

# 半導体全光ゲート型モードロックパルスレーザの 出力パルス波形の外部変調依存性

先進理工学専攻 上野研究室 平井 恭兵

## 1. はじめに

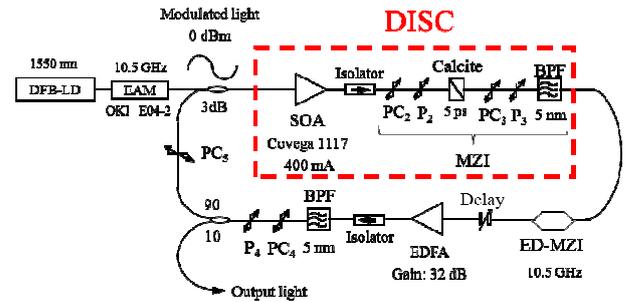
通信需要の増加から、高速でかつ大容量、省エネな通信が求められている。しかし、現在の光通信では信号処理の際に光信号を電気信号に変換してから行われている。そのため、電子のドリフト速度限界等により信号処理速度が 40 GHz に制限される。また、信号変換で余分なエネルギー消費が生じる。そこで、光信号のまま信号処理をする「全光通信技術」が期待されている。全光通信において、光信号処理デバイスの制御光やデータ光源として高速でかつ集積化が可能な光クロックパルス発生器が必要とされる。本研究で扱う全光ゲート型モードロックパルスレーザ DISC-loop<sup>1</sup>は、40 Gb/s の超高速動作や原理的に集積化が可能であり、パルス幅、波長、繰り返し周波数が任意に調整できるという特徴があり、上記のクロックパルス光源として有用である。過去に、40 Gb/s の光クロックパルス発生<sup>2</sup>や高純度周波数のパルス発生<sup>3</sup>、集積化に向けたファイバ増幅器を用いない構成でのパルス発生<sup>4</sup>などが報告されている。一方で、構成素子の半導体光増幅器が Q スイッチ動作で発生した高エネルギーパルスによって損傷するという問題が生じた。そこで、共振器外部から入射していた連続光に周期的に強度変調をかけて能動的なモードロックを行い、強度変調を下げていくことで Q スイッチ動作を抑えパルス発生させる外部変調方式<sup>5,6</sup>が提案された。しかし、外部変調方式で入力光の強度変調を弱めていくとモードロックが停止するという問題が生じた。また、モードロックの過程で Q スイッチ動作の抑制が実証されていなかった。

本研究では、外部変調方式 DISC-loop の出力パルスの強度変調依存性を測定し、微弱変調時のモードロック停止の原因を調査した。また、パルス発振閾値条件を調査し、モードロックの過程で外部変調方式が Q スイッチ動作を抑制するのに有効であることを実証した。

## 2. DISC-loop のパルス発生原理と Q スイッチでの高エネルギーパルス発生

DISC-loopの構成は図1のようになっており、半導体光増幅器 (Semiconductor optical amplifier, SOA)とマッハツェンダー干渉計 (Mach-zehnder interferometer, MZI)から構成される遅延干渉型波長変換器 (Delayed interference signal-wavelength convertor, DISC)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、片方に遅延時間 $\Delta t$ 、もう一方に位相バイアスを $\pi$ 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 $\Delta t$ 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、エネルギー分配型マッハツェンダー干渉計 (Energy-dividing Mach-zehnder interferometer, ED-MZI)やエタロンなどの共振器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は偏光変換ゲートとして働く。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に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フィードバック光が除去され、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突発的にパルスが発生したり停止したりする。また、ファイバ接続構成であるため、リング共振周波数が10~20 MHzと低いいため、EDFAでキャリアが蓄積されやすい。これらがQスイッチのトリガとなり、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。



DFB-LD: 分布帰還型半導体レーザー  
EAM: 電界吸収型変調器  
DISC: 遅延干渉型波長変換器  
ED-MZI: エネルギー分配マッハツェンダー干渉計  
EDFA: Er 添加ファイバ増幅器  
P: 偏光板  
PC: 偏光制御器  
BPF: バンドパスフィルタ

