

同一波長光加速方式を用いた高速全光論理ゲートの研究

電子工学専攻 上野研究室 杉浦 賢太

1. はじめに

半導体光増幅器(SOA)を含む全光ゲートは、超高速光通信を担う全光通信技術として注目されている。これまでにゲート速度の高速化、低消費電力、高密度集積を目的とした研究や^{[1][2]}、全光波長変換器、全光論理ゲートなど様々な研究が成されている^{[2][3]}。特に全光論理ゲートの研究について述べると、100 Gb/sのANDゲートや40 Gb/sのXORゲートなどこれまで世界中で報告がなされている。しかし、出力信号波形が劣化していたり、クロック信号での実験であったりと、まだ未熟な点が多い。また殆どがゲート方式の研究でありゲートの高速化を目的としたものは少ない。全光論理ゲートの研究には、まだまだ多くの研究課題が残されている。

全光論理ゲートに限らず、これまでSOAを含む全光ゲートの研究は、信号光の分離が容易であるという点から複数の入力光は全て異波長の光信号を使用するのが主流であった。しかし筆者らは、異波長方式ではゲート動作の加速に必要な光加速効果^{[4][5]}を減少させているという問題に着目した^[6]。

本研究では、データ光と同一波長な連続光(cw光)で光加速する同一波長光加速方式が、従来方式よりも光加速効果が高いことを実験により実証し、さらに100 Gb/s 全光ORゲートを実証し、同一波長光加速方式がゲート速度高速化において有効であることを実証したので報告する。

2. 同一波長光加速効果の原理

SOAを用いた全光ゲートの動作に必要なパラメータとして、非線形位相シフト量とSOAのキャリア緩和時間が挙げられる。ゲート動作の可否は位相シフト量に、ゲート速度は緩和時間にそれぞれ大きく依存する。しかしこの2つのパラメータにはトレードオフ関係を示す傾向があるため、全光ゲートを高速化するためには非線形位相シフト量を維持しながら緩和時定数を短縮する必要がある。

ゲート入力には制御光と被制御光があり、制御光によって被制御光を変調することでゲート動作する。その際、ゲート動作に必要な位相シフト量を得るためには制御光の強度を強くする必要がある。同時に、緩和時間を短縮するためには被制御光の強度を強くする必要がある(光注入による光加速作用^{[4][5]})。

ゲート動作時、信号光がSOA内部を伝播すると利得スペクトルのピークが減衰しながら長波長側へシフトする(図1(a))。これが原因となり、異波長方式では制御光と被制御光の強度比が一定に保たれない(図1(b))。その結果、被制御光が十分強められなくなり光加速作用を弱めてしまう。一方、同一波長方式の場合、強度比が一定に保たれるため(図1(c))、異波長方式よりも被制御光を強めることができる(図1(d))。結果、光加速効果を強めることが出来ると考えられる。

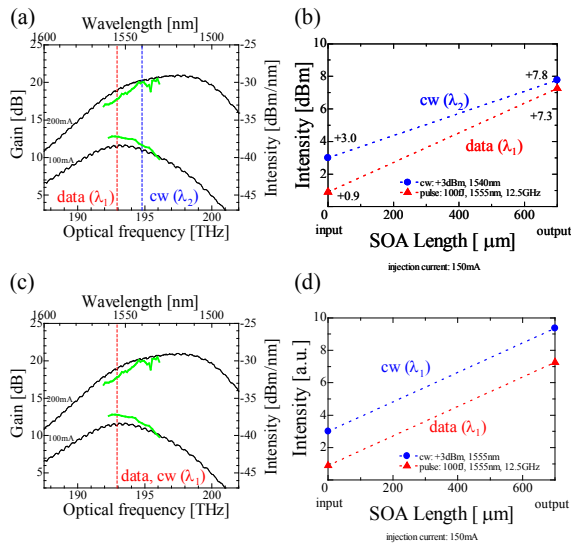


図1 SOA内部で光信号が獲得する利得と入力端での光強度
 (a)(b): 異波長方式,(c)(d): 同一波長方式
 (a)(c): SOA利得スペクトル (b)(d): SOA入出力端での光強度)

3. 同一波長光加速方式の実証

同一波長方式と異波長方式それぞれについて、非線形位相シフト量と緩和時間を測定・評価した。構成は図2の通りである。SOAはInPhenix社のバルク型を使用し、入力光信号の波長は、異波長方式では信号光(制御光)1555 nm, cw光(被制御光)1540nm、同一波長方式では信号光、cw光共に1555 nmとした。また、信号光は、パルス幅2.0 ps, パルスエネルギー100 fJ/pulseとした。この条件でSOAへの注入電流量、信号光強度、連続光強度に対する非線形位相シフト量と緩和時間の依存性について系統的に測定・評価を行った。

