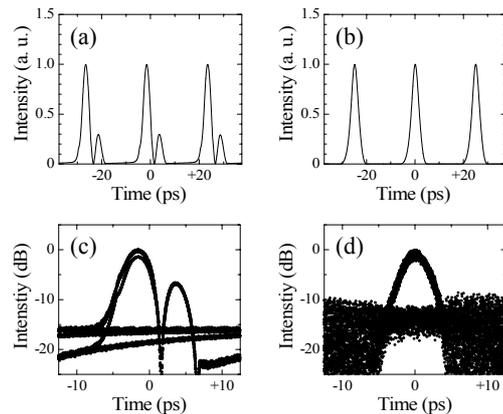


Fig. 6. Waveforms and eye-diagrams at the output of our all optical gates.

- (a), (c): with the delayed-interference (DISC) scheme.
- (b), (d): with the optical-spectrum-synthesizer (OSS) scheme in Fig. 2.

(a)、(b)に、クロックパルス列に対する DISC 型ゲート出力時間波形、OSS 型ゲート出力時間波形を、それぞれ示す。図 (a) で、第 2 時定数が引起す強い波形歪を確認した。図 (b) では、歪を殆ど確認できず、信号雑音強度比 (signal to noise ratio, SNR) は、約+30 dB と見積もられた。図 6 (c)、(d) は、信号長 $2^{31}-1$ 擬似ランダムデータパルスに対する DISC 型と OSS 型それぞれのゲート出力アイ・ダイアグラム (1010 bit 重ね合わせ) を表している。図 (c) に、クロックパルス入力時と同様、強い波形歪を確認できる。一方、図 (d) には、ほぼ波形歪は見られないが、(b) のクロックパルス入力では確認されない大きな背景雑音が、生じている。これは、ゲート出力強度スペクトルの中心波長成分だけの強度が、相対的に強く現れること⁷に原因があると推測している。以上より、強度消光比+22 dB の VBS 試作機を用いて、少なくとも波形歪を充分解消できると判断した。

4. 全光波長変換ゲート検証実験

実験構成図を図 7 に示す。2.0-ps、10-GHzMLLD 出力を光時間多重器 (OTDM-MUX) で 40-GHz に多重した光クロックパルス信号光 (波長: 1550-nm) と、可変レーザによる cw 光 (波長: 1545-nm) を、SOA モジュール (注入電流 100 mA) に同時に入射した。パルスと cw 光の SOA への入射強度を、それぞれ+1.8 dBm (38 fJ)、-4.9 dBm とした。SOA のファイバ利得は、+12 dB、第 1 緩和時定数と第 2 緩和時定数は、それぞれ 30 ps、5 ps であった。SOA 内で XGM と XPM を受けた cw 光のみが、5 nm 帯域幅のフィルタを透過し、マッハツェンダ干渉計 (MZI) (またはスペクトル合成器である VBS) に入射される。従来方式の DISC 型ゲートは、SOA、OBF、MZI で構成され、MZI 内の複屈折結晶のカルサイトで、5.0 ps の遅延時間を与える。

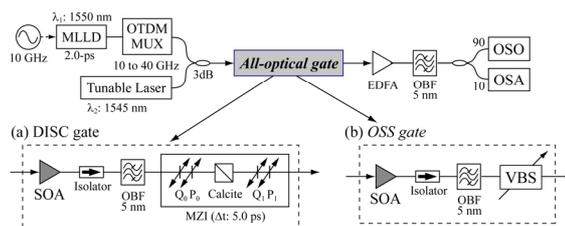


Fig. 7. Experimental setups of the two alternative all-optical gate schemes.

- (a) the conventional DISC gate.
- (b) the optical-spectrum-synthesizer (OSS) gate

SOA: semiconductor optical amplifier, OBF: optical band-pass filter, Q: quarter-wave plate, P: polarizer, OSO: optical sampling oscilloscope, OSA: optical spectrum analyzer, VBS: variable bandwidth spectrum shaper.

