

1. 研究背景

近年の情報通信量増加に伴い、超高速かつ大容量な通信技術が必要とされてきている。この超高速かつ大容量通信を実現させるための全光デバイスの1つである半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) とマッハツェンダ干渉計 (Mach Zehnder Interferometer, MZI) を含む遅延干渉型全光波長変換器 (Delayed Interference Signal-wavelength Converter, DISC) は、超高速応答が可能であり、低パワー消費で素子も小型であるために集積化可能という長所がある。しかしながら、パルス幅 2 ps 以下の短光パルスを DISC 型全光ゲートに入力すると、キャリアヒーティング[1,2]等による第二緩和時定数の発生でゲート出力パルスに歪を発生させる原因となることが明らかになっていた[3]。そこで、新たに光スペクトル合成 (Optical Spectrum Synthesizer, OSS) 型全光ゲートが考案された。OSS 型全光ゲートは DISC ゲートの MZI をスペクトル合成フィルタに置き換えた構成で、時間領域ではなく周波数領域において強度・位相スペクトルを制御するため、ゲート動作の高周波数化に対して容易に対応させることが可能である。また、この方式では繰り返し周波数 40 GHz、FWHM (Full Width Half Maximum : 半値全幅) 2 ps のクロックパルス入力の際、実験的に波形歪の解消に成功している[4]。

本研究では、サブピコ秒クロックパルスをゲート入力した際に出力波形歪を解消するためのスペクトル合成フィルタを作成することを目的とした。

2. 原理

2.1 光スペクトル分離・合成制御を用いた光パルス波形整形技術

液晶空間光変調素子 (Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM) を利用するパルス整形システムについて説明する。LC-SLM の構成を図 1 に示した。入力された光データパルスは回折格子で波長 (周波数) 毎に分光され、レンズを介して LC-SLM 部に入射される。LC-SLM には振幅制御用と位相制御用の二つのネマティック液晶マスクが存在し、液晶は制御波長数に応じた複数のセルから構成され、各セル毎に独立して制御可能である。複屈折率を持つネマティック液晶分子は細長い形をしており、電界が印加されない時は配向膜で定められた方向に沿って整列している。電界強度の強弱により、液晶分子に対して回転角を持たせることが可能であり、振幅と位相を制御することができる。これを複数のセルに対して個別に制御することで、求める特性のスペクトルフィルタを作成する。そして最後に、振幅変調と位相変調を受けた LC-SLM 透過光はレンズと回折格子により光束を狭められて出力される。

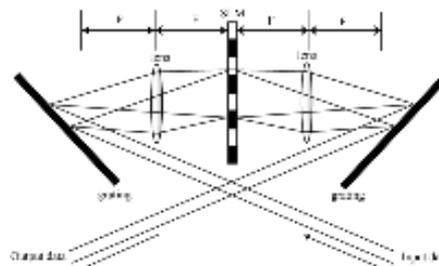


図 1 LC-SLM の構成

2.2 OSS 型全光ゲートの構成と原理

光スペクトル合成 (OSS) 型全光ゲート動作原理について説明する。出力強度スペクトルと位相スペクトルが特定の条件を満たす際に、消光比が高く、波形歪のないゲート出力波形を得られることがわかっている。その条件とは、強度スペクトルにおいては「スペクトル成分群の包絡線がガウシアン曲線を描く」ことであり、位相スペクトルにおいては「相対強度の高い周波数領域内のスペクトル成分群が直線位相特性を持つ」ことである[5,6]。従って、ゲート出力スペクトルがこれらの条件を満たすように OSS の透過・位相プロファイルを設計すればよい。

具体的な代表例として図 2 に示す。図 2 (a) (b) は SOA 出力強度・位相スペクトル分布を、(c) (d) は OSS 透過・位相スペクトルを、(e) (f) は OSS ゲート出力強度・位相分布をそれぞれ表している。図 2 (a) がガウシアン曲線を描くように (c) のような OSS 透過スペクトルを、(b) が直線位相特性を持つように (d) のような OSS 位相スペクトルを作用させると、(e) (f) のような OSS 出力強度・位相スペクトルが得られる。そうして出力された OSS ゲート出力ダイアグラムは図 3 のようになっている。

