

外部変調を利用する半導体全光ゲート型

モードロックパルス発生器の研究

先進理工学専攻 上野研究室 新井 隆博

1 はじめに

通信需要の増大から、高速・大容量な通信が求められている。通信回線には光回線を個人宅へ直接引き込む FTTH (Fiber to the home) が広く普及し、伝送方式にはデータを波長で分けて多重する波長分割多重伝送方式 (Wavelength division multiplexing, WDM) が使われている。より高速な伝送を実現する方法の一つとして、WDM に光時分割多重伝送方式 (Optical time division multiplexing, OTDM) を組み合わせる方法が考えられる。OTDM では 1 つのチャンネルあたり、100 Gbps を超えるような高密度なデータ伝送が行われる。そのため、伝送される光信号の元となる光パルスには、高繰り返し周波数で、パルス幅が狭く、長期的な安定性が求められる。

このような OTDM のシステムで光源として適用が期待されるものに、遅延干渉型全光ゲート (Delayed interference signal wavelength converter, DISC) [1] を応用した光クロックパルス発生器 (DISC-loop) [2] がある。可飽和吸収体を用いたモードロック半導体レーザ [3] の光源よりも、出力パルス幅、中心波長、繰り返し周波数が容易に可変であり、原理的に集積化も可能である。DISC-loop でのこれまでの成果としては、2 ps のパルス幅で、40 GHz の繰り返し周波数のパルス発生が報告されている [4]。しかしながら、現段階のファイバ接続構成による

実験において、構成素子である半導体光増幅器 (Semiconductor optical amplifier, SOA) の入力端面が損傷するという問題が当研究室において数回発生した。その原因は Q スイッチによる高エネルギーパルスと推定されている。

本研究では Q スイッチによる高エネルギーパルス発生を防ぐため、外部変調を取り入れたパルス発生を試みた。繰り返し周波数 10 GHz のパルス発生実験を行い、外部変調による発振状態について調べ、外部変調が出力波形に与える影響について調査した。また、高周波化に向けて 40 GHz でのパルス発生実験も行った。

2 DISC-loop の原理と Q スイッチによる高エネルギーパルス発生

DISC-loop の構成は図 1 のようになっている。SOA とマッハ・ツェンダ干渉計 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) から構成される DISC-gate を、リングにした形状になっている。分布帰還型半導体レーザ (Distributed feedback laser diode, DFB-LD) から出力される連続光 (cw 光) を、リング共振器外部から SOA に入射すると、SOA へフィードバックする光により、SOA 内部で cw 光が相互位相変調 (Cross phase modulation, XPM) および相互利得変調 (Cross gain modulation, XGM) を受ける。XPM および XGM を受けた cw 光は MZI で

2 つに分割され、遅延時間 Δt を位相バイアスを π 与えられて合波することで、位相窓を形成し cw 光をパルスへと変換する。そのため、パルスの幅は Δt に追従し、中心波長は cw 光と一致する。その後、エルビウム添加ファイバ増幅器 (Er doped fiber amplifier, EDFA) で増幅され、エネルギー分配型 MZI (Energy-dividing MZI, ED-MZI) またはエタロンによって時間的に分割される。その繰り返し周波数は自由スペクトル間隔 (Free spectral range, FSR) に対応する。

現段階のファイバ接続構成では、モードロックパルス発振状態にするためには偏光の調整が必要である。cw 光は SOA に対して TE (Transverse electric) モードで入射し、フィードバック光は TM (Transverse magnetic) モードで入射する。MZI 内部の偏光子により TM モードのフィードバック光が除去され DISC-gate は偏光変換ゲートのように働く。フィードバック光が TE モードに近づくと増幅自然放出光 (Amplified spontaneous emission, ASE) が周回しモードロックパルス発振せず、cw 発振する。

フィードバック光の偏光を TE モードから TM モードへ回転させていくと cw 発振からモードロックパルス発振へ移行する。DISC-loop は受動モードロック発振をするため、cw 発振からモードロックパルス発振へ移行するときに突発的にパルスが発生したり停止したりした。これが Q スイッチのトリガとなり、キャリアが蓄積された EDFA によって高エネルギーパルスが発生し SOA の入力端面を損傷させる。

