

# 全光ゲート型モードロックパルスレーザ内部の4種の固有周波数の相互共鳴度がパルス波形品質に与える影響とその物理的原因

先進理工学専攻 上野研究室 南出 雄佑

## 1. 序論

光時分割多重方式<sup>[1,2]</sup>には、高繰り返し周波数、短パルス、高い時間安定性をもつ光クロックパルス発生器が必要である。MLLD<sup>[3]</sup>や SESAM 方式<sup>[4]</sup>、モードロック (ML)ファイバーレーザ方式<sup>[5]</sup>といったパルス発生器があるが、遅延干渉型全光ゲート (DISC-Gate)を用いた全光ゲート型パルス発生器 (DISC-loop)<sup>[6]</sup>は、繰り返し周波数、パルス幅、中心波長が原理的に可変である。全光ゲート型パルス発生器はリング共振器構造をとり、リング共振器へ外部変調光を入力している。光中心周波数( $f_1$ )、エタロンの FSR( $f_2$ )、外部変調周波数( $f_3$ )、リング共振周波数( $f_4$ )の4種類の固有周波数が全光ゲート型モードロックパルス発生器に含まれる。モードロックパルスの繰り返し周波数はリング共振器内部に組み込んでいるエタロンの FSR によって決定されるかは定かではない。

これまで  $f_2$  を基準として  $f_3$  に正負のオフセットを与えたときの出力特性は研究されていない。本研究では、 $f_2$  の周波数オフセットの許容範囲が決定付けられる要因を理解することを目的とし、 $f_2$  を基準として  $f_3$  に正負のオフセットを与えたときの出力特性を調査した。

## 2. DISC-loop の構造と出力特性の予測

図 1 に DISC-loop の構造を示す。DISC-loop は、分布帰還型半導体レーザ (DFB-LD)、強度変調を行う電界吸収型変調器 (EAM) と遅延干渉型波長変換器 (DISC)、エルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) 等から形成されるリング共振器とリング共振器に入射する外部変調光で形成される。パルスの中心波長は入力光の波長、繰り返し周波数はエタロンの自由スペクトル領域 (FSR)、半値全幅 (FWHM) はカルサイトの遅延時間が決定付ける。本研究では遅延時間が 2.3 ps のカルサイトを使用し、入力変調光を中心波長 1550 nm に設定した。

外部変調周波数( $f_3$ )の基準値を定めるために、リング共振器内部のエタロンの FSR( $f_2$ )の精度を高く見積もる必要がある。FSR の精度を高めるために測定したエタロンの透過スペクトルと計算結果の不一致率を相対 2 乗平均残差とし、その相対 2 乗平均残差の最小値から 5% の範囲である残差曲線全幅を FSR 測定誤差範囲とした (図 2 はフィネス約 11 のエタロンの結果である)。

フィネスが約 58 (追試時約 40) のエタロン、フィネスが約 11 の 2 種のエタロンを用いてオフセット依存性調査を行った。図 2 からエタロン FSR を見積もり、外部変調周波数基準値とし、最大でエタロン FSR の  $\pm \frac{5}{400}$  はずし、自己相関方式による出力モードロックパルスの出力特性を調査した。

オフセットを与えることでパルス半値全幅が広がる傾向になる、と予測した。また、エタロンのフィネスが高い場合の方が、フィネスの低い場合よりもオフセット依存性が顕著である、と予測した。時間帯域幅積 ( $t \cdot f$  積) はオフセットを与えることで大きくなると考えられる。