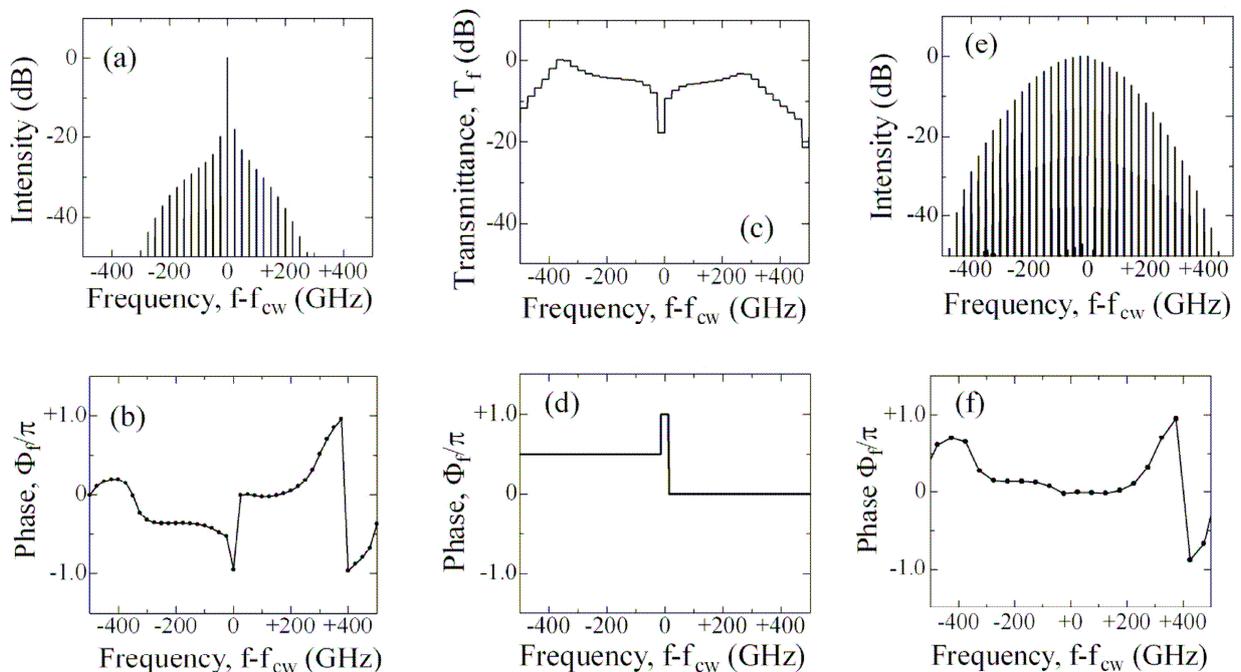


図 2 OSS 型全光ゲートスペクトル制御

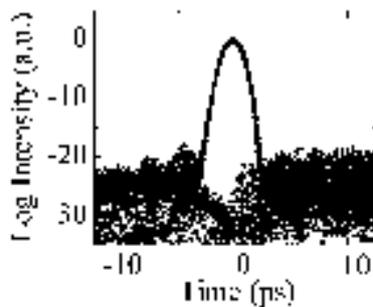


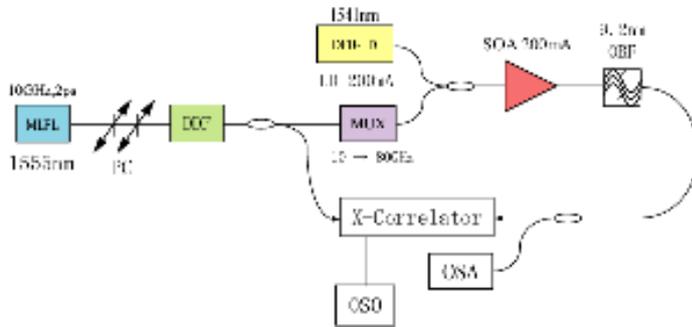
図 3 OSS 型全光ゲート出力ダイアグラム

3. 実験方法

3.1 XGM 波形の観測

実際に、中心波長 1555 nm、繰り返し周波数 80 GHz、FWHM 800 fs のクロックパルスと、中心波長 1541 nm の cw (continuous wave) 光を SOA に同時に入射し、得られた XGM (Cross Gain Modulation, 相互利得変調) 波形を基に、シミュレータを用いて実験を行った。XGM 波形を観測するときの実験構成を図 4 に示した。また、透過フィルタと位相フィルタのプロファイル、および実験結果の検証にはスペクトル合成シミュレータ[6]を用いたのだが、本研究で用いたシミュレータは上野教授が主な基盤部分を作成し、所属学生らが拡張しているシミュレータを利用した。

まず、実験で観測した XGM 波形に、シミュレータを用いてフィッティングを行い、第一、第二緩和時定数を決定した。それらを基に、SOA 出力スペクトルをシミュレータで算出する。算出されたスペクトルが 2.2 節で述べたようなスペクトルになるように位相変調量を調節して、OSS ゲート出力強度・位相スペクトル合成フィルタを作成する。それらを SOA 出力スペクトルに掛け合わせることで理想的なスペクトルを作り、OSS ゲート出力波形を得た。



- SOA: InPhenix IPSAD1501
- DFB-LD: AVANEX A1905LMI
- MLFL: モードロックファイバレーザ
