

平成 15 年度 卒業論文

光 3R ロジックゲートにおける  
ジッタ耐性と波長チャープ特性の研究

学籍番号 0012074

鈴木 励

電子工学科 光エレクトロニクス講座  
指導教官 上野芳康 助教授  
提出日 平成 16 年 2 月 27 日

## 概要

光のみを用いて信号再生する干渉型全光ロジックゲートの研究が進められている。最近では、干渉型全光ロジックゲートの 1 種である対称マッハツェンダ - ( Symmetric Mach-Zehnder, SMZ ) 型全光ロジックゲート[1]の強度雑音抑制作用・入力タイミング耐性・周波数スケール則の理論解析結果が報告[2]された。本研究ではさらに、ジッタ抑制作用、波長チャープ特性について報告する。SMZ 型全光ロジックゲートに入力する擬似ランダム RZ 信号の全ビットに正規分布の擬似ランダムタイミングジッタを与えたところ、明確なジッタ抑制作用が見出された。また、ゲート出力をさらに線形分散伝送路 ( $D = \pm 15.7$  ps/nm.km) に伝送した後の信号波形を数値計算し、SMZ 型全光ロジックゲートが RZ 信号に与える波長チャープの影響について検討した。

## 目次

第一章	序章	1
第二章	研究の背景	2
	2.1 本研究の技術分野	2
	2.2 従来の超高速光通信デバイス	2
	2.3 干渉型全光ロジックゲート	3
	2.3.1 動作原理	3
	2.3.2 ゲート動作の基礎方程式	4
	2.3.3 これまでの超高速ゲート研究結果	9
	2.4 波長チャープの定義	12
	2.5 光パルス伝送の原理	15
	2.5.1 チャープを持たない光パルスの伝送	15
	2.5.2 線形チャープを持ったパルスの伝播	15
第三章	本研究の目的と方法	20
	3.1 目的	20
	3.2 方法	21
	3.2.1 既存の半導体光ロジックシュミレータ	21
	3.2.2 新規に作成したシュミレータ	21
第四章	光3Rロジックゲートのタイミングジッタ耐性	23
	4.1 光3Rロジックゲートによるタイミングジッタ抑制作用	23
	4.1.1 3R後の残留するタイミングジッタの評価	23
	4.1.2 3R後の強度雑音への変換	27
	4.2 信号パルス幅を変化させた時のタイミングジッタ耐性	27
	4.2.1 パルス幅を4psにしたときの最適条件	32
	4.2.2 パルス幅を4psにしたときのタイミングジッタ耐性	32
	4.3 パターン誘起雑音	35
第五章	光3Rロジックゲートの波長チャープ特性	37
	5.1 光3Rロジックゲート出力の波長チャープによる光パルスの歪み	38
	5.2 サイドパルスの起源	44
第六章	結論	55
	謝辞	56
	参考文献	57
	付録 各サブルーチンのソースファイル	

## 第1章 序章

高速光信号（または、高速 TDM 光信号）を数千 km 伝送するためには、タイミングのズレ（タイミングジッタ）や波形の歪み、ピーク値の減衰など劣化した信号を元のきれいな信号に直しながらか中継する必要がある。現在の商用システムでは、光信号を電気信号に変換し、電子回路で 3R（Re-timing, Re-shaping, Re-amplifying）再生し、電気信号を光信号に再度変換して中継伝送している。Re-timing はタイミングジッタの補償、Re-shaping は光パルス波形歪みの補償、Re-amplifying はピーク値の減衰の補償である。電子回路を用いた信号再生では、電子的にキャリア寿命などの物理的制限要因により、光通信の高速性が十分に生かされていない。よって、全光ロジックゲートによる全光 3R 信号再生への応用が期待されている。このような全光 3R 信号再生を目的とした全光ロジックゲートを全光 3R ゲートと呼ぶ。

