

1. 研究背景

近年、通信情報量の増加に伴い高速でかつ大容量な通信が必要とされてきている。今後、波長分割多重方式と光時分割多重方式を組み合わせた全光通信方式が検討されている。全光通信技術は電気信号を介して行う通信方式に比べ、超高速応答・低消費電力・集積化可能でかつ省エネルギーである。本研究室では半導体光増幅器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)を用いた半導体全光ゲートの研究を行っている。

本研究の目的は、本研究室の上野芳康教授によって考案された DISC-Gate(Delayed Interference Signal wavelength Converter-Gate)で生じる消費電力の光加速作用および入力信号光強度依存性について系統的に測定を行い、その傾向を調査することで将来的な DISC-Gate 消費電力の低減に貢献するものである。

2. 原理

2.1 DISC-Gate 構成および動作原理

DISC-Gate は図 1 のような構成になっている。動作原理はまず SOA に波長 $\lambda 1$ のパルス光(データ信号)と波長 $\lambda 2$ の cw 光(無変調連続波)を入射させることで、SOA 内のキャリアが大きく減少し、バンドフィリング効果により SOA 内の屈折率が上昇する。この屈折率の上昇により cw 光の位相が変調を受ける。この一連の現象を相互位相変調(Cross Phase Modulation, XPM)という。減少した SOA 内のキャリア密度はその後注入電流により回復し、それに伴い SOA の屈折率、cw 光の位相は元の状態に戻る。

続いて変調を受けた cw 光が MZI に入射される。MZI では光を 2 つに分け、一方に遅延時間 Δt 、もう一方に位相バイアス $\Delta\Phi$ を与える。本研究室では MZI にカルサイト(CaCO₃)と 1/4 波長版(Quarter Wave Plate, Q 板)と偏光子(Polarizer, P 板)を使用している。カルサイトには偏光方向によって屈折率が異なるという複屈折性があり、光はそれぞれ異なる屈折率の中を進むため伝播速度が異なり 2 つに分かれる。ここで屈折率の差を Δn 、カルサイト長を L 、光速を c とするとそれぞれの光の時間差は $\Delta t = \Delta n * L / c$ となる。実際にはカルサイトの軸に対して 45° ずらした直線偏光を入射することによりそれぞれの軸の強度を等しくしている。この偏光調整はカルサイトの前の Q 板と P 板で行っている。

カルサイトで時間遅延を与えられた光は後ろの Q 板と P 板に入射される。Q 板を使い P 板の軸で 2 つの光の位相差が π になるように調整する。この位相差を位相バイアスと呼び、位相差が π になっている部分以外では光が打ち消しあい消光状態になる。つまり位相差が π となっている部分では光は打ち消しあわず透過する。

DISC-Gate 方式での 200 GHz を超える入力信号光強度の繰り返し周波数での動作について、本研究室では 2008 年度に当時博士課程だった坂口惇氏が SOA の非線形偏光回転を利用した 200 GHz での動作実証し[1]、他機関では BPF160 GHz および 320 GHz の動作実証がされている[2][3]

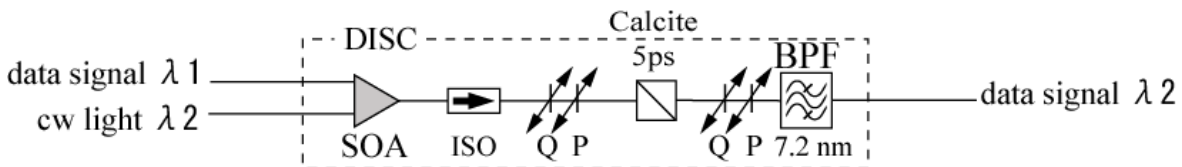


図 1 DISC-Gate 構成図

2.2 光加速効果

光加速作用とは SOA にパルスを入射した後のキャリア回復速度を早める作用のことである。今回用いた光加速効果は入力 cw 光の強度を強くし、SOA 内のキャリアを常に強く消費する状態にし、キャリア密度の定常状態を下げることで緩和時間を短縮するものである。