- DDF: 分散減少ファイバ
- DFB-LD: レーザダイオード
- SOA: 半導体光増幅器
- OBF: 光バンドパスフィルタ
- MUX: 多重器
- OSA: 光スペクトルアナライザ
- OSO: 光サンプリングオシロスコープ
- PC: 偏光板

図 4 XGM 波形観測実験構成

4. 実験結果

図 5,6 はシミュレータを用いて算出した OSS ゲート出力透過・位相スペクトルフィルタである。図 5 において、強度スペクトルの中心周波数付近の包絡線がガウシアン曲線を描いているのがわかる。同様に、図 6 では位相スペクトルが直線特性を持っているのがわかる。これらのスペクトルを逆フーリエ変換して得られる OSS ゲート出力時間波形を次に示した。

シミュレータによって得られた DISC と OSS ゲート出力パルス波形と消光比をそれぞれ比較したものを図 5 に示した。DISC に比べて OSS ゲートでは波形歪を抑制することができている。また、消光比は DISC では +7 dB であったが、OSS では +20 dB まで向上できた。図 6,7 では、SOA に入力するパルス光強度や cw 光強度毎による OSS ゲート出力波形を比較したものである。これらの図より、入力条件に関わらず OSS ゲート出力波形歪を抑制できる可能性があると言える。

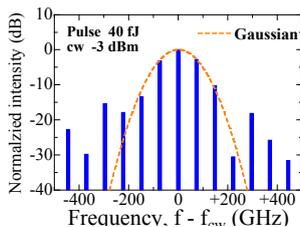


図 5 OSS ゲート透過スペクトルフィルタ

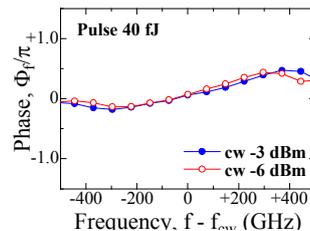


図 6 OSS ゲート位相スペクトルフィルタ

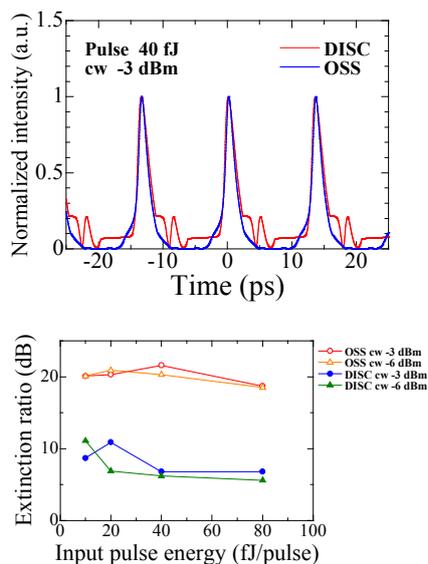


図7 DISC と OSS ゲート
出力波形比較(上)
条件毎の消光比(下)