この突発的なパルス発生・停止を防ぐために外部変調による能動モードロックパルス発振を取り入れようと考えた。

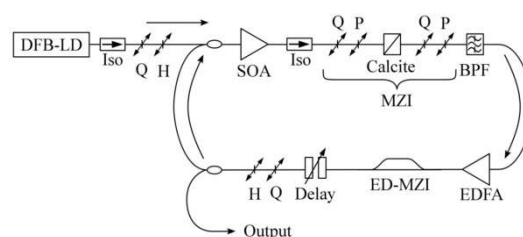


図 1 DISC-loop の基本構成

3 外部変調による 10 GHz パルス発生

外部変調の方法として、変調光注入を採用した。SOA を利用したファイバレーザで、変調光注入によりモードロックパルス発振をさせる研究はすでに行われており、変調光が SOA の利得を変調することで、SOA を強度変調器として動作させ、10 GHz のパルス発生を実現している[5]。この方法が DISC-loop にも取り入れられるのではないかと考えた。変調光を注入する DISC-loop 実験構成を図 2 に示す。リング共振器への入力部分が、図 1 の DISC-loop の基本構成と異なっている。DFB-LD から出力される波長 1550 nm の cw 光を電界吸収型変調器 (Electro-absorption modulator, EAM) によって、繰り返し周波数 10.5 GHz で強度変調し、DISC-loop のリング共振器へ入力する強度変調光を作成した。変調光の波形が図 3 である。繰り返し周波数はリング共振器内部の ED-MZI の FSR である 10.5 GHz に合わせた。消光比 9 dB、強度 0 dBm で SOA に対して TE モードで入射した。SOA は InPhenix 社製の IPSAD1501 を使用し、注入電流 200 mA で駆動した。DISC-gate の MZI で使用しているカルサイトは $\Delta t = 2.3$ ps のものを使用した。EDFA 後のバンドパスフィルタ (Band pass filter, BPF)、1/4 波長板 (Quarter wavelength plate, Q)、偏光子 (Polarizer, P)

は余分な ASE 成分を除去するために使用し、ED-MZI 後の Q、1/2 波長板 (Half wavelength plate, H) は SOA に入射するフィードバック光の偏光を調整するために使用した。そして、EDFA は利得が 27 dB 程度になるようにポンプパワーを調整した。

