

デュアルコム分光に向けた 非線形増幅ループミラーを用いた光周波数コムの開発

岩國研究室

高橋 亜稀

1 概要

デュアルコム分光法は繰り返し周波数 f_{rep} がわずかに異なる2つの光コムの干渉を利用し、他の分光法よりも短時間で広帯域なモード分解スペクトルを取得する分光手法である。従来のデュアルコム分光計では異なる f_{rep} の光コムを発生させるため2台のレーザー共振器が用いられてきた。この場合、2台の光コムの位相を相対的に安定にする必要があるが、難易度が高く普及の妨げになっている。

本研究では、偏波保持 (PM) ファイバーの速軸と遅軸を伝搬するそれぞれの偏光成分でモード同期を実現することで、1つのレーザー共振器から f_{rep} の異なる光コムを発生させる。レーザー共振器を共有するため、2つの光コムの周波数ドリフトやノイズが似た振る舞いになり、制御が容易となる。また、開発するレーザー共振器はPMファイバーで構成されているため、環境変動に対して堅牢であり、長時間計測が可能になると期待される。

2 研究背景と原理

2.1 光コムと光コムを用いた分光法

図1(a)は時間領域におけるモード同期レーザーの出力を示す。光コムはモード同期レーザーの出力として得られ、幅 $\Delta\tau$ のパルスが、共振器長で決まる繰り返し周期 T_{rep} 毎に発生する。パルスの包絡線と搬送波の伝搬速度、つまり群速度と位相速度の差によってキャリアエンベロープオフセット位相 φ_{ceo} が生じる。これに対応する周期は T_{ceo}

と呼ばれる。 T_{rep} と T_{ceo} には

$$T_{\text{rep}} = \frac{\varphi_{\text{ceo}}}{2\pi} T_{\text{ceo}} \quad (1)$$

という関係がある。図1(b)は周波数領域の光コムの出力を示す。フーリエ変換の関係から、スペクトル幅 $\Delta\nu = 1/\Delta\tau$, $f_{\text{ceo}} = 1/T_{\text{ceo}}$, $f_{\text{rep}} = 1/T_{\text{rep}}$ となる。光コムの n 番目のモードの周波数 f_n は、

$$f_n = f_{\text{ceo}} + n f_{\text{rep}} \quad (2)$$

と表せる。 f_{ceo} と f_{rep} は RF 領域の信号で、これを周波数標準に安定化することで光コムの各モードに絶対周波数を値づけることができる。

光コムは周波数がわずかに異なる CW レーザーの集まりと見做せることから、分光計測に応用されている。しかし、100 MHz 程度の間隔で並ぶ発振モードを分離することは難しく、一般的な分光計では光コムの高い周波数分解能を十分に利用できない。これを解決する主な手法として、高分散

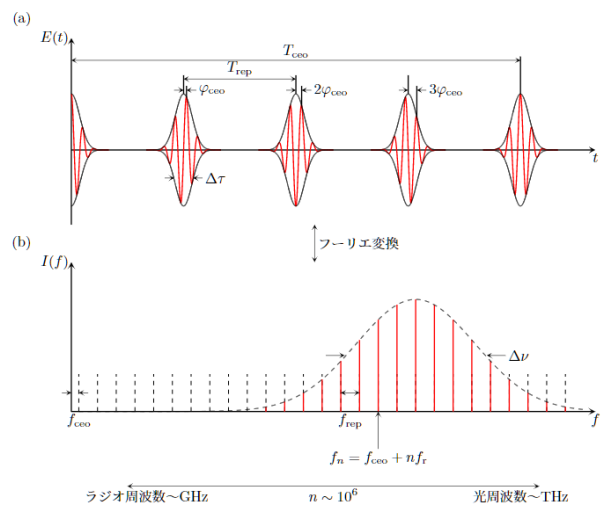


図1: 光コムの出力。(a) 時間領域、(b) 周波数領域。

素子を用いた分光法、マイケルソン干渉計を用いたフーリエ変換分光法、デュアルコム分光法がある。特に、デュアルコム分光法は特殊な光学素子を必要とせず、短時間で広帯域なモード分解スペクトルを取得できるため、開発が進んでいる。