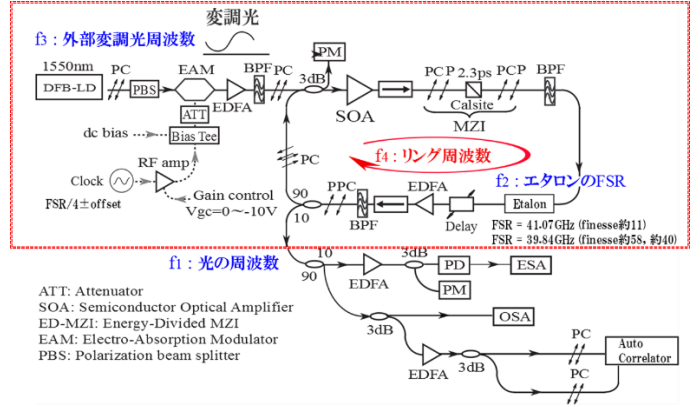


図 1 実験構成図

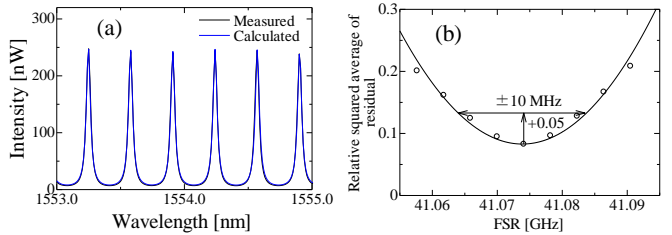


図 2 エタロン FSR 測定方法

(a) 透過スペクトル (b) 相対 2 乗平均残差曲線

## 3. モードロックパルスのオフセット依存性

外部変調周波数を基準値から最大でエタロン FSR の  $\pm \frac{5}{400}$  はずし、自己相関方式により時間波形を測定しパルス半値全幅を見積もった。また、光スペクトル半値全幅を見積もり、 $t \cdot f$  積を算出した。図 3 にパルス半値全幅、 $t \cdot f$  積のオフセット依存性を示す。

パルス半値全幅のオフセット依存性において、オフセット 0 近傍においてパルス半値全幅の極小値を示す傾向にある。フィネスの低いエタロンの使用時では、オフセット 0 近傍においてプラスにはずしていきにしたがってパルス半値全幅は緩やかに広くなり、マイナス側にはずしていきにしたがって急激に広がる傾向を示した。

$t \cdot f$  積のオフセット依存性において、フィネスの低いエタロンの使用時では、 $t \cdot f$  積はオフセット 0 近傍で最小値を示し、オフセットを与えるにつれて大きくなる傾向にある。パルス半値全幅、 $t \cdot f$  積のオフセット依存性は予測と異なりフィネスを高いエタロンを用いても強くならなかった。

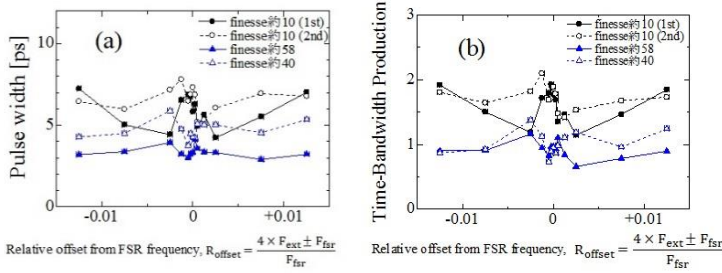


図3 自己相関方式による出力パルスのオフセット依存性  
(a) パルス半値全幅 (b)  $t \cdot f$  積

#### 4. 相互相関方式を用いたモードロックパルスのオフセット依存性

これまでのオフセット依存性が予測に反し、オフセット 0 近傍において極大を示した原因を自己相関方式によるものとえ、サンプリングスコープを用いた相互相関方式により出力 ML パルスのオフセット依存性の調査を行った。エタロン FSR から外部変調周波数を最大で  $\pm 1$  GHz はずした。図 4 にパルス半値全幅、消光比のオフセット依存性を示す。

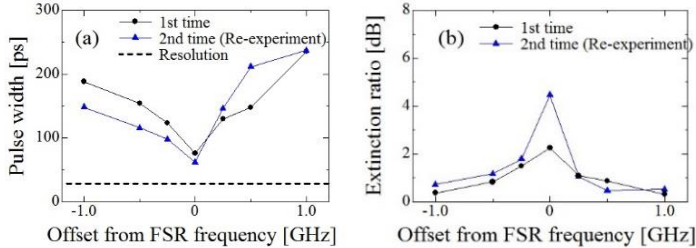


図4 相互相関方式による出力パルスのオフセット依存性  
(a) パルス半値全幅 (b) 消光比

出力パルスの半値全幅のオフセット依存性、消光比のオフセット依存性はそれぞれオフセット 0 近傍において極小、極大を示した。しかしオフセット 0 における最小のパルス半値全幅は約 60 ps と、分解能約 28 ps に比べて 2 倍以上広い。

次にリング周波数について着目した。フィネスを約 11 から約 36 にあげ、リング周波数の整数倍を外部変調周波数に合わせた結果、パルス半値全幅は約 39 ps であった。はずした場合のパルス半値全幅は約 90 ps であった(図 5)。