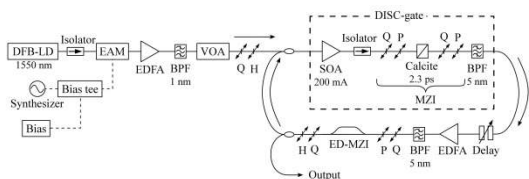


図 2 変調光を注入する DISC-loop 構成

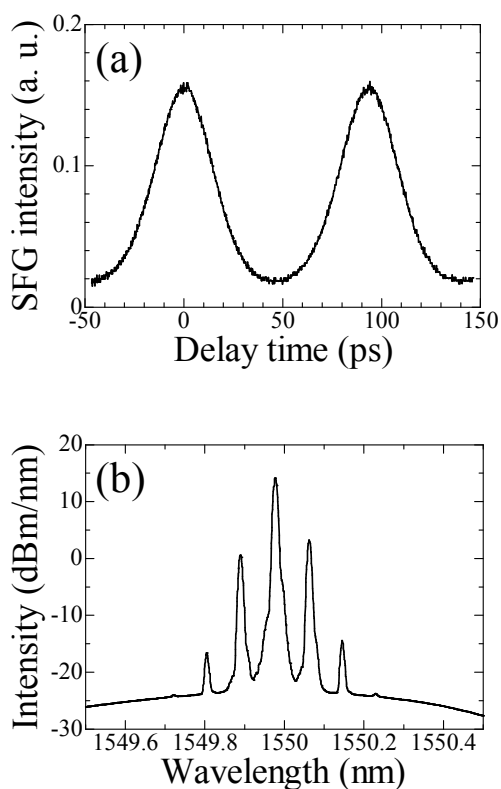


図 3 入力変調光波形

(a) 時間波形、(b) 光スペクトル

まずはフィードバック光が TE モードになるように偏光を調整し、従来の cw 光入力

では cw 発振する状態にした。そのときの出力波形が図 4 である。cw 光が出力されずにパルスが出力されていることがわかる。繰り返し周波数は外部変調と同じ 10.5 GHz、パルスの時間幅は 27 ps、消光比は 7.2 dB だった。光スペクトルを見ると 1548.3 nm と 1551.8 nm 付近の波長が強く発振している。この波長は DISC-gate の MZI で干渉するとき最大透過する波長であり、入力している変調光成分が出力されているわけではないことがわかる。つまり、SOA が強度変調器のように働き、ASE を強度変調することでパルス発振している。この状態からフィードバック光を TM モードへと調整していくと、図 5 のようにモードロックパルス発振した出力が得られた。繰り返し周波数は外部変調の周波数と一致した。パルス幅は波形を sech^2 型と仮定すると 2.1 ps となり、カルサイトの Δt に近い値となった。消光比は 13.8 dB、出力平均強度は -6 dBm だった。中心波長は入力の波長 1550 nm に一致した。よって、遅延干渉の原理によってパルスが形成されていることがわかる。

しかしながら、モードロックパルス発振時に、スペクトルの中心付近に窪みや、その長波長側に突出した成分が見られた(図 5 (b))。窪みは DISC-gate の位相バイアスが π に近いことが原因であるが、突出している成分は入力変調光が影響を与えているのではないかと考えた。

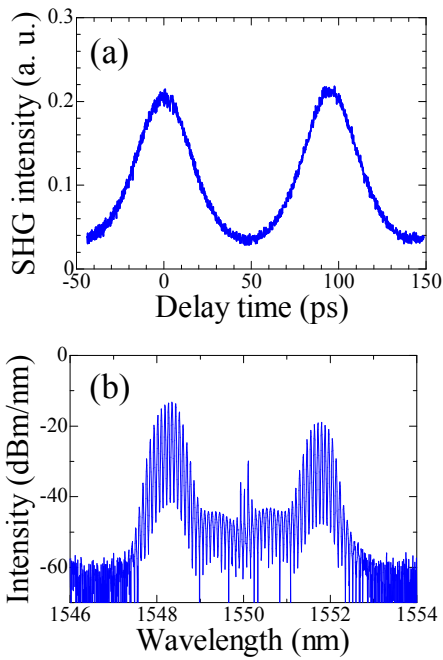


図4 外部変調状態の DISC-loop 出力
(a) 自己相関波形、(b) 光スペクトル

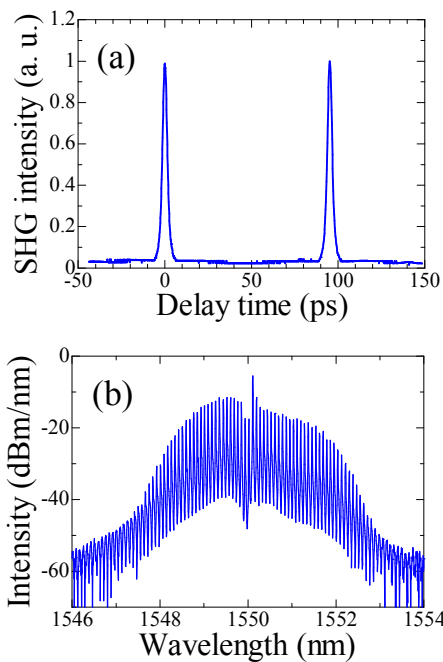


図5 モードロックパルス発振状態の
DISC-loop 出力
(a) 自己相関波形、(b) 光スペクトル

4 DISC-loop 出力の入力変調光依存性

次に入力変調光が DISC-loop 出力に与える影響について調査した。特に、変調光の消光比、繰り返し周波数依存性を調べた。まず、入力変調光の消光比を 9 dB から徐々に低下させていき 5 dB まで下げたときの出力が図 6 の緑線である。図 6 (a) の時間波形ではパルス幅、消光比ともにほとんど変化は見られなかったが、(b) の光スペクトルでは 9 dB の入力では大きく突出する成分が見られていたが、5 dB の入力では sech^2 型のフィッティングに収まるまでに低下した。この時の時間バンド幅積は 0.394 となりフーリエ変換限界に近い値となった。

