

平成 14 年度 卒業論文

超高速光ロジックゲートにおける光干渉バイアス設計

学籍番号 9810012

一戸 澄雄

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 15 年 2 月 6 日
-----	-----------------

概要

光電変換やトランジスタの周波数を超える 100Gb/s 以上の時間多重光信号を多重解除 (demultiplex) 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、全光ロジックゲートの干渉位相バイアスを最適化する新しい制御方式が提案された。この新方式では、干渉位相バイアス変動に伴って監視光出力スペクトルが非対称化する現象が利用されている。本研究では、ゲート窓の波形、出力に対する利得、位相の変化などに着目し、非対称化メカニズムの要因分析を行った。

目次

第1章	序論	1
第2章	研究の背景	2
2.1	本研究の技術分野	2
2.2	従来技術の超高速光通信デバイス	2
2.3	SMZ 型超高速ゲート	6
2.3.1	動作原理	6
2.3.2	これまでの超高速ゲート研究結果	9
2.3.3	これまでの位相バイアス最適制御研究結果	12
第3章	本研究の目的と方法	15
3.1	目的	15
3.2	SMZ ゲート動作の基礎方程式	16
3.3	ゲートの動作要因	17
3.4	解析に使ったシミュレータ	19
3.4.1	半導体光ロジックシミュレータ	19
3.4.2	要因分析シミュレータ	24
第4章	干渉バイアスとスペクトルの非対称性	26
4.1	ゲート窓の急峻性の影響	26
4.2	利得の影響	30
4.3	干渉と位相	35
4.4	出力波形と出力スペクトルのパワー分布の対応関係	42
第5章	位相の変化の影響	44
5.1	スペクトルの最適バイアスの場合との差分	44
5.2	正規化差分スペクトル $S_{norm}(\lambda)$ の非対称性	47
5.3	非対称の要因	51
5.4	緩和波形による違い	53
第6章	結論	61
	謝辞	62
	参考文献	63
付録 1	要因解析シミュレータのソースファイル	
付録 2	擬似ランダム 2 進列作成プログラム	

図目次

- 図 2.2.1 40GHz 光変調器の例
- 図 2.2.2 WDM を使った光伝送システムの例
- 図 2.2.3 10.9THz での伝送における光スペクトル
- 図 2.2.4 サンプリングオシロスコープの例
- 図 2.2.5 サンプリングオシロスコープの原理
- 図 2.3.1 SMZ 全光ロジックゲート
- 図 2.3.2 制御パルスの入力とキャリア密度
- 図 2.3.3 SMZ 全光ロジックゲートを使った Demux
- 図 2.3.4 SMZ 全光ロジックゲートの制御パルスを符号化した場合の応用例
 - 図 2.3.3.1 予想されたバイアスが変動した場合のスペクトル
 - 図 2.3.3.2 実測されたバイアスが変動した場合のスペクトル 位相バイアス(a)+0.21 π (b)最適値(c)-0.13 π
- 図 3.3.1 電流が入力されている状態のキャリア密度
- 図 3.4.1 制御パルスの利得とキャリア密度
- 図 3.4.2 基準動作条件でのゲート出力
 - 図 3.4.2.1 干渉シミュレータの最適値での出力
- 図 4.1.1 制御パルス幅とゲート窓の急峻性 制御光パルス FWHM (a)2ps (b)0.2ps
- 図 4.1.2 ゲート窓の急峻性とスペクトルの非対称性 位相バイアス(a)0.9352 π (b)1.0651 π (c)1.2752 π
- 図 4.1.3 制御パルス幅と非対称度
- 図 4.2.1 G1=7000,G2=700 におけるスペクトル 位相バイアス(a)0.9352 π (b)1.0651 π (c)1.2752 π
- 図 4.2.2 G1=700,G2=7000 におけるスペクトル 位相バイアス(a)0.9352 π (b)1.0651 π (c)1.2752 π
- 図 4.2.3 G1=7000,G2=7000 におけるスペクトル 位相バイアス(a)0.9352 π (b)1.0651 π (c)1.2752 π
- 図 4.2.4 利得の変化とスペクトルの非対称性
- 図 4.3.1 線形に減衰する場合の(a)パルス波形と(b)位相波形
- 図 4.3.2 線形に減衰する場合のスペクトル 位相バイアス(a)1.16 π (+0.1 π)(b)0.96 π (-0.1 π)
- 図 4.3.3 指数的に減衰する場合の(a)パルス波形と(b)位相波形
- 図 4.3.4 指数的に減衰する場合のスペクトル 位相バイアス(a)1.16 π (+0.1 π)(b)0.96 π (-0.1 π)
- 図 4.3.5 線形に増加する場合の(a)光強度波形と(b)光位相波形
- 図 4.3.6 線形に増加する場合のスペクトル 位相バイアス(a)0.84 π (-0.1)(b)1.04 π (+0.1)
- 図 4.4.1 ゲート窓幅とエネルギー(a)時間領域 (b)周波数領域
- 図 5.1.1 位相バイアス 1.09(+0.03)での(a)出力スペクトルと(b)その最適バイアスでのスペクトルの差と(c)その正規化したスペクトル
- 図 5.1.2 位相バイアス 1.03(-0.03)での(a)出力スペクトルと(b)その最適バイアスでのスペクトル