本研究では、3.1 節で特性評価した VBS 試作機を用いて OSS 型ゲートを構築した。VBS は最大強度消光比: +22 dB、最大位相制御量: 2π 、周波数分解能: 9.7 GHz ~ 11.8 GHz の性能を有している。独自方式の有効性を検証するため、3.2 節で得られた設計値に従った強度・位相プロファイルを VBS に施した。

図 8 (a) と (b) に、MZI 出力スペクトルと時間波形を示す。図 8 (a) で、実験値のスペクトルの包絡線は、破線で表したパルス幅 3.6-ps のフーリエ変換限界 sech^2 パルスに近い分布を取っている。短波長成分に比べ、長波長成分群の大きな不一致は、時間位相計算部分に簡易理論モデルを採用している為と推定した。図 8 (b) の測定時間波形に、第 2 時定数誘起の強い波形歪が見える。歪の特徴的な形状に関して、実験値と計算値はよく一致している。また、パルス間の強度雑音の大部分は、MZI で消し切れなかった残留位相成分によるものと推定した。

強度・位相スペクトルの設計値から、主に第 1 ~ 第 3 長波長スペクトル成分の強度を減衰させた場合の VBS 出力スペクトルと時間波形が、図 8 (c)、(d) である。図 8 (c) で、時間波形歪は解消されており、

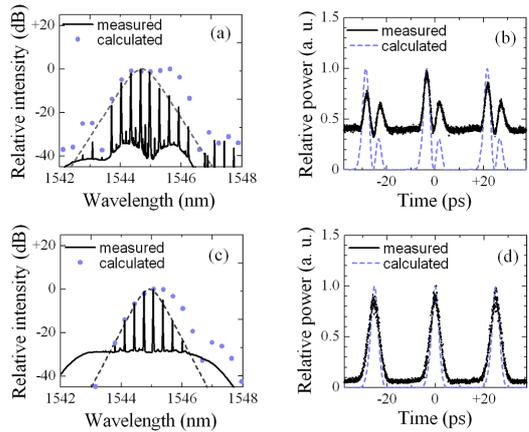


Fig. 8. Measured (solid) and calculated (dotted, dashed) optical spectra and waveforms at the output of all-optical gates with 2.0-ps, 40-GHz, 38-fJ clock input pulses.

- (a), (b): with the DISC scheme (i.e., without spectrum synthesis).
- (c), (d): with the OSS scheme after empirically adjusting the intensity of the red-spectrum components from theoretical profile.

このときのパルス幅と SN 比は、それぞれ 5.0 ps と 10 dB であった。図 8 (d) のスペクトル包絡線は、4.4-ps フーリエ変換限界 sech^2 パルス (破線) とよく一致している。時間波形がスペクトル包絡線に比べ、広がっているのは、実験で用いた OSO の時間分解能限界 (< 800 fs) の為である。また、設計値から調整を要したのは、VBS のチャンネル間の干渉と、強度制御時に伴う位相変動によるものと推定した。

5. 300ギガビットゲート検証用短パルス生成実験

300 Gb/s ゲート検証に向け、短パルス発生実験を行った。実験構成を図 9 に示す。本研究では、分散減少ファイバ (DDF) を用いたソリトン断熱パルス圧縮を試した。図 10 (a) に、圧縮パルスの自己相関波形

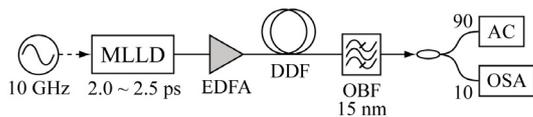


Fig. 9. Experimental setup to generate compressed pulses. DDF: dispersion decreased fiber, AC: auto-correlator.

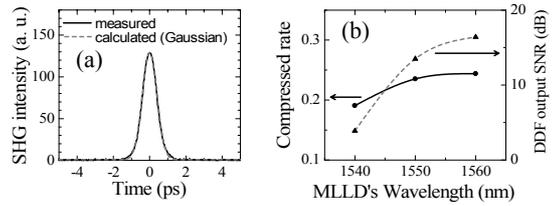


Fig. 10. Experimental results of pulse compression using DDF.

- (a): auto-correlation trace (MLLD's $\lambda = 1560$ nm).
- (b): pulse's wavelength dependence of pulse compressed rate and DDF output OSNR. (solid line: compressed rate, broken line: DDF output OSNR).