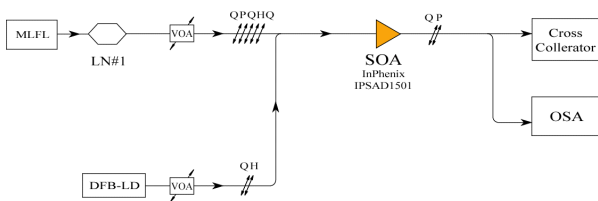


図2 非線形位相シフト量と緩和時定数評価実験構成

また、このとき同一波長方式実験においては、SOA前後の偏光制御器をもちいてcw光の偏光をパルス光の偏光と直交させることで、cw光のみを分離する偏光分離を行った。

3.1 非線形位相シフト量の評価

非線形位相シフト量を評価するために、SOAの出力スペクトルを観測しそこから計算によって位相シフト量を算出した^[7]。図3は系統的に測定したSOA出力スペクトルと位相シフト量の評価結果である。今回の条件では、位相シフト量は同一波長方式と異波長方式で顕著な差は見られなかった。この結果を裏付けるために同じ条件でSOAの利得スペクトルを観測した。結果を図4に示す。これを見ると、同一波長方式と異波長方式でパルス光の利得が殆ど等しい。位相シフト量はパルス光の利得とパルス光エネルギーの積に比例するため、位相シフト量に差が無いことは妥当な結果だと判断した。

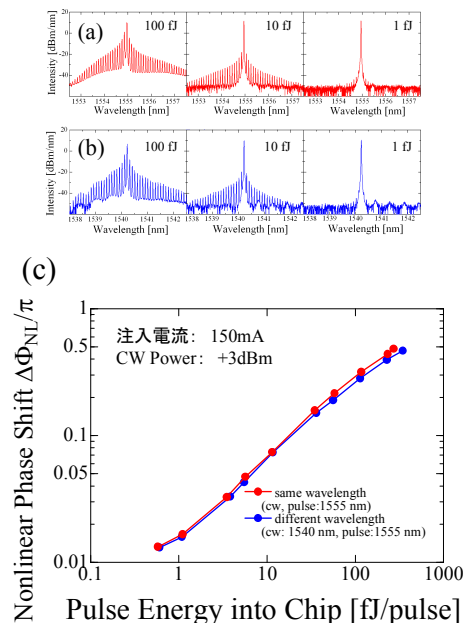


図3 非線形位相シフト量評価結果
 (a)(b): SOA出力スペクトル (c): 非線形位相シフト量のパルスエネルギー依存性 (赤: 同一波長、青: 異波長)

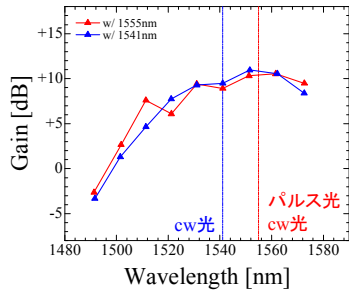


図4 SOAの利得スペクトル (赤：同一波長、青：異波長)

3.2 緩和時定数の評価

SOA出力XGM時間波形を系統的に測定し、フィッティングによって緩和時定数を算出した。結果を図5に示す。入力光強度の増加に伴って緩和時定数が短縮されている。これは、cw光による光加速効果である。また同一波長方式と異波長方式を比較すると、cw高強度が強い条件において、同一波長方式の方が光加速効果が高い結果となった。これは、図4より同一波長方式の方が異波長方式よりcw光の利得が高く、cw光が異波長方式よりも強められることで、SOA内部キャリアの定常状態レベルが低下しているため、光加速効果が高められたためだと判断した。

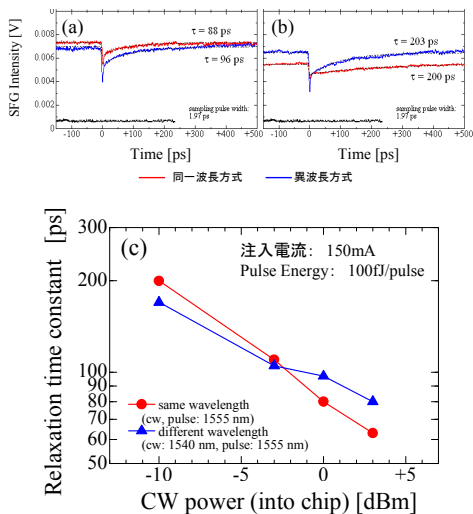


図5 緩和時定数評価結果 (a)(b)緩和波形 (c)緩和時定数のcw光強度依存性 (赤：同一波長、青：異波長)