入力の消光比をこれよりも低下させると発振が不安定になった。これは消光比が低下すると、かけている変調も低下することになりシングルパルス発振ではなく、マルチパルス発振するためであると考えられる。図 6(a) で入力が 5 dB の時、パルスの裾が若干広がっているのもこのためであると考えられる。

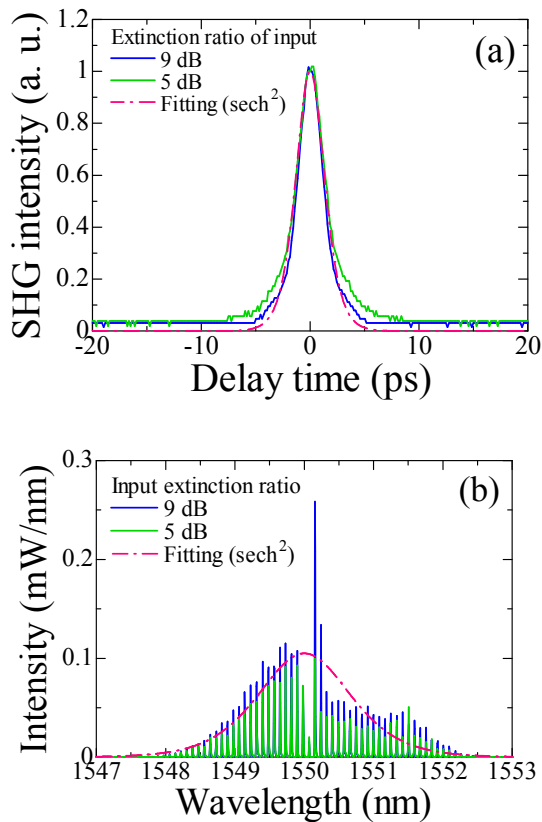


図6 DISC-loop 出力の入力変調光消光比依存性 (a)自己相関波形、(b)光スペクトル (縦軸 mW 表示)

次に、出力の変調繰り返し周波数依存性を調査した。変調周波数を ED-MZI の FSR=10.5 GHz から上下させ、出力波形を自己相関で時間平均し観測した。その結果が図7である。10.5 GHz の時、つまり変調周波数が ED-MZI の FSR と一致しているときが最も発振が安定し、細いパルスが観測された。この周波数からずれていくほど幅の広いパルスが観測された。これもマルチパルス発振が原因だと考えている。外部変調の周波数のパルスと、それが ED-MZI によって 10.5 GHz 周期で分割された光ができるために、マルチパルス発振するのではないかと推定している。測定した範囲の中では

10.4 ~ 10.5 GHz の範囲では Δt よりも細かいパルスが観測されたため、100 MHz の範囲で調整できる周波数精度で設定すれば安定したモードロックパルス発振が行えると考えられる。