図2 外部変調方式 DISC-loop の実験構成図

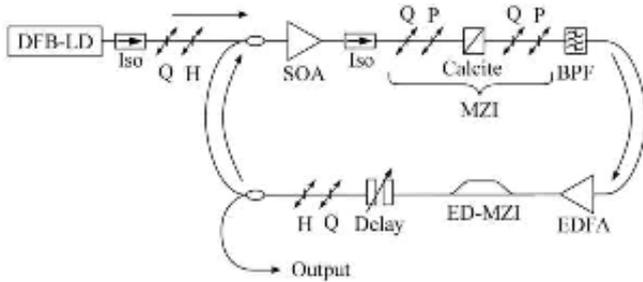


図1 DISC-loop の実験構成図

### 3. 外部変調方式 DISC-loop の実験構成

外部変調方式DISC-loop実験構成を図2に示す。DFB-LDから出力される1550 nmのcw光を電界吸収型変調器(Electro-absorption modulator, EAM)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、SOAのTEモードでリング共振器に入力した。変調光において、入力強度を0 dBmに設定した。変調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。DISCにおいて、SOAはCovega社製の型番1117のモジュール型ものを使用し、注入電流は400 mAとした。カルサイトは遅延時間 $\Delta t$ が5.0 psのものを使用した。また、バンドパスフィルタ (Band pass filter, BPF)の透過帯域幅は5 nmである。EDFA後の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、フィードバック部分の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TMモードに調整するために使用した。そして、EDFAでリング共振器内部の損失24.2 dBを補償するようにポンプパワーを調整した。DISC-loopの出力時間波形はパルス幅2.4 ps、繰り返し周波数10.5 GHzのパルス参照光として使用し、相互相関にて観測した。

### 4. 出力パルス波形の外部変調度依存性

強度変調度を0.448~0.979に変えた時の出力パルスを図3に示す。図3 (a)の相互相関波形において、強度変調度が0.915 以上の時、パルスの裾に歪み(サブパルス)が顕著に現れた。これは変調による強度の時間変化により、DISCのMZIで打ち消されず透過しているためだと考えられる。また、変調度が0.742~0.915の時、変調度の低下に伴いピーク強度が低下した。そして、変調度が0.742以下の時はパルス発生しなかった。繰り返し周波数は強度変調度によらず入力変調光と同じ10.5 GHzであった。光スペクトルを図3 (b)に示す。過去の研究結果<sup>6</sup>と同様に強度変調度の減少にともない、中心波長周辺の変調光成分が抑えられていくのが観測された。

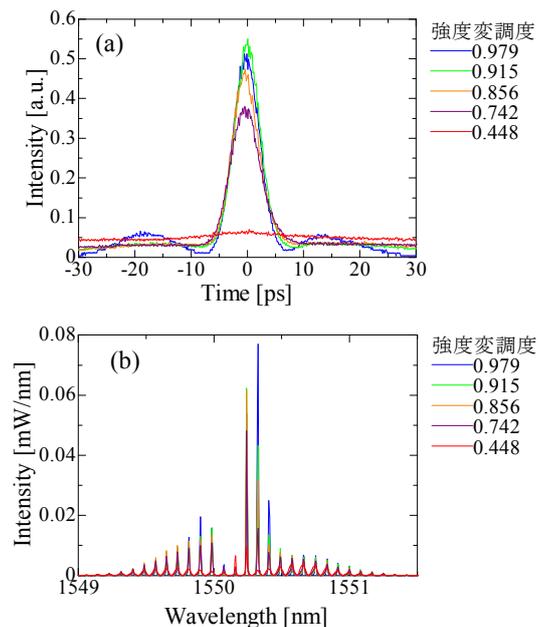


図3 強度変調度での出力パルス  
(a) 相互相関波形 (b) 光スペクトル

図3(a)から求めた出力パルスの強度依存性について述べる。まず、サブパルスの相対強度比を図4に示す。強度変調度が0.915以上の時、強度変調度の減少にともないサブパルスの相対強度比も減少した。また、変調度が0.742~0.915の時、強度変調度によらずほぼ一定であった。これは、強度変調度の低下によりサブパルスが抑制されると同時にパルスのピーク強度も低下しているためだと考えられる。そして、変調度が0.742以下の時、モードロックの停止にともないサブパルスの相対強度比が大きく増加した。