3.3 同一波長光加速効果の評価

以上の結果をまとめると図6のようになる。同一波長方式の方が異波長方式と比べ、同じ位相シフト量を得た状態でより強い光加速効果を得た。これより同一波長方式は、異波長方式よりも光加速効果が高いことを実証した。また今回は、同一波長方式を用いることで従来方式よりも最大1.2倍の光加速効果を得た。

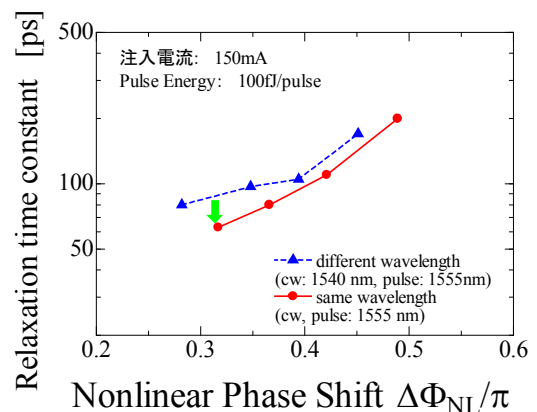


図6 緩和時定数と位相シフト量の評価結果 (実線)：同一波長方式、(破線)：異波長方式

4. 同一波長光加速方式100 Gb/s全光ORゲートの実証

全光論理ゲート動作の高速化において、同一波長方式が異波長方式よりも光加速効果が高いか調査するために、100 Gb/s全光ORゲート実験を行なった。そのために、まず100 Gb/sという超高速なデータ信号の生成と観測を行なった。次に生成したデータ信号を用いて全光ORゲート実験を行なった。実験構成を図7に示す。

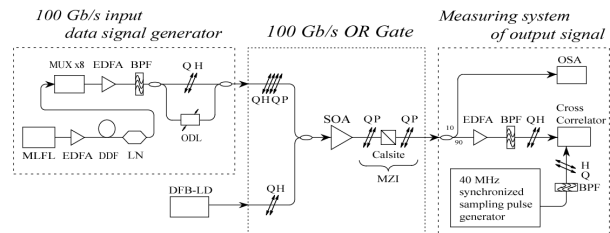


図7 100Gb/s 全光ORゲート実験構成

4.1 100 Gb/sデータ信号の生成と観測

データ信号を相互相関計で観測するためには、ビット長よりも繰り返し周波数の低いクロック信号が必要となる。当研究室では、データ信号の生成のための光源として繰り返し周波数が12.5 GHzのPritel社製モードロックファイバーレーザー (MLFL) を使用している。そこでもう1台、繰り返し周波数が40 MHzのCalmar社製MLFLを使用して参照光として利用することにした。しかし、この2台のMLFLの出力光で相互相関波形を観測したところ、タイミングジッタが数psと大きく、時間分解波形を上手く観測できなかった。そこで、2007年卒業生である坂口淳氏によって、Pritel社製MLFLの出力信号を変調して40 MHzのクロック信号を生成する装置が開発された。その構成を図8に示す。

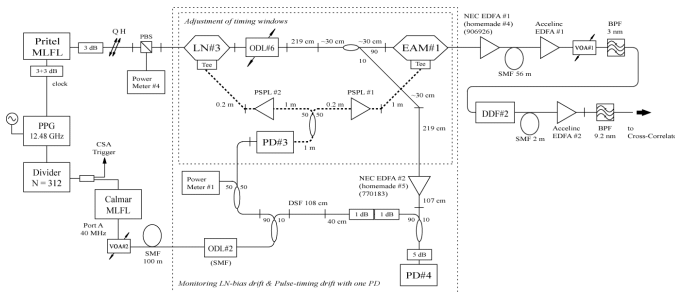


図8 40 MHz参照光生成システム構成図

Pritel社製MLFLから出力された12.5 GHzクロック光信号を、偏光制御器、偏光ビームスプリッタ (PBS) で直線偏光にし、LN変調器を用いて40 MHzの繰り返し周期で変調する。その後、光遅延器 (ODL) を通り、EA変調器を用いて再度40 MHzで変調する。2度変調器を用いているのは、1つの変調器だと変調が不十分なためである。このとき、LN変調器とEA変調器のバイアス