ス波長依存性を示す。入力パルス波長を 1560 nm にした場合、最短でパルス幅 660 fs、消光比+16 dB のペデスタルを抑制した圧縮パルスを得た。圧縮率や信号雑音比が、入力 MLLD パルス波長に依存するのは、DDF の分散プロファイルが波長に対して一定で無いことや、入力パルス幅が、波長依存性を持つことによると推定した。ただし、圧縮パルスは、DDF の熱膨張によるシンセサイザのトリガ信号との相対タイミングジッタを含んでいる為、OSO で正確に波形を観測することが、できなかった。代わりに、デジタル・サンプリング・オシロスコープで観測した光電 (O/E) 変換後の圧縮パルスのアイ・ダイアグラムを示す。図より、シンセサイザとの相対タイミングジッタは、RMS 値で 2.34 ps と見積もられた。圧縮光パルスを O/E 変換した電気信号を、トリガ信号に用いることで、タイミングジッタを

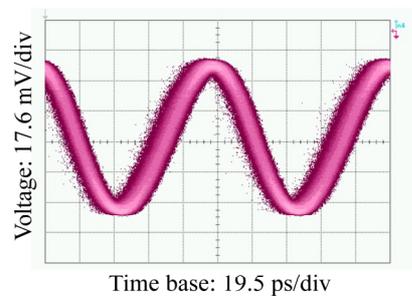


Fig. 11. Eye-diagrams of compressed pulses after O/E conversion measured by digital sampling oscilloscope.

低減できると予想している。

6. まとめ

一般半導体材料特有の第2緩和時定数が、引起す強い波形歪を、従来の DISC 方式からスペクトル合成方式に切替えることで解消できることを実験的に検証した。強度と位相スペクトルプロファイルを設計値から僅かに調整する事で、SN 比 10 dB の歪の無い波形を得た。設計値と VBS 試作機との間に生じる調整の必要性は、VBS の強度制御時に伴う位相変動とチャネル間の干渉によると推定した。また、300 Gb/s ゲート検証に向け、短パルス発生実験を行い、パルス幅 660 fs、消光比+16 dB のペDESTAL を抑制した圧縮パルスを得た。以上より、300 Gb/s OSS 型ゲート実験検証の第1段階成果として、40-GHz クロックパルス入力時に、第2キャリア時定数によって生じた強い波形歪の解消を実験的に達成した。周波数領域上での光パルス波形整形技術は、素子の応答速度に強く依存する時間領域上での整形より、信号周波数の増大に対して、寛容であり、OSS 方式を用いれば、300 Gb/s を超える SOA 全光ゲート実験実証を十分に達成できると言える。また、本研究で利用した光学系の大きな SLM システムの代わりに、AWG やフォトニック結晶を用いることで、集積化可能である。

謝辞

本研究を進めるに当たり、実験機器の提供や実験構成への助言を下された情報通信研究機構の品田 聡 氏、和田 尚也 氏、牧野 健 氏、住本 浩之 氏に対し、また、VBS 試作機に関する討議や援助に関して、オプトクエスト社の朴 成哲 氏、依田 琢也 氏に深く感謝致します。

引用文献

- [1] S. Nakamura *et al.*, IEEE Photonics Technol. Lett. **13**, 2001, 1091-1093.
- [2] Y. Liu *et al.*, IEEE J. Lightwave Technol. **25**, 2007, 103-108.
- [3] S. Nakamura *et al.*, Appl. Phys. Lett., **78**, 2001, 3929-3931.
- [4] J. Mørk *et al.*, IEICE Trans. Electron. **E87-C**, 2004, 1126-1132.
- [5] H. Yoshida *et al.*, IEICE Trans. Electron. **E87-C**, 2004, 1134-1141.
- [6] H. Nakamura *et al.*, Optics Express, **12**, 2004, 6606-6614.
- [7] Y. Ueno *et al.*, Optics Express, **14**, 2006, 12655-12664.
- [8] K. Takiguchi *et al.*, OFC 2004, Los Angeles, USA, Tu15.
- [9] M.J.R. Heck *et al.*, IEEE J. Quantum Electron. **44**, 2008, 370-377.
- [10] S. Anzai *et al.*, OFC/NFOEC 2008, San Diego, 2008, JthA25.
- [11] 中本 亮一、「高速波長変換出力の光スペクトル合成方式の研究」、電気通信大学卒業論文、2006年3月。