図2はデュアルコム分光計の概要を示す。光コ

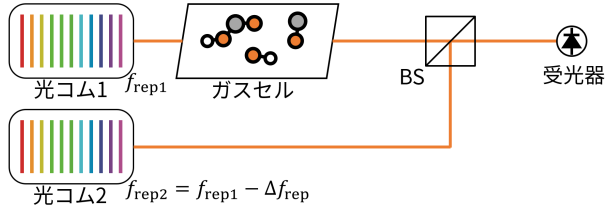


図2: デュアルコム分光計

ム1と光コム2の f_{rep} の差 Δf_{rep} により、2つのパルスの重なりが時間的に変化することでインターフェログラムが得られる。これをフーリエ変換してスペクトルを得る。観測可能なスペクトル帯域はエイリアシングで制限され、 $f_{rep}^2 / (2\Delta f_{rep})$ である。広帯域スペクトルの観察には Δf_{rep} を小さくする必要があるが、 Δf_{rep} は2つの光コムのビート信号の線幅よりは小さくできない。そのため2台の光コムの高い相対安定性が become 必要になる。また、長時間スペクトルを積算すると、光コム自身のスペクトルが変化するため、分子の吸収信号の規格化ができない。

これらの課題を解決するため、本研究では1台のレーザー共振器で f_{rep} の異なる光コムを発生させる。また、レーザー共振器をPMファイバーで構成することで、環境変動に堅牢な光コムを開発する。

2.2 非線形増幅ループミラーによるモード同期

図3は非線形増幅ループミラー (NALM) の反射を用いた9の字型のレーザーを示す。PBS1を反射、透過する光はファイバーで構成されたループをそれぞれ時計回り、反時計回りに伝搬する。ループを1周するとPBS1で再び結合し、ファラデーローテーターで偏光方向を45°回転させられ

た後に、PBS2で干渉する。図4はループで与えられる非線形位相シフトの時計回りの場合と反時計回りの場合の差 $\Delta\phi_{nl}$ と、共振器透過率の関係を示す。位相オフセット ϕ が0のとき青線プロットになり、 $\Delta\phi_{nl}$ が0の場合には透過率が1になる。モード同期を実現するには、ピークパワーが高くなるにつれ、つまり $\Delta\phi_{nl}$ が大きくなるにつれて透過率が高くなる過飽和吸収機構が必要である。そのため9の字型レーザーでは ϕ を適切に設定する必要があり、図3の構成の共振器の場合、 $2\phi = \pi/2$ がモード同期実現に適している。

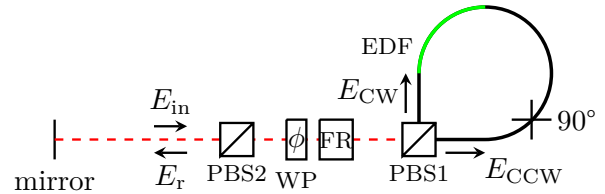


図3: 9の字型レーザー。WP: 波長板, ϕ : 位相差, FR: ファラデーローテーター, EDF: Er添加ファイバー, 十字: ファイバーを90°擦って融着。

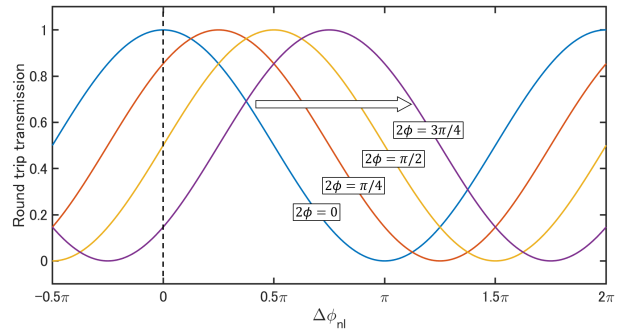


図4: $\Delta\phi_{nl}$ による共振器透過率

3 モード同期レーザーの開発

図5は開発したモード同期レーザーの構成を示す。本研究では9の字型レーザーをもとに、PMファイバーの速軸と遅軸を伝搬する2つの偏光成分でそれぞれモード同期を実現した。この構成では2つの光コムがPMファイバーで構成される