Teeへ40 MHzクロック電気信号を入力しているが、この40 MHzクロック電気信号は、Calmarレーザ出力である40 MHzクロック光信号をフォトダイオード (PD) で光/電気変換し、その電気信号をアンプで増幅した信号である。このとき、LN変調器とEA変調器へのRF信号入力タイミングを同期させるために、PDから各バイアスTeeまでの同軸ケーブルの長さを一致させている。また、LN変調器とEA変調器の間にあるODLによって変調するタイミングを同期している。これは図3.2の中のAdjustment of timing windowsで示している。また、Calmarレーザ出力時間波形は時間的にドリフトしているため、Monitoring LN-bias drift & Pulse-timing drift with one PDで、そのドリフトを常時観測している。Monitoring LN-bias drift & Pulse-timing drift with one PD では、LN変調器出力とCalmarレーザ出力を同時に観測することで、LN変調器のバイアス値による変調具合を観測すると同時に、Calmarレーザ出力によるLN変調器透過窓と入力12.5 GHz光信号を同期させることが出来る。

以上に述べたことは、卒業生である坂口氏が考案・作製したものについて私なりの解説を加えたものである。

私は、ORゲートを実証するにあたりデータ信号を観測するための準備実験として、同期した40 MHz参照光を生成し、Pritelレーザ出力12.5 GHzパルスとの相互相関波形を観測した。しかし、生成した40 MHzクロックパルスを参照光として利用すると、被参照光の自己相関波形と比べて、消光比が10dB以上劣化するという問題が発生した (図9(a))。そこで構成部品を1つずつ動作テストすることで、原因を調査した。

構成部品である、LN変調器やEA変調器、RF信号を増幅する電気アンプ2台などについて動作テストを行ったところ、EA変調器のRF信号入力端子が破損していることがわかった。RF入力端子を正常なものと取替えて再度実験を行なったところ、正常に相互相関波形を観測することが出来た（図9(b)）。

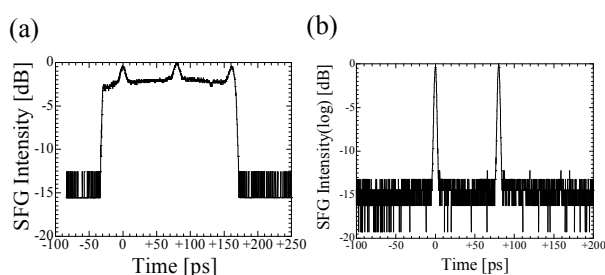


図9 40 MHz参照光による12.5 GHzクロック信号相互相関波形
((a): EA変調器修理前 (b): EA変調器修理後)

この40 MHz参照光を利用して、まず100 Gb/sデータ信号生成を行なった。データ信号生成のための主な実験構成は図7の100 Gb/s input data signal generator部分である。データ信号生成手順は以下の通りである。まず、モMLFLを用いて12.5 GHzのクロック信号を発生させる。このときの出力パルス幅は1.62 psであった。そしてこの12.5 GHzクロック信号をエルビウム添加ファイバーレーザー（EDFA）と分散減少ファイバー（DDF）を用いてパルス圧縮する。その結果、パルス幅は0.96 psまで圧縮された。次に、光時分割多重器（MUX）を3台用いて圧縮した12.5 GHzクロック信号を時分割多重し、100 GHzクロック信号を生成した。その後LN変調器とパルスパターンジェネレータ（PPG）を用いてクロック信号をデータ信号に変調した。最後に生成したデータ信号を多重器で分波、時間遅延、合波す

ることで2系列データ信号を生成した。生成したデータ信号の観測結果の一例を図10に示す。生成したデータ信号は、繰り返し周波数100 Gb/s、中心波長1554.9 nm、パルス幅1.62 ps、ビット長312 bitであり、消光比は4~6 dBであった。