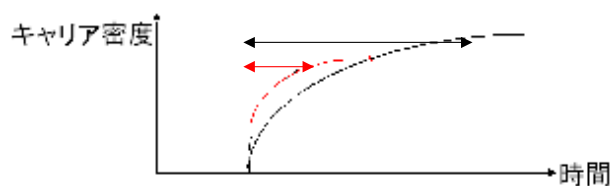


図 2 光加速効果による緩和時間の短縮

3. 実験方法

3.1 実験構成

DISC-Gateに入力するcw光強度とパルス強度をそれぞれ増減させ、各々の場合について消費電力を求めた。今回の測定でのパルスの繰り返し周波数は12.5 GHzに、またパルスの中心波長は1555 nm、cw光の波長を1541 nmとした。消費電力測定の実験構成図を図3に示す。

今回の測定は図3のようにモードロックファイバーレーザ(Mode Locked Fiber Laser, MLFL)から発生させたクロックパルスとDFB(Distributed Feedback, DFB)レーザから発生させたcw光をSOAおよびDISC-gateに入射させ、その出力時間波形を相互相関計(X-correlator)、出力スペクトルを光スペクトラムアナライザ(Optical Spectrum Analyzer, OSA)で測定した。

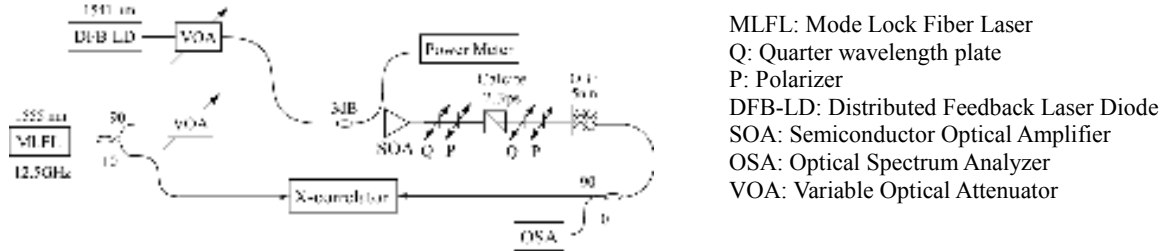


図3 12.5 GHz DISC-Gate 消費電力測定実験構成図

3.2 消光比の測定

DISC-Gate 出力波形の消光比は以下のようなDISC-Gate 出力時間波形から読み取った。今回は消光比が光通信において受信機で要求されるビットエラーレートである 1×10^{-9} を満たすようにとった値である8 dBになることを基準とした。最初にcwとSOAの注入電流をそれぞれ100 mA、200 mAとしてSOAの注入電流をそこから10 mAずつ下げながら、それぞれ場合についてDISC-Gate動作させた場合の出力時間波形より消光比を見積もった。この手順を入力パルス強度-5, 0, 5 dBmとしたときのそれぞれの場合について入力cw光強度を-10, -7, -4, -1, 2, 5 dBmと強くしながら測定を行った。

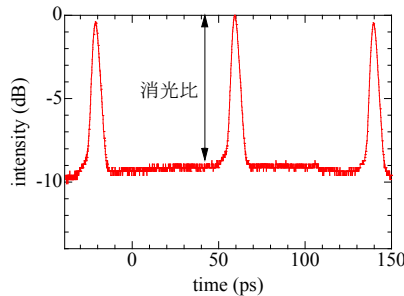


図4 消光比の測定

3.3 消費電力の算出

上記の方法でDISC-Gate 出力波形を測定し、消光比が8 dBになったときの消費電力を求めた。消費電力はcw光とSOAのそれぞれで消費されるエネルギーの和をDISC-Gateに入力するパルスの繰り返し周波数(12.5 GHz)で割ることで1 bitあたりに消費される消費電力を算出した。DISC-Gateの消費電力をP、入力cw光とSOAの消費電力をそれぞれ P_{cw} 、 P_{SOA} 、入力パルスの繰り返し周波数をfとすると、DISC-gateの消費電力は以下のように表せる。

$$P(\text{J/bit}) = \frac{P_{cw}(\text{W}) + P_{SOA}(\text{W})}{f(\text{Hz})} \quad (1)$$