全光 3R ゲートによる信号再生が今まで活発に研究され、実験研究では 10~80 Gb/s でのタイミングジッタ耐性が実証[3,4]され、理論解析では強度抑制作用が検証[2]された。しかし、これらのタイミングジッタ耐性を理論解析した報告や波形の乱れの原因である波長チャープに関する研究が乏しかった。

本研究では、SMZ 型全光 3R ゲートのタイミングジッタ耐性、波長チャープ特性を検証する。

## 第2章 研究の背景

### 2.1 本研究の技術分野

近年、インターネット、携帯電話の普及などにより、通信ネットワークの大容量化、高速化が求められている。通信ネットワークを物理層で支えているのは光ファイバ通信技術である。光ファイバ通信システムは、150Mbps, 600Mbps, 2.4Gbps, 10Gbps と順次、高速化していった。しかし、現在の商用光ファイバ通信システムでは、3R再生として用いている電子回路のボトルネックのために40GHz程度で速度限界をまねいてしまう。この速度限界以上の40Gbps、160Gbpsなどの速度を実現するために電子回路を使わない全光3R再生が期待されている。また、全光3R再生では、構造が単純なため、電子回路を用いた3R再生よりも消費電力が小さくなるといったメリットもある。

### 2.2 従来の超高速光通信デバイス

従来の超高速光通信デバイスは送信器、中継器などがある。送信器は、強度変調をもちいており、LD直接変調方式と外部変調方式の2つがある。LD直接変調方式は、半導体レーザの注入電流を送信信号系列にしたがって変調することで強度変調を行う。この方式は、低コストであるが、変調に伴い信号光の発振波長の変化（波長チャ-ピング）がおり、伝送距離が制限されてしまう。外部変調方式は、LDを発振源としてのみ用いられ変調を別途に行う方式である。この方式では、狭スペクトル単一モード発振LDとLiNbO<sub>3</sub>変調器や半導体光変調器などの外部変調器を用いて構成される。この方式を用いた送信器は、高コストになるが、波長チャ-ピングなどは直接変調器に比べ、小さい。

中継器は、光増幅中継（1R再生）と再生中継（3R再生）の2種類がある。光増幅中継では、エルビウム添加光ファイバを用いて、光ファイバの損失などの影響で減衰した光信号の増幅を行っている。しかしながら、この中継はアナログ的な中継であるため、波形歪み、雑音、タイミングジッタなどの劣化要因を蓄積してしまう。再生中継は、いったん光信号を受信し、符号1,0を電気回路により識別したのち、識別された信号で半導体レーザを強度変調して送出していた。しかしながら、この中継は電子回路を用いているので、キャリア寿命などの電子的な要因により40GHz程度で速度限界を招いてしまう。

## 第6章 結論

本研究では、対称マッハツェンダー型光3Rロジックゲートの主要機能の1つであるランダムタイミングジッタ抑制能力、および、ゲート出力信号パルスに加わる微小な波長チャープ量を、世界で初めて理論解析した。(これらの個別機能に関する体系的な実験研究結果は、いまなお報告されていない。)

ランダムタイミングジッタ抑制能力の解析においては、ゲート入力信号列に正規分布乱数に従う擬似ランダムタイミングジッタを与え、ゲート出力信号列に残留するタイミングジッタ分布の標準偏差値を評価した。初期の解析では、信号パルス幅を2ps(信号周波数=42GHz)と意図的に狭く設定した。解析の結果、18~27%程度のタイミングジッタ抑制作用が予測された。

出力波長チャープの解析においては、3Rゲートから出力される信号パルス波形全域の瞬時波長分布を求め、信号パルスの線形波長チャープ量と非線形波長チャープ量を解析した。また、3Rゲート出力信号を線形分散ファイバーに伝送すると、(パルス拡がりに加えて)波形歪みが発生した。本研究では、線形分散伝送に伴う波形歪みをシミュレーションすることにより、非線形波長チャープの影響評価を試みた。解析の結果、サイドパルスは強度波形歪みと強度波形歪みが持つ波長チャープが起源であると考えられた。