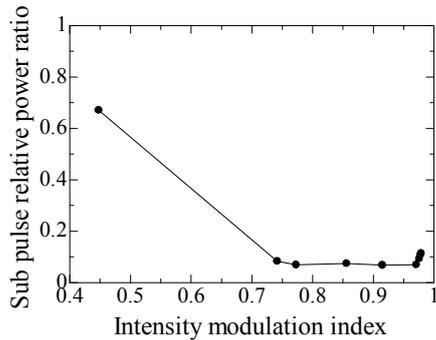


図4 サブパルスの相対強度比の強度変調度依存性

次に、パルスの半値全幅(Full Width Half Maximum, FWHM)を図5に示す。FWHMはガウス曲線をフィッティングさせて求めた。強度変調度が0.915以上の時、強度変調度によらずパルスのFWHMは4.9 psで一定であった。これはカルサイトの遅延時間5.0 psとほぼ一致する。また、変調度が0.742~0.915の時、強度変調度の減少にともない、FWHMは増加した。これは、強度変調度の低下により入力変調光のFWHMも増加しているためだと考えられる。そして、変調度が0.742以下の時、モードロックの停止にともないFWHMが大きく増加した。

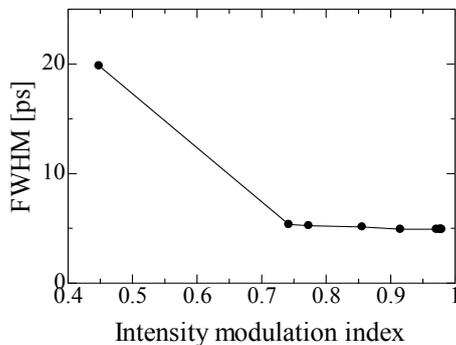


図5 FWHMの強度変調度依存性

時間帯域幅積を図6に示す。時間帯域幅において、パルス幅とスペクトル幅はガウス曲線をフィッティングさせて求めた。強度変調度が0.915以上の時、強度変調度によらず時間帯域幅積は0.71で一定であった。また、変調度が0.742~0.915の時、強度変調度の減少にともない、時間帯域幅積は増加した。これは、強度変調度の低下によりパルスのFWHMも増加しているためである。そして、変調度が0.742以下の時、モードロックの停止にともない時間帯域幅積が大きく増加した。本研究では、強度変調度によらず時間帯域幅積がフーリエ変換の限界値0.44より大きい値になった。この原因として、カルサイトの遅延時間5.0 psに対してリング共振器中のBPFの透過帯域幅5 nmと広いことが考えられる。(フーリエ変換限界値0.44でのパルス幅5.0 psに対するスペクトル幅は約0.7 nmである。)

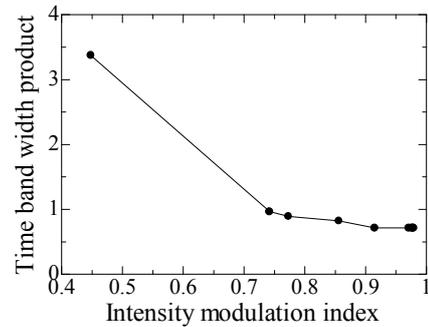


図6 時間帯域幅積の強度変調度依存

## 5. パルス発振閾値条件

外部変調方式によって、Qスイッチ動作を抑制できるか検証するために、パルス発振閾値条件を調査した。実験構成は図2と同じで、EDFAの励起レーザの注入電流を増減させることでパルス周回利得を-21.8 dBから11.7 dB (EDFAの利得は2.4 dBから35.9 dB)に調整し、そのときの出力波形を調査した。また、入力光の強度変調度は0.979に設定した。

光出力強度を図7に示す。パルス発振利得周辺で出力強度の増加率が変化した。また、従来のDISC-loopのような閾利得周辺での出力強度の急な増加は観測されなかった<sup>7</sup>。これは、パルス発振状態になる前ではDISCを透過した入力変調光を増幅しているのに対し、パルス発振状態ではパルスを増幅しているためである。