4. 実験結果

4.1 光加速効果依存性

DISC-Gate 消費電力の光加速効果依存性およびそれぞれの測定点での消光比の SOA 注入電流依存性はそれぞれ図 5、図 6 のようになった。それぞれの入力パルス強度において入力 cw 強度を強くすればするほど、消費電力を抑えられる傾向が見られた。

今回の結果が得られた原因については以下で述べる。まず光加速効果により定常状態が下がるけれども、注入電流を増加させない限り SOA に注入する時間当たりのキャリア量は変わらないので、定常状態が下がっているために回復に使用するキャリア量が少なく済み、さらに利得の緩和時間が短くなる。したがって同じ注入電流でも緩和時間が短くなるので消費電力が少なく済むためであると結論付けた。

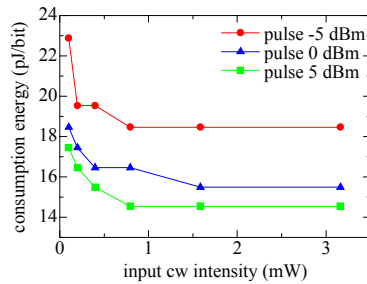


図 5 DISC-Gate 消費電力光加速効果依存性

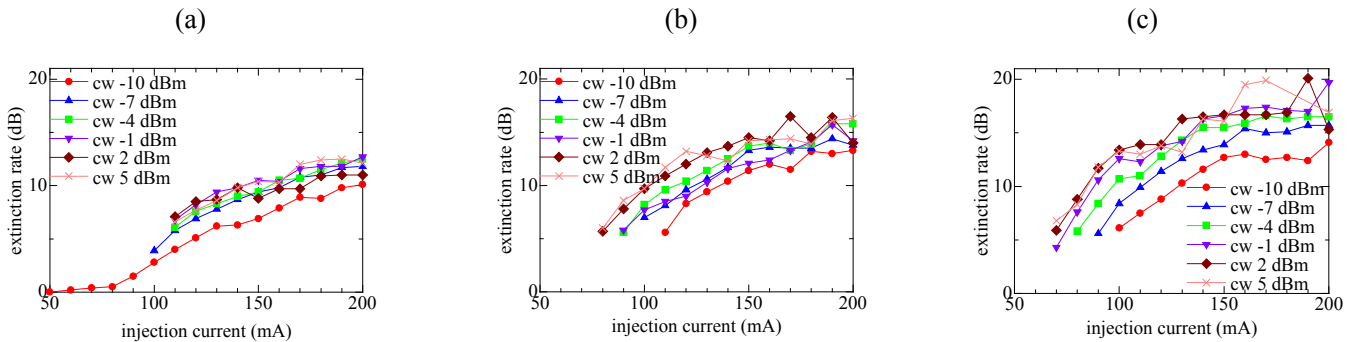


図 6 DISC-Gate 出力波形消光比注入電流依存性
入力パルス強度 (a)-5 dBm (b)0 dBm (c)5 dBm

4.2 入力信号光強度依存性

DISC-Gate 消費電力の入力信号光強度依存性およびそれぞれの測定点での消光比の SOA 注入電流依存性はそれぞれ図 7、図 8 のようになった。それぞれの入力 cw 光強度において入力パルス強度を強くすればするほど、消費電力を抑えられる傾向が見られた。

今回の結果が得られた原因については、入力信号光強度が強くなるほど SOA 内でのキャリアの緩和時間が短縮され回復に必要な注入電流も少なくて済むためであると結論付けた。