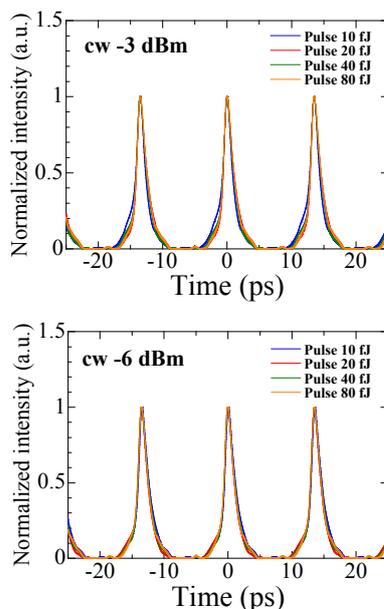


図8 入力 cw 光強度毎の
OSS 出力パルス

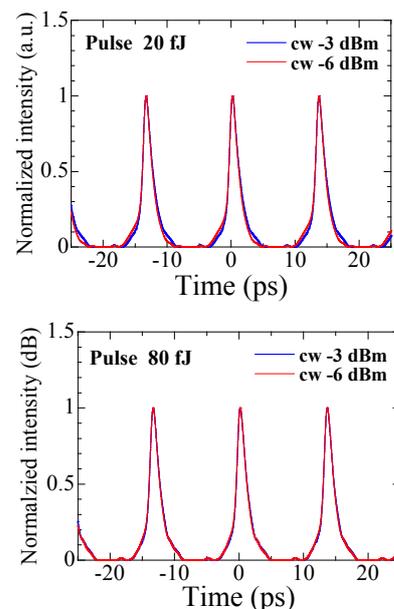


図9 入力パルス強度毎の
OSS 出力パルス波形

5. 結論

DISC 型全光ゲート内部の SOA へ cw 光とパルス幅 800 fs のサブピコ秒光クロックパルスの同時入力の際、相互相関波形に現れる第二緩和時定数が起因の波形歪を OSS 型全光ゲートであれば抑制できることを論理的検証によって示すことができた。出力されたクロックパルスはパルス裾部分と立ち下がり部分に僅かな歪が見られるものの、消光比+20dB を得ることが出来た。

シミュレーション上では位相制御の際、中心スペクトル、中心スペクトルより短波長側・長波長側の 3 パターンを各々まとめてしか調節することは出来なかった。しかし、VBS 実機では周波数間隔 10 GHz で強度 (消光比+40 dB) ・位相 (位相変調分解能 0.01 rad/π) 調節が可能なので、さらに精密に制御することによって波形歪をより抑制することができると考えられる。

本研究の実証実験は VBS を用いるものであり、現在共同研究を行っている情報通信研究機構光フotonics ネットワークシステム研究室での実験となる。今回行ったシミュレーションの結果を基に実際の VBS を用いることで、入力されたサブピコ秒光クロックパルスが OSS 型全光ゲートから出力されたとき、シミュレーション通りに波形歪を抑制することが可能であるのかを確かめる実験実証が必要である。

参考文献

- [1]J. Mørk et al., "Theory of the ultrafast optical response of active semiconductor waveguides," J. Opt. Soc. Am., 1996
- [2]J. Mørk et al., "The Role of Fast Carrier Dynamics in SOA Based Devices," IEICE Trans. Electron., 2004
- [3]S. Nakamura et al., "Femtosecond switching with semiconductor-optical-amplifier-based Symmetric Mach-Zehnder-type all-optical switch," Appl. Phys. Lett., 2001
- [4]西田 武洋, 「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」,平成 21 年度修士論文
- [5]Y. Ueno et al., "Optical-spectrum-synthesizer design within an all-optical semiconductor gate to reduce waveform distortion induced by carrier-cooling relaxation at sub-Terahertz frequencies," Optics Express, 2006
- [6]Y. Ueno et al., "Spectral Phase-Locking in Ultrafast All-Optical Mach-Zehnder-Type Semiconductor Wavelength Converters," Jpn. J. Appl. Phys., 1999