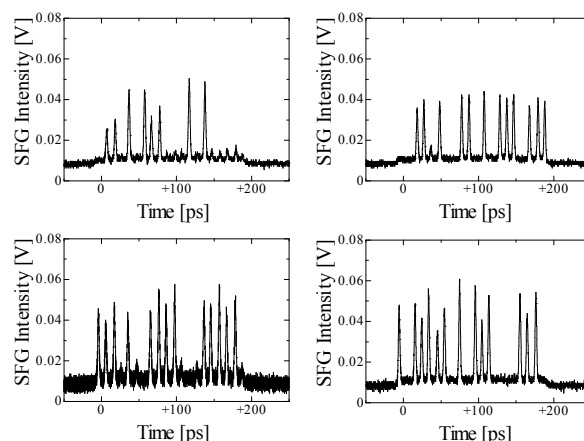


図10 100 Gb/sデータ信号時間波形

4.2 100 Gb/s全光ORゲート

同一波長方式が異波長方式よりも1.2倍の加速効果を得る条件で、100 Gb/s 全光ORゲートを実証した。実験構成は図7に示したとおりである。全光ORゲートの構成には、200 Gb/sでの波長変換が報告されている遅延干渉波長変換器^{[2][7]}を応用した。先ほどの100 Gb/sデータ信号を用いて異波長方式と同一波長方式の両方でORゲート実験を行い、出力信号を観測・比較した。超高速データ信号時間波形観測には、同期した40 MHz参照光を使用した。また、ORゲート実験においても同一波長入力光を用いる場合は、SOA前後の偏光制御器を用いて偏光分離を行い、cw光をデータ光から分離した。

図11にORゲート入出力波形を示す。同一波長方式、異波長方式の両方で100 Gb/sでORゲート動作を実証した。さらに図11(c)

より、出力波形消光比は、異波長方式で1.0～2.5 dBであるのに対し、同一波長方式では1.5～4.8 dBと0.5～2.3 dB程度向上した。また、同一波長方式は異波長方式に比べ、パターン効果を抑制する傾向を示した。これは、同一波長光加速効果によってキャリアが回復したものと判断した。

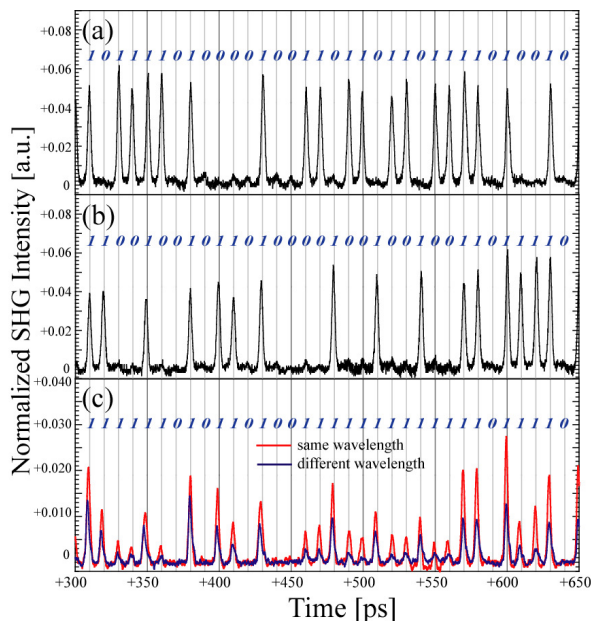


図11 100Gb/s 全光ORゲート入出力時間波形 (a) (b): 2系列入力光信号、(c): 出力光信号 (赤: 同一波長方式、青: 異波長方式)

5. おわりに

本研究において、同一波長光加速方式と従来方式でのSOAキャリア緩和時定数と非線形位相シフト量の系統的な評価を行なった。その結果、同一波長光加速方式が従来方式よりも光加速効果が高いことを実証した。本報告の実験例では従来方式より最大1.2倍の加速効果を得た。さらに100 Gb/s全光ORゲートにおいて、同一波長方式が、従来方式よりも光加速効果が高いことを実証した。出力波形消光比は1.5～4.8 dBと、異波長方式よりも0.5～2.3 dB程度向上した。以上より、本方式は全光ゲートの高速化にお

いて有効であると結論した。

今後の課題は、本方式の光加速効果がよりえられる条件の調査。具体的には、入力光波長依存性の評価、SOA注入電流量依存性の評価、SOA活性層長依存性の評価などが挙げられる。また光加速効果と消費電力の関係の調査、全光ゲート透過率調査なども必要となる。そして、より全光ORゲート動作速度のさらなる向上や、他方式の全光論理ゲートでの光加速効果実証などへと繋げていく。

参考文献

- [1] Y. Liu, E., *et al.*, JLT, vol. 25, 103, (2007)
- [2] J. Sakaguchi, *et al.*, Optics Comm., vol. 282, 1728, (2009)
- [3] H. Dong, *et al.*, Optics Comm., vol. 242, 479, (2004)
- [4] R. Manning, *et al.*, Opt. Lett., vol. 19, 889, (1994)
- [5] J. Sakaguchi, *et al.*, Opt. Express, vol. 15, 14887, (2007)
- [6] 山路健瑠、他、IEICE 東京支部学生会研究発表会第15回、(2009)
- [7] Y. Ueno, *et al.*, Opt. Soc. Am. B, vol. 19, 2573, (2002)