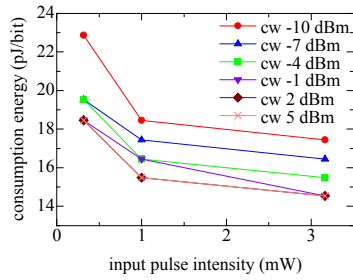
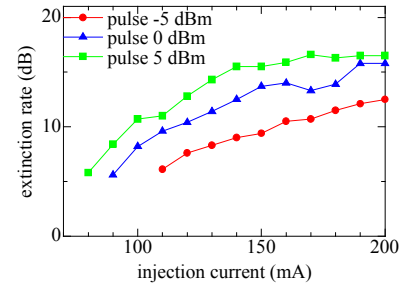
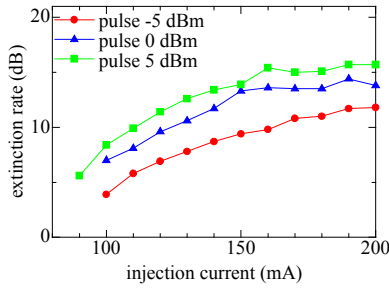
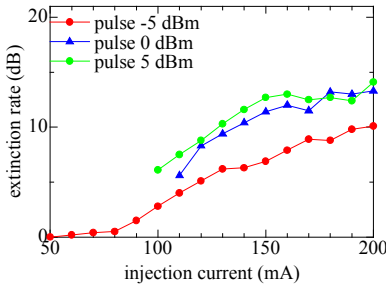


図7 DISC-Gate 消費電力入力信号光強度依存性

(a) (b) (c)



(d) (e) (f)

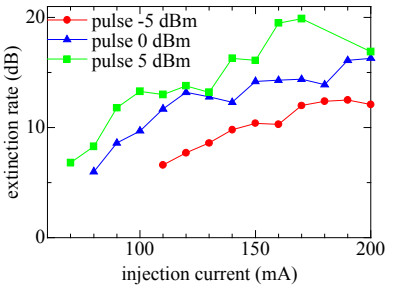
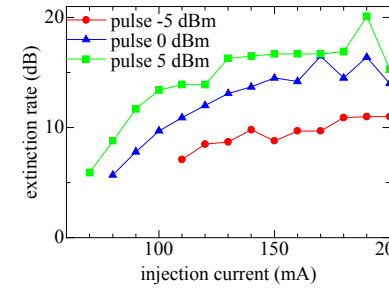
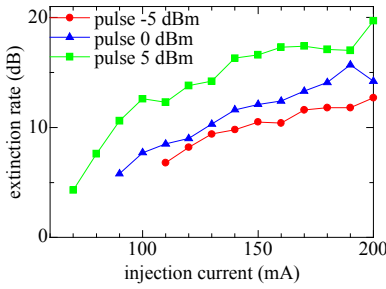


図8 DISC-Gate 出力波形消光比注入電流依存性

入力 cw 強度 (a)-10dBm (b)-7 dBm (c)-4dBm (d)-1 dBm (e)2 dBm (f)5 dBm

5. 結論

今回の調査により DISC-Gate 消費電力について光加速効果を強めることでも、また入力信号光強度を強めることでも低減する傾向が見られた。この要因について、前者については光加速効果により定常状態が下がるが、注入電流を増加させない限り SOA に注入する時間当たりのキャリア量は変わらないので定常状態が下がっているために回復に使用するキャリア量が少なく済み、利得の緩和時間も短くなるため、同じ注入電流でも緩和時間が短くなるので消費電力が少なく済むため低減すると考えられ、後者については入力信号光強度が強くなるほど、SOA 内でのキャリアの緩和時間が短縮され回復に必要な注入電流も少なく済みため低減すると結論づけた。今後の課題としては、入力信号光の繰り返し周波数をより高周波にした場合に消光比が得られるようにし、高周波動作した場合の消費電力についての調査を行うことであると考えている。

参考文献

- [1] 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 Photon. Technol. Lett., 10, 1998, 346-348.
- [2] 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 Photon. Technol. Lett., 13, 2001, 469-471.
- [3] Y. Ueno, M. Toyoda, R. Suzuki, and Y. Nagasue, "Modeling of the polarization-discriminating-symmetric-Mach-Zehnder-type optical-3R gate scheme and its available degree of random-amplitude-noise suppression," Opt. Express., 14, 2006, 348-360