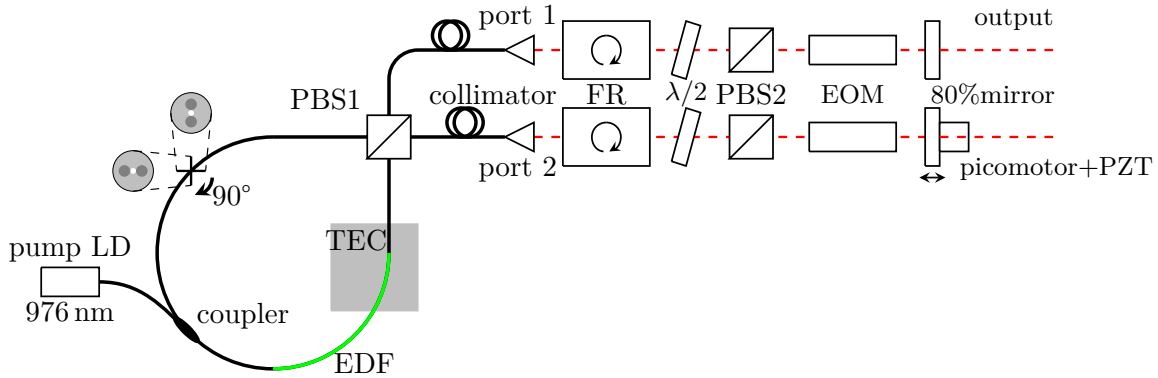


図5: モード同期レーザーの構成. EDF : Er 添加ファイバー, PBS : 偏光ビームスプリッター, TEC : ペルチェ素子, FR : ファラデーローテータ, EOM : 電気光学変調器.

NALM 部分を共有している. port2 に配置されたピコモーターで Δf_{rep} が粗調でき, また EOM, PZT, TEC で 2 つの光コム の f_{rep} を独立に制御できる. 図6 は port1 側のモード間の光コム のビート信号を示しており, 周波数カウンターで f_{rep} を計測したところ 71.5307 MHz であった. また図7 は port1 側の出力スペクトルを示しており, スペクトルは 1562 nm を中心に 27 nm 程度広がっている. 図8 は port2 側の出力スペクトルを示している. モード同期は実現されたが port1 側と比べてスペクトル形状が異なり, またパワーが 1/10 程度にとどまった. これは部分反射ミラーのカップリング効率が悪いことが原因と推測される.

4 モード同期レーザーの性能評価

開発した光コム (PM コム) の周波数安定度とスペクトル安定度を, 非線形偏波回転を用いてモード同期を実現した光コム (non-PM) コムと比較して評価した.

4.1 周波数安定度の評価

光コム の自由度は式 (2) より, f_{ceo} と f_{rep} の 2 つであり, 周波数安定度の評価にはこれらを独立に測定する必要がある. しかし, 今回は f_{ceo} の検出まで至らなかったため, 測定に用いない別の光コムに安定化した外部共振器型半導体レーザー (ECLD) とのビート信号 f_{beat} を測定することに

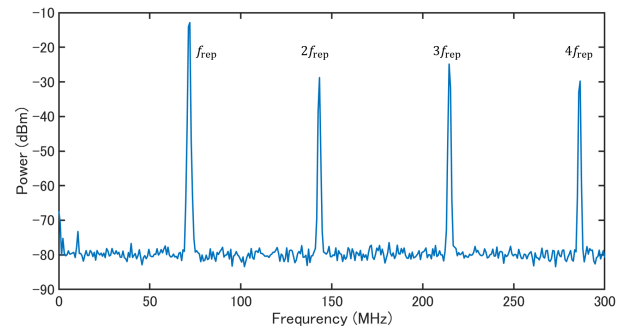


図6: RF スペクトル (port1)

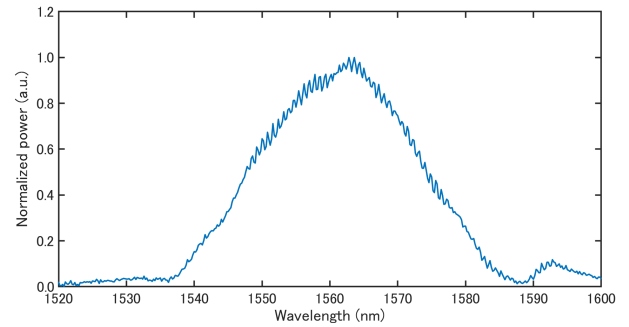


図7: 出力スペクトル (port1)

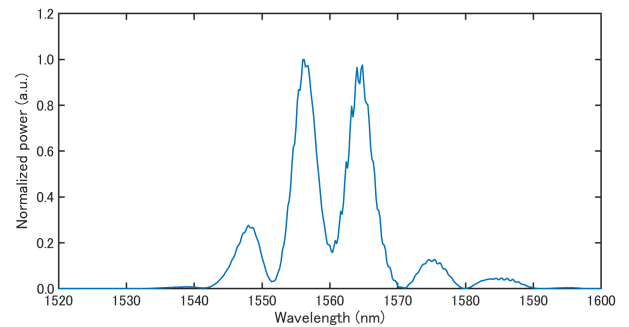


図8: 出力スペクトル (port2)