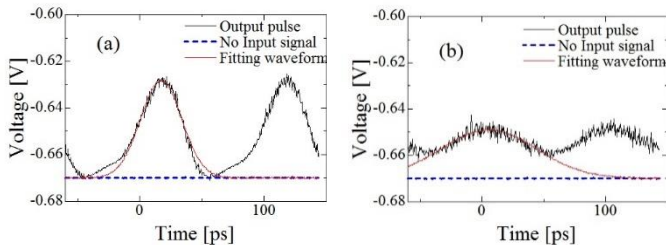


図5 サンプリングスコープによる出力パルス波形

- (a) リング周波数の整数倍を外部変調周波数に合わせた場合
- (b) リング周波数の整数倍を外部変調周波数から意図的にはずした場合

#### 5. 結論

外部変調周波数を基準としてエタロンの FSR に正負のオフセットを与えたときの出力特性を調査し、そ

の結果について評価した。

まず自己相関方式によりオフセット依存性を調査した。オフセット 0 近傍において極大を示し、フィネスの低いエタロンを使用したときよりもフィネスの高いエタロンを使用した場合の方がオフセット依存性の強い結果とはならず、予測と異なった。

次に相互相関方式によりオフセット依存性を調査した。出力パルスの半値全幅のオフセット依存性、消光比のオフセット依存性はそれぞれオフセット 0 近傍において極小、極大を示した。しかしオフセット 0 における最小のパルス半値全幅は約 60 ps と、分解能約 28 ps に比べて 2 倍以上広い。

フィネスを約 11 から約 36 にあげ、リング周波数の整数倍を外部変調周波数に合わせた結果、パルスの半値全幅は 39 ps 程度となった。また、はずした場合のパルスの半値全幅は 90 ps 程度であった。フィネス約 11 のエタロンを用いた際におけるオフセット依存性ではパルスの半値全幅の最小値が約 60 ps であった原因として、リング周波数の整数倍を外部変調周波数に合わせた精度が低かったことが考えられる。また、実験室の温度変化によって共振器長が変わり、リング周波数が高くもしくは低くなることでリング周波数の整数倍が外部変調周波数からはずれたことが考えられる。

エタロンの FSR に対する外部変調周波数のオフセットに加え、さらにエタロンの FSR に対するリング周波数の整数倍のオフセットを小さくし共鳴を強くすることで、 $t \cdot f$  積、出力パルス半値全幅、消光比の向上が見込まれる。

#### 参考文献

- [1] M. Nakazawa et al., Opt. Express, **20** (2012) 1129.
- [2] L.K. Oxenløwe et al., IEEE JLT, **28** (2010) 1789.
- [3] S. Arahira et al., IEEE JSTQE, **11** (2005) 1103.
- [4] U. Keller et al., IEEE JQE, **42** (2006) 838.
- [5] K.J. Weingarten et al., Electron. Lett., **40** (2004) 877.
- [6] 南出他, 電子情報通信学会 2015 年総合大会, C-3-38(2015).

#### 発表実績

主著

- [1] 南出雄佑, 板垣元, 長広憲幸, 渋谷俊憲, 平井恭平, 上野芳康, "外部変調微弱化による全光ゲート型パルス発生器出力時間波形歪の改善", 2014年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-28.
- [2] 南出雄佑, 板垣元, 長広憲幸, 渋谷俊憲, 上野芳康, "全光ゲート型モードロックパルスレーザの 100 GHz, 2 ps パルス発生特性研究", 2015年電子情報通信学会総合大会, C-3-38.
- [3] 南出雄佑, 渋谷俊憲, 瀬田川悠輝, 竹下諒, 長広憲幸, 上野芳康, "全光半導体ゲート型モードロックレーザが出力するギガヘルツ・ピコ秒パルス波形品質の外部変調周波数離調度依存性とその許容範囲究明", 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-21.
- [4] 南出雄佑, 竹下諒, 瀬田川悠輝, 長広憲幸, 渋谷俊憲, 上野芳康, "相互相関方式による全光半導体ゲート型モードロックレーザ出力パルス波形品質の外部変調周波数離調度依存性とその許容範囲究明", 2016 年電子情報通信学会総合大会 (2016 年 3 月発表予定).