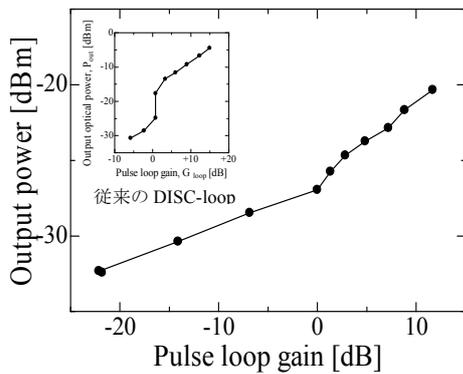


図 7 周回利得による出力光強度

相互相関波形を図8に示す。従来の DISC-loopのようにパルス発振利得周辺での突発的にパルスは発生せず<sup>7</sup>、利得が増加するにつれてパルスのピーク強度が高くなった。また、パルス発振利得以下の時にも雑音ではない光が出力されているのが観測された。これは、DISCを透過した入力変調光を増幅したものである。

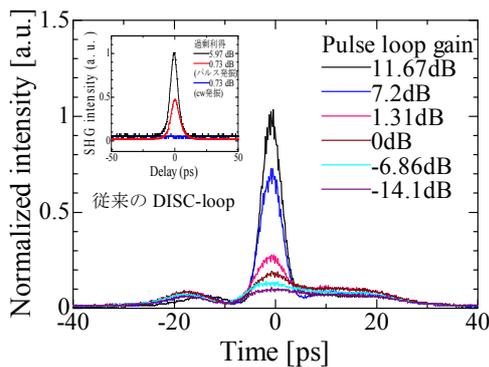


図 8 パルス周回利得による相互相関波

光スペクトルを図9に示す。パルス周回利得が0 dB以上の時、利得が高くなるにつれてスペクトル幅が広がり始めた。これは、パルス周回利得が0 dB以下の時は変調光が出力され、パルス周回利得が0 dB以上の時は利得が損失より上回る波長帯域が広がるためだと考えられる。

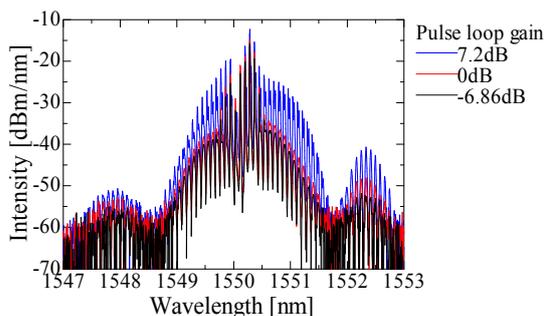


図 9 パルス周回利得による光スペクトル

電気スペクトルを図10に示す。パルス周回利得が低くなるほど、サイドモードの強度が小さくなり、0 dB以下のときはシングルモードになった。これは、パルス周回利得が0dB以上の時はパルスが発振し、0 dB以下の時はDISCを透過した周波数純度の高い入力変調光が出力されているためである。

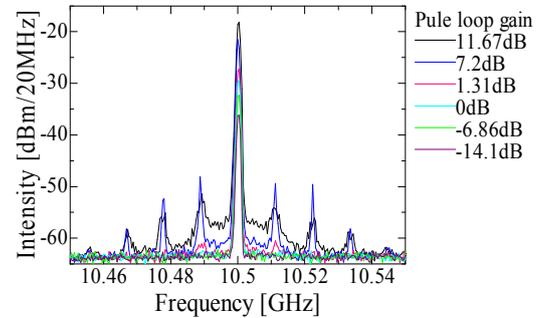


図 8 パルス周回利得による電気スペクトル

以上の結果から、変調光を利用した DISC-loop ではパルス発振に移行する過程で Q スイッチ状態にならずにパルスをモードロックできることが考えられる。つまり、外部変調方式では Q スイッチによる高エネルギーパルスが発生して、SOA を劣化・損傷することはないといえる。