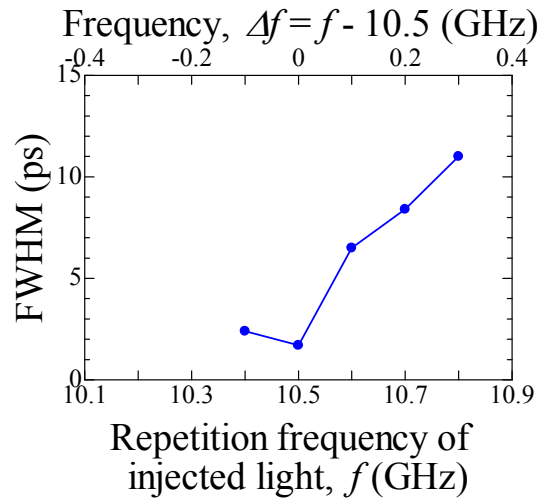


図7 DISC-loop 出力パルス幅の変調周波数依存性

5 外部変調による 40 GHz パルス発生

外部変調を利用して、40 GHz のパルス発生も行った。実験構成は図2の ED-MZI を、FSR が 40 GHz のエタロンに取り換え、変調光の繰り返し周波数をエタロンの FSR の 1/4 である 10.0 GHz に変更したものである。EDFA の利得は約 32 dB 程度になるように設定した。リング共振器に入力した変調光は光強度 0 dBm、中心波長 1550 nm、消光比 3 dB である。なお、出力の時間波形は MLFL で作成した 10.0 GHz の光クロックパルスを参照光とした相互相関で観測した。

この結果が図8の青線である。時間波形には入力変調光を重ね描きし、10 GHz の周期でピーク強度が増減しているパルス列が

観測された。この増減は変調光が遅延干渉によってパルスが形成されているためだと考えられる。波形を sech^2 型と仮定するとパルス幅は 6 ps となり、 $\Delta t = 2.3$ ps よりも広がった。これは、参照光の繰り返し周波数が DISC-loop 出力の繰り返し周波数と若干ずれているためではないかと推定している。光スペクトルでは 40 GHz の成分の根元に 10 GHz の成分が小さく見られた。

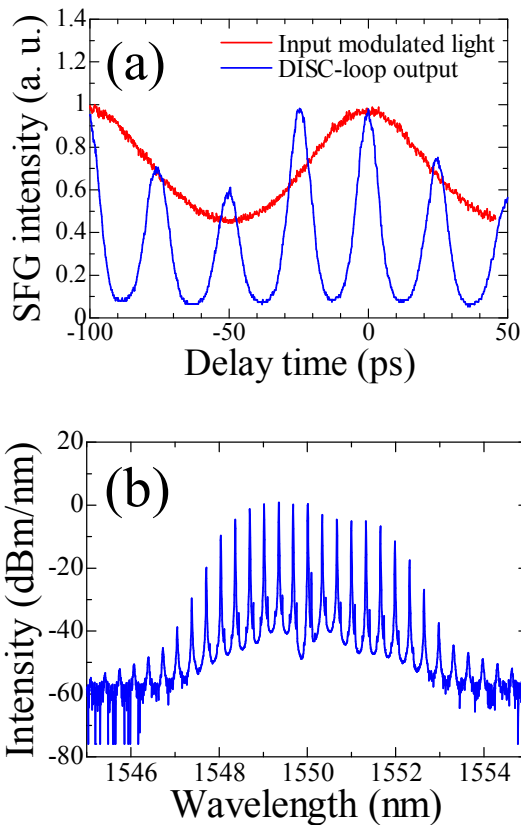


図 8 DISC-loop での 40 GHz パルス発振
(a)時間波形、(b)光スペクトル

6 結論

DISC-loop において Q スイッチによる高エネルギーパルス発生を防ぐために、変調光注入による外部変調を取り入れたパルス発生を行った。結果として、SOA へのフィ

ードバック光の偏光状態によって、外部変調による発振状態と、遅延干渉によるモードロックパルス発振状態が観測された。そして、モードロックパルス発振時の出力は入力変調光の消光比と繰り返し周波数に大きく影響を受けた。また、40 GHz のパルス発生実験も行い、10 GHz の変調光と FSR が 40 GHz のエタロンを使用することで、40 GHz のパルスが発生することも示した。

今後の課題としては外部変調による発振とモードロックパルス発振の発振条件について、より具体的に調査することや、本方式を用いた 40 GHz 以上の高周波パルス発生が挙げられる。

参考文献

- [1] Y. Ueno *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 10, pp. 346-348 (March 1998)
- [2] Y. Ueno *et al.*, Appl. Phys. Lett., vol. 79, pp. 2520-2522 (2001)
- [3] Y. Barbarin *et al.*, Proc. IEEE/LEOS Benelux, pp. 249-252 (2005)
- [4] R. Suzuki *et al.*, CLEO/QELS 2006, CMG5 (2006)
- [5] C. O'Riordan *et al.*, Opt. Comm., 283, pp. 1865-1868 (2010)