## 謝辞

本研究を進めるに際し、懇切なるご指導を賜りました上野芳康助教授に深く感謝をします。また、合同セミナー等を通じて、多くの刺激を与えてくださった來住直人助教授、坂本助手、來住研究室や河野研究室の皆様にご感謝します。

また、同じ上野研究室の皆様には常日頃より研究に対する非常に有益なご意見、激励を受け、大きな励みとなりました。

## 参考文献

1. L. Billes, J. C. Simon, B. Kowalski, M. Henry, G. Michaud, P. Lamouler, F. Alard, "20 Gbit/s optical 3R regenerator using SOA based Mach-Zehnder interferometer gate," in the technical digest of the 23rd European Conference on Optical Communications (ECOC '97), Edinburgh, Scotland, Sept. 22-25, 1997, vol. 2, pp. 269-272.
2. Y. Ueno, 'Theoretically predicted performance and frequency-scaling rule of a Symmetric-Mach-Zehnder optical 3R gating,' Opt. Comm. vol. 229, pp. 253-261, Jan. 2004.
3. Bing C. Wang, Lei Xu, Varghese Baby, Deyu Zhou, Robert J. Runser, Ivan Glesk, Paul R. Prucnal, "Experimental study on the regeneration capability of the terahertz optical asymmetric demultiplexer," Optics Communications 199., vol. 15, pp83-88, Nov. 2001.
4. Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, 'Penalty-free error-free all-optical data pulse regeneration at 84 Gb/s by using a Symmetric-Mach-Zehnder-type semiconductor regenerator,' IEEE Photonics Technol. Lett. vol. 13, no. 5, pp. 469-471, May 2001.
5. Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, 'Nonlinear phase shifts induced by semiconductor optical amplifiers with control pulses at repetition frequencies in the 40-160 GHz range for use in ultrahigh-speed all-optical signal processing,' J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 19, no. 11, pp. 2573-2589, Nov. 2002.
6. Y. Ueno, S. Nakamura, K. Tajima, and S. Kitamura, "3.8-THz Wavelength Conversion of Picosecond Pulses Using a Semiconductor Delayed-Interference Signal-Wavelength Converter (DISC)" IEEE Photonics Technol. Lett. vol. 10, No. 3, pp.346-348, March 1998.
7. S. Nakamura, Y. Ueno, K. Tajima, J. Sasaki, T. Sugimoto, T. Kato, T. Shimoda, M. Itoh, H. Hatakeyama, T. Tamanuki, and T. Sasaki, 'Demultiplexing of 168-Gb/s data pulses with a hybrid-integrated symmetric Mach-Zehnder all-optical switch,' IEEE Photonics Technol. Lett. vol. 12, No. 4, pp.425-427, April 2000.
8. M. Tsurusawa, R. Inohara, K. Nishimura and M. Usami, "Operation margin of all-optical regenerator at 40 Gbit/s by SOA-based polarization discriminated switch," Proc. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC 2003), Atlanta, USA, Paper ThX3, Mar. 2003.
9. H.J. Thiele, A.D. Ellis, and I.D. Phillips, "Recirculating loop demonstration of 40 Gbit/s all-optical 3R data regeneration using a semiconductor nonlinear interferometer," Electron. Lett., vol. 35, no. 3, pp. 230-231, Feb. 1999.

10. A.J. Poustie, K.J. Blow, and R.J. Manning, "All-optical regenerative memory for long term data storage," *Opt. Comm.*, vol. 140, pp. 184-186, August 1997.
11. 鈴木励、永末洋平、豊田将志、上野芳康、「SMZ 型 光 3R ゲートのランダムジッタ抑制作用と出力波長チャープ特性」、第 51 回応用物理学関係連合講演会、2004 年 3 月、東京工科大学(投稿中)。