## 6. 結論

本研究では、外部変調方式 DISC-loop で問題になっていた「入力光の微弱強度変調時のモードロックの停止」、「Q スイッチ状態の抑制の有効性の実証」の解決に向けて、外部変調方式の全光ゲート型モードロックパルスレーザの出力パルスの強度変調依存性とパルス発振閾値条件を調査した。

出力パルスの強度変調の依存性では、強度変調度が0.92以上では出力パルスにサブパルスが発生し、変調度を下げていくとサブパルスが抑制されていくがそれと同時に出力パルスのピーク強度も低くなり、強度変調度が0.74以下でモードロックが停止した。また、半値全幅は強度変調度が0.92以上ではカルサイトの遅延時間5.0 psとほぼ一致し、強度変調度の減少にともない増加し、モードロックの停止時には半値全幅が大きく増加した。そして、時間帯域幅積も出力パルスの半値全幅と同様な傾向が得られた。

出力パルスのパルス周回利得の依存性ではパルス発振状態になる前では DISC を透

過した入力変調光を増幅しているのに対し、パルス発振状態ではパルスを増幅しているため、従来の全光ゲート型モードロックパルスレーザのような発振利得周辺での急激なパルス発生および出力光強度の増加は観測されなかった。このことから、外部変調方式ではQスイッチ状態の抑制に有効的であることが実験的に明らかになった。

今回の研究の他にさらなる調査を行うことで微弱変調時にモードロックが停止する原因の解明が今後の課題として挙げられる。

## 参考文献

- [1] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, “5-ps, 10-GHz pulse generation from an all-optical semiconductor switch embedded in a ring cavity,” *App. Phys. Lett.*, Vol. 79, No. 16, pp. 2520-2522 (2001)
- [2] R. Suzuki, T. Ohira, Jun Sakaguchi, and Y. Ueno, “40-GHz mode-locked pulse generation with a new scheme of SOA-based pulse generators,” *CLEO/QELS 2006, CMG5 (2006)*
- [3] 中本亮一、竹内宏幸、坂口淳、上野芳康、“半導体全光ゲートを利用する受動的モードロックパルス発生器の単一縦モード発振達成”、2008年春季第55回日本応用物理学会学術講演会、vol. 3, 30a-ZF-6
- [4] 平井恭兵、新井隆博、吉川恵太、上野芳康、“全ての光増幅部を半導体光増幅器に置換した超高速全光ゲート型モードロックパルスレーザ”、2012年春季日本応用物理学会、2012/03/14~17
- [5] 新井隆博、“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”、電気通信大学修士論文 (2012)
- [6] 新井隆博、平井恭兵、杉浦賢太、Nguyen Tuan Anh、上野芳康、“強制変調を用いた全光ゲート型パルス発生器の短パルス化およびスペクトル歪改善”、2011年秋季 第72回応用物理学会学術講演会、31a-ZN-11
- [7] 鈴木励、“半導体全光偏光変換を利用した40GHzモードロックパルス発生器の研究”、電気通信大学修士論文 (2006)

## 学会発表実績

- [1] 平井恭兵、新井隆博、吉川恵太、上野芳康、“全ての光増幅部を半導体光増幅器に置換した超高速全光ゲート型モードロックパルスレーザ”、2012年春季日本応用物理学会、2012/03/14~17
- [2] K. Hirai, T. Arai, K. Yoshikawa and Y. Ueno, “Ultrafast all-optical-gate-type mode-locked pulse laser without using any optical-fiber amps,” *Triangle Symposium on Advanced ICT 2012 (TriSAI2012)*, University of Electro-Communications (UEC), Tokyo, Japan, S-J-20, Sep 18-19, 2012
- [3] 平井 恭兵, 新井 隆博, 吉川 恵太, 坂野 将太, 上野 芳康, “外部変調・半導体全光ゲート型モードロックパルスレーザの出力パルス波形の外部変調度依存性”, 2013年春季 第60回応用物理学会学, 29p-B3-4, 2013/03/27~30

# 全ての光増幅部を半導体光増幅器に置換した 超高速・全光ゲート型モードロックパルスレーザ

Ultrafast all-optical-gate-type mode-locked pulse laser without using any optical-fiber amps.