の差と(c)その正規化したスペクトル

図 5.2.1 位相バイアス $1.16\pi (+0.1\pi)$ での出力時間波形の最適値との差

図 5.2.2 位相バイアス $0.96\pi (-0.1\pi)$ での出力時間波形の最適値との差

図 5.2.3 アーム単体での(a)出力強度波形(b)位相波形(c)スペクトル

図 5.2.4 スペクトルの最適値との差とアーム単体のスペクトルの(a)線形減衰(b)指数減衰(c)線形増加

表見出し

表 1 光変調器の比較

表 2 半導体光ロジックシミュレータにおける基準動作条件

第 1 章 序論

現在の光通信は最大 40GHz の時間多重信号を波長多重して最大 400GHz(商用) ~ 10GHz(研究段階) の通信容量を確保している。しかし、波長多重技術は限界に近い。電気光変換を経た変調速度はほぼ限界に達しており、これ以上の通信速度を得るには信号を光のまま処理することが必要である。

これに対し、今までの研究で、干渉型全光ロジックゲートによって 336GHz での全光 demux (多重解除) 168GHz での信号パルス、波長変換信号パルス再生などの応用技術が提案・実証されている。この全光ロジックゲートで高い消光比を達成するためには干渉位相バイアスを最適化することが重要である。

最適化する方法は既に提案されている。この方法は干渉位相バイアスが最適値からずれた場合に監視光出力スペクトルに非対称に変化することを利用したものである。よって、この非対称性を明らかにすることは SMZ 全光ロジックゲートの制御に有用である。

この研究では干渉位相バイアスが最適値からずれた場合に発生する監視光スペクトル非対称性の原因を明らかにする。

第2章 研究の背景

2.1 本研究の技術分野

近年、インターネットなどの普及により通信ネットワークの大容量化、高性能化が求められており、高速化の需要は非常に大きくなってきている。光ファイバーを使った光通信は、広帯域、低減衰、無漏話、無誘導など大きなメリットがあり、今まで電気通信で実現されていたものが基幹系を中心に置き換えられつつある。

現在、光通信の速度は 2.5GHz ~ 10GHz、部分的には 40GHz まで達しているが、これは全て光電子変換を行って、信号処理自体は電子回路で処理しているものである。しかし、40GHz 程度で電子的に信号を処理する方法は半導体キャリア（電子ホールペア）の消滅時定数（以降、キャリアの寿命と略す）などの物理的限界を迎える。現在は波長分割多重方式で通信容量を確保しているが、これも現実的なレベルでは限界が近いと考えられる。先端の研究では信号を光のまま処理する全光処理によって、この限界以上の 100GHz ~ 400GHz の速度を実現しつつある。

2.2 従来技術の超高速光通信デバイス

この節では従来の方式でどのように光通信が実現されているかについて述べる。

光信号を変調する方法としては、レーザダイオードの印加電流を直接変えて行う直接変調と、光の透過量を電気信号によって変化させることができる変調器に一定光出力で動作させた半導体レーザの光を通すことによって変調を行う外部変調とに分けることができる。直接変調方式では、2.5 GHz のような高速で変調すると、レーザ光の波長の変動（波長チャージング）により、伝送距離が制限される。一方、外部変調方式では、変調時の波長変動が小さく、直接変調に比べ長距離伝送が可能である。外部変調器には、（１）LN（LiNbO₃ 結晶）変調器、（２）電界吸収型（electric absorption：EA）変調器がある。現在の技術ではこの両方の変調器で 40GHz の変調速度が実現されている（表 1、図 2.2.1）。

こうした変調は、電気信号の段階で多重を行う電気時分割多重方式（TDM: Time-Division Multiplex）を用いたものだが、電子回路の高速化限界や光ファイバの波長分散が大きな問題となり、近年、時間軸ではなく光の波長軸上で多重を行う波長多重方式（WDM: Wavelength-Division Multiplex）を用いて大容量化をはかっており（図 2.2.2）、40GHz の波長を 273 波多重した 10.9Tb/s の信号伝送も実現されている[1]（図 2.2.3）。

高速の信号を観測する装置も高速な装置が開発されている。図 2.2.4 は 55GHz のサンプリングオシロスコープである。サンプリングオシロスコープは、図 2.2.5 のように繰り返し信号を少しずつずらして観測することで、通常のオシロスコープで観測できない 10 倍以上の速度の信号を観測するものである。