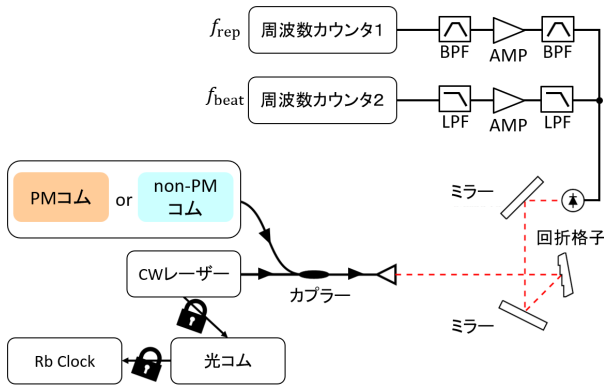


図 9: 周波数安定度測定の実験系

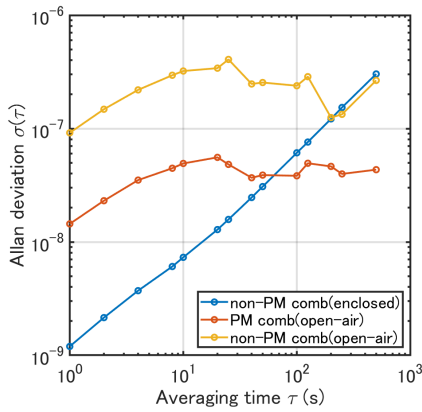


図 10: f_{rep} の相対アラン偏差

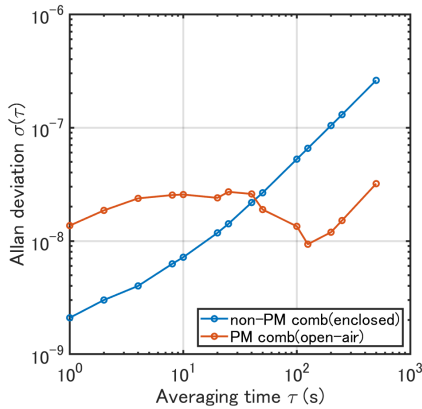


図 11: f_{beat} の相対アラン偏差

よって f_{ceo} の評価の代わりとした。図 9 は測定に用いた実験系を示す。

図 10, 図 11 は測定結果から計算した f_{rep} と f_{beat} の相対的なアラン偏差を示す。図 10 黄線プロットの示すように、箱でレーザー共振器を覆っていない non-PM コムの場合、風などの環境変動

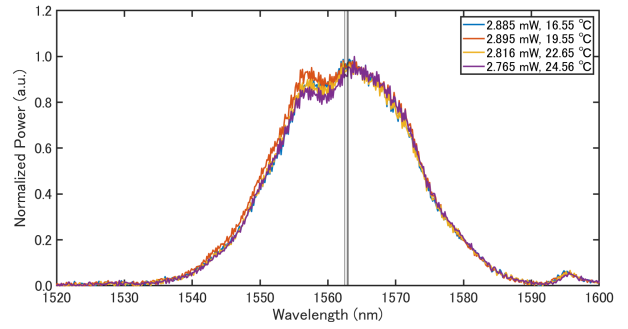


図 12: PM コムのスペクトル変化

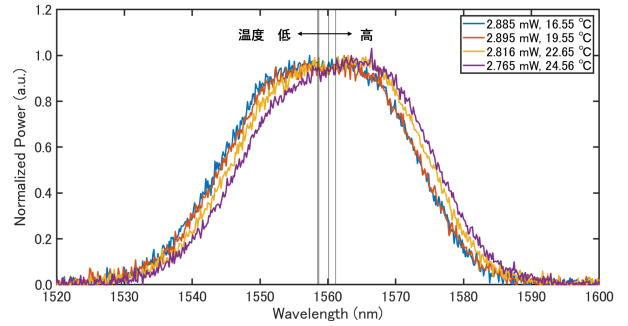


図 13: non-PM コムのスペクトル変化

の影響を大きく受ける。箱で覆うと、青線プロットのように温度変化に追従して f_{rep} と f_{beat} が変化する。PM コムの場合、図 10 の赤線プロットで示すように箱がない場合で比べると安定度が 1 桁程度高い。

4.2 スペクトル安定度の評価

レーザー共振器を構成するファイバーを TEC で加熱し、スペクトル変化を測定した。図 12, 13 より、PM コムの方が温度によるスペクトル変化が 1 桁程度小さく、環境変動に対して堅牢であることが示された。

5 まとめ

本研究ではデュアルコム分光計の開発を目指し、NALM を用いて 2 つのポートでモード同期を実現した。また、開発した光コムは non-PM ファイバーを用いた光コムより環境変動に対して堅牢であることを実証した。