電気通信大学 先進理工学専攻<sup>1</sup>, °平井 恭兵<sup>1</sup>, 新井 隆博<sup>1</sup>, 吉川 恵太<sup>1</sup>, 上野 芳康<sup>1</sup>

Dep. of Engineering Science, Univ. of Electro-Communications<sup>1</sup>, °Kyohei Hirai<sup>1</sup>, Takahiro Arai<sup>1</sup>,  
Keita Yoshikawa<sup>1</sup>, Yoshiyasu Ueno<sup>1</sup>, E-mail: hirai@ultrafast.ee.uec.ac.jp

## 1. はじめに

さらなる高速・大容量な通信を実現するために安定した高繰り返し周波数の光クロックパルス光源が必要とされている。また、将来光コンピュータを実現するにあたって、光信号処理デバイスの集積化が要求される。遅延干渉型全光ゲート(DISC-gate)<sup>[1]</sup>を利用したパルス発生器 DISC-loop<sup>[2]</sup>は繰り返し周波数、半値全幅、中心波長がそれぞれ任意に設定可能である<sup>[3]</sup>。近年では外部変調を用いた DISC-loop でのパルス発生が報告されている<sup>[4]</sup>。従来の DISC-loop では、利得を得るためにエルビウム添加ファイバ増幅器(EDFA)を使用していた。しかし、EDFA では集積化が困難である。一方、半導体光増幅器(SOA)は集積化が容易である。本研究では、光増幅部を全て SOA に置換した DISC-loop を提案し、10.5 GHz、5.3 ps のパルス発生を報告する。

## 2. DISC-loop の構成

本研究での DISC-loop の構成を図 1 に示す。DISC-loop は、主に光源である分布帰還型半導体レーザ(DFB-LD)と DISC-gate、共振器、光増幅器、偏光板、波長板のリング構造から形成される。本研究では、リング部分での損失は 28.8 dB である。また、利得を得るために、SOA2 に IPSAD1501, SOA3 に IPSAD 1503c を使用した。これらの非飽和利得の合計は 33.9 dB である。パルスの中心波長を決める DFB-LD の連続光(cw 光)の波長は 1550 nm、繰り返し周波数を決める共振器はエネルギー分配マツハ・ツェンダー干渉計(ED-MZI)でその自由スペクトル領域(FSR)は 10.5 GHz、半値全幅(FWHM)を決めるカルサイトの遅延時間は 5.0 ps に設定した。

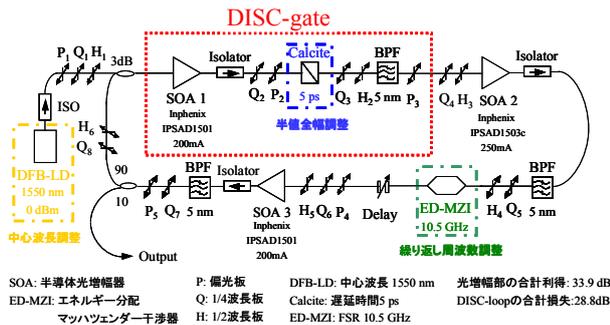


図 1 DISC-loop の構成図

## 3. 実験・結果

パルス発生させるため、cw 光を DISC-gate の SOA の TE または TM モードに、周回光は cw 光と直行して入射するように偏光を調整した。また、リング部の基本周波数が ED-MZI の FSR の整数倍になるように Delay を調整した。本研究ではこれらに加え、各光増幅部の SOA に TE または TM モードで入射するように偏光を調整した。

出力パルスの時間波形、光スペクトル、電気スペクトルを図 2 に示す。出力パルスは中心波長 1550 nm、繰り返し周波数 10.48 GHz、消光比 12 dB、半値全幅 5.3 ps と設定した値とほぼ一致した。これから、光増幅部を全て SOA に置換した DISC-loop でも、繰り返し周波数、半値全幅、中心波長がそれぞれ任意に設定可能であることが分かる。