第6章 結論

実用的で高性能な干渉型全光ロジックを実現するためには、ロジック内部の干渉位相バイアス設定を自動制御する制御方式設計の確立が重要と考えられる。本研究では、位相バイアス設定値や最適値のわずかな経時変動に伴う監視光出力スペクトルの振る舞いを系統的に研究し、その起源を初めて明らかにした。以下、本研究の結論を述べる。

監視光出力スペクトルの振る舞いを理論的に解釈するため、まず、監視光出力スペクトルの非対称な振る舞いを2つの側面に分けて考察した。第1の振る舞いは波長に対してスペクトルが非対称になること、第2の振る舞いはこの非対称性が位相バイアスずれの符号（増加方向か減少方向か）に対して反転すること、である。

研究の結果、第1の振る舞いの起源は、SOA 出力スペクトル $S_{SOA}(\lambda)$ であった。SOA での位相はキャリア密度振動による屈折率変化でシフトする。よって、キャリア密度の緩和によって決まる SOA 出力のスペクトルが非対称であることがスペクトルの非対称性の起源である。第2の振る舞いの起源は、位相バイアスの最適値とのずれ $\Delta\Phi_b$ であった。干渉位相差が π からずれることで SOA スペクトルの非対称性が漏れ出している。この漏れ出し量 $B(\Delta\Phi_b)$ は、 $\sin(\Delta\Phi_b/2)$ に比例する。このことは実験結果の Φ_b が最適のときに非対称が消えることと、 $\Delta\Phi_b$ によって非対称が反転することが説明できる。

なお、位相バイアス変動時と最適時とのスペクトルのエネルギー差を考察した結果、増加分と減少分の和はゲートが開いている時のエネルギーと対応しているが、減少分は主にゲートが閉じている時の影響を受けることがわかった。この原因は今後の課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、非常に熱心に細部にわたるまでご指導いただいた上野芳康助教授に深く感謝いたします。また、輪講を始めとして色々お世話になった名取教授、中村助手、名取研究室の方々にも感謝いたします。有益なご意見をいただいた氏原教授、河野教授を始めとする光エレクトロニクス講座の方々にも感謝いたします。

参考文献

- [1] K.Fukuchi et al., "10.92-Tb/s (273*40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment," OFC 2001. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Technical Digest Postconference Edition. Postdeadline Papers (IEEE Cat. 01CH37171) 2001, Pages PD24-PD21-3 vol.4
- [2] Ueno, Y. ; Nakamura, S.; Tajima, K.; Kitamura, S., "3.8-THz wavelength conversion of picosecond pulses using a semiconductor delayed-interference signal-wavelength converter (DISC)," IEEE Photonics Technology Letters, Volume 10, Issue 3, 1998, Pages 346-348
- [3] Nakamura, S. ; Ueno, Y.; Tajima, K.; Sasaki, J.; Sugimoto, T.; Kato, T.; Shimoda, T.; Itoh, M.; Hatakeyama, H.; Tamanuki et al. , "Demultiplexing of 168-Gb/s data pulses with a hybrid-integrated symmetric Mach-Zehnder all-optical switch," IEEE Photonics Technology Letters, Volume 12, Issue 4, 2000, Pages 425-427
- [4] Shigeru Nakamura et al. , "Ultrahigh-speed optical signal processing with Symmetric-Mach-Zehnder all-optical switches," submitted to IEEE LEOS Summer Topical Mtg. July 15-17,2002,Quebec,Canada.
- [5] Nakamura, S. ; Ueno, Y.; Tajima, K. "168-Gb/s all-optical wavelength conversion with a symmetric-Mach-Zehnder-type switch," IEEE Photonics Technology Letters, Volume 13, Issue 10, 2001, Pages 1091-1093.
- [6] Y. Ueno et al., "Control scheme for optimizing the interferometer phase bias in the Symmetric-Mach-Zehnder all-optical switch," in the digest of 28th European Conference on Optical Communication (ECOC 2002), Copenhagen, Denmark, Sept. 8-12, 2002, vol. 2, paper 4.3.2.
- [7] Y. Ueno, M. Takahashi, S. Nakamura, K. Suzuki, T. Shimizu, A. Furukawa, T. Tamanuki, K. Mori, S. Ae, T. Sasaki, and K. Tajima, "Control scheme for optimizing the interferometer phase bias in the Symmetric-Mach-Zehnder all-optical switch (Invited Paper)," to be published in the Joint Special Issue on Recent Progress in Optoelectronics and Communications, Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE), vol. C and E, May issue, 2003.
- [8] Yoshiyasu Ueno et al. , "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. 11,2573-2589 (2002).