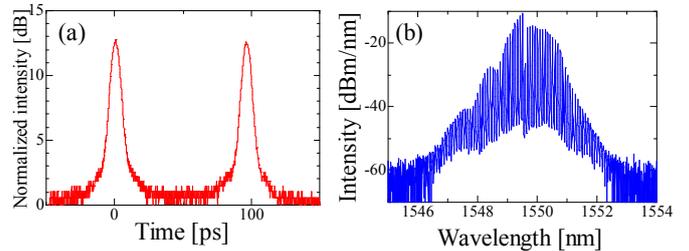


図 2 DISC-loop の出力パルス  
(a) 時間波形 (b) 光スペクトル

## 4. 結論

本研究では、光増幅部を全て SOA に置換した DISC-loop を提案し、10.5 GHz、5.3 ps のパルス発生に成功した。今後は、シングルモードかつ安定なパルス発振を目指していく。

## 参考文献

- [1] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, "5-ps, 10-GHz pulse generation from an all-optical semiconductor switch embedded in a ring cavity," Appl. Phys. Lett., vol. 79, pp. 2520-2522, Oct. 2001.
- [2] 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, Mar. 1998.
- [3] R. Suzuki, T. Ohira, J. Sakaguchi, and Y. Ueno, "40-GHz mode-locked pulse generation with a new scheme of SOA-based pulse generators," CLEO/QELS 2006, CMG5, 2006
- [4] 新井 隆博, 平井 恭兵, 杉浦 賢太, Nguyen Tuan Anh, 上野 芳康, "強制変調を用いた全光ゲート型パルス発生器の短パルス化およびスペクトル歪改善", 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 2011

# 外部変調・半導体全光ゲート型モードロックパルスレーザの出力パルス波形の外部変調度依存性

## External intensity modulation index dependence of output pulse time waveform in all-optical-gate-type pulse generator injecting modulated light

電通大先進理工<sup>1</sup>, <sup>○</sup>平井 恭兵<sup>1</sup>, 新井 隆博<sup>1a)</sup>, 吉川 恵太<sup>1</sup>, 坂野 将太<sup>1</sup>, 上野 芳康<sup>1</sup>  
 Dep. of Engineering Science, Univ. of Electro-Communications<sup>1</sup>, <sup>○</sup>Kyohei Hirai<sup>1</sup>, Takahiro Arai<sup>1a</sup>,  
 Keita Yoshikawa<sup>1</sup>, Shota Sakano<sup>1</sup> and Yoshiyasu Ueno<sup>1</sup>, E-mail: yoshiyasu.ueno@uec.ac.jp

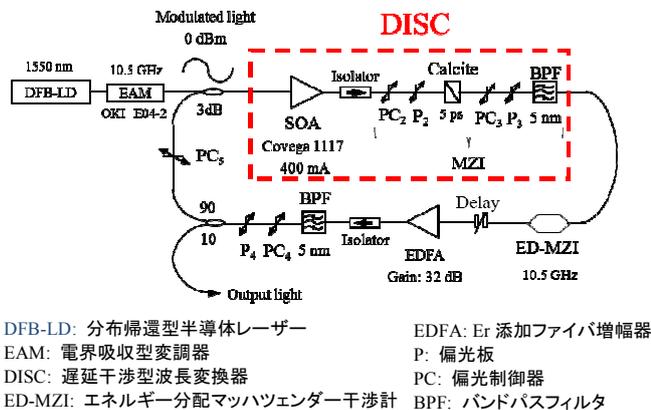
### 1. 序論

通信需要の増大から、高速・大容量な通信が求められており、解決策の一つとして光時分割多重(OTDM)方式が考えられている。OTDM方式では高繰返し周波数、高安定、短パルスの光クロックパルスが必要となる。このような光源として、全光ゲート型パルス発生<sup>[1-6]</sup>が期待されている。本研究の全光ゲート型パルス発生器(DISC-loop)<sup>[1,3-6]</sup>はパルス幅、中心波長、繰返し周波数が任意に設定可能という利点がある。一方で、パルス発振の過程でQスイッチによる高エネルギーパルスが発生し、構成素子である半導体光増幅器(SOA)が損傷する問題が起きた。これを防ぐため、外部変調方式が提案され<sup>[5]</sup>、入力光の強度変調度を調整することでスペクトル歪の低減などが報告されている<sup>[5-6]</sup>。しかし、出力パルスの時間波形に関しては具体的に調査されていなかった。

本研究では、外部変調方式DISC-loopの出力パルス波形の外部変調度依存性の調査結果を報告する。

### 2. 外部変調方式 DISC-loop の実験構成

本研究の外部変調方式DISC-loopの実験構成をFig.1に示す。分布帰還型半導体レーザーからの波長1550 nmの連続光を電界吸収型変調器で強度変調し、SOAのTEモードでリング共振器に入力した。また、変調周波数はエネルギー分配型マッシュエンダー干渉計の自由スペクトル間隔10.5 GHzに設定した。パルスの半値全幅を決めるカルサイトの遅延時間は5.0 psに設定した。SOAはCovega 1117を使用し、注入電流を400 mAに設定した。



DFB-LD: 分布帰還型半導体レーザー  
 EAM: 電界吸収型変調器  
 DISC: 遅延干渉型波長変換器  
 ED-MZI: エネルギー分配マッシュエンダー干渉計  
 EDFA: Er 添加ファイバ増幅器  
 P: 偏光板  
 PC: 偏光制御器  
 BPF: バンドパスフィルタ

Fig.1 Experimental setup of DISC-loop

### 3. 出力パルス波形の外部変調度依存性

強度変調度を変えた時の出力パルス波形をFig. 2に示す。変調度が0.915以上の時、パルスの裾に歪みが顕著に現れた。また、変調度が0.742から0.915の時、変調度の低下に伴いピーク強度が低下した。そして、変調度が0.742以下の時はパルス発生しなくなった。

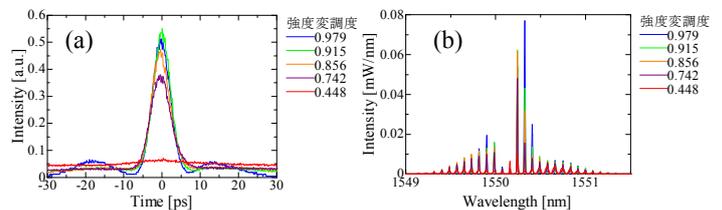


Fig.2 Output pulse by intensity modulation index  
 (a) Cross correlation waveform (b) Optical spectrum

サブパルスの相対強度比、半値全幅(FWHM)、時間帯域幅積の外部変調度依存性をFig. 3に示す。変調度が0.742以下の時は、サブパルスの相対強度比、FWHM、時間帯域幅積が急激に増加した。これは、パルス発振が止まり、変調光が周回しているためだと考えられる。

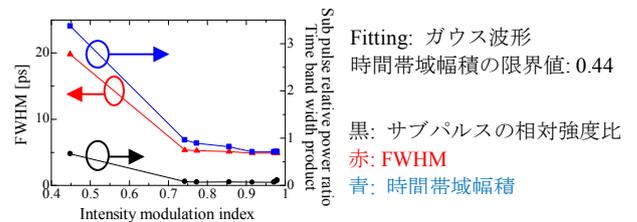


Fig.3 Intensity modulation index dependence

### 4. 結論

本研究では、外部変調方式DISC-loopの出力パルス波形の外部変調度依存性を調査した。今回の系統的な研究の微弱変調時にモードロック停止した原因を、今後、解明する。

### 参考文献

- [1] Y. Ueno et al, Appl. Phys. Lett., vol. 79, pp. 2520-2522, Oct. 2001.
- [2] L. Schares et al, Lightwave Technol., vol. 22, No. 3, pp. 859-873, Mar., 2004.
- [3] R. Suzuki et al, CLEO/QELS 2006, CMG5, 2006
- [4] R. Nakamoto et al, Nano, Optical Society of America, May 2008, paper no. Nano-08-191.
- [5] 新井隆博他, 2011年春第58回応用物理学会関係連合講演会, 24a-KA-9
- [6] 新井隆博他, 2011年秋第72回応用物理学会関係連合講演会, 31a-ZN-11