

双方向動作型デュアルコムファイバレーザを用いた長波長赤外光コムの発生と最適化

窪田 光佑（量子エレクトロニクス教室）

従来の長波長赤外（LWIR）分光法では、インコヒーレントな熱光源を用いたフーリエ変換分光法（FTS）が主に用いられている。しかし、熱光源を用いることで、集光能力や長距離伝播特性、分光感度が制限される。また、移動ステージを用いるため、スペクトル分解能と測定時間の間にトレードオフの関係が生じる。そのため、LWIR 領域でより高度な分光を実現するには、FTS を超える分光技術が求められる。

そこで、我々は 2 台の光周波数コムを用いたデュアルコム分光法¹⁾に着目した。デュアルコム分光法は、短いデータ取得時間で広帯域・高精度な分光測定を可能とするため、近年注目されている分光手法である。特に、帯域幅・分解能・取得時間・分光感度の点で FTS より優れている。一方で、2 台の光コムを発生させる光源システムと周波数安定化制御系が必要となるため、システム全体が大型・複雑になりやすい。この課題を解決するために、我々はリング型共振器のファイバレーザを用い、時計回り（CW）と反時計回り（CCW）の双方向においてモード同期動作を同時に行うことで、2 台の光コムを同時に発生させる双方向動作型デュアルコムファイバレーザ²⁾の開発を進めている。

本研究では、双方向動作型デュアルコムファイバレーザを用いた LWIR 領域でのデュアルコム分光システムの開発を目指し、LWIR 光コムの発生を試みた。Fig. 1(a)は、デュアルコムファイバレーザを用いた LWIR 光コム発生システムの概略図である。双方向動作型デュアルコムファイバレーザの出力に対し、エルビウム添加光ファイバ増幅器（EDFA）による光増幅を行い、高非線形ファイバ（HNLF）を用いて広帯域化した後、非線形光学結晶を用いた差周波発生（DFG）により LWIR 光コムの発生を試みた。EDFA では、チャープパルス増幅（CPA）と非線形増幅の 2 手法を試した。CPA では、EDFA の前に分散補償ファイバ（DCF）を接続し、光コムに相当する光パルスの時間幅を数 10 ps に伸長した状態で EDFA に入射した。これにより、EDFA 内での非線形光学効果を抑制することが可能となり、その結果、最大出力 238 mW で、ペDESTALFREEでのパルス幅約 200 fs（Sech² 近似）の光パルスを得た。この光パルスを用いて HNLF によるスペクトル広帯域化を試みたが、6~12 μm の LWIR 光コムを発生させるために必要な広帯域光コムの生成には至らなかった。次に、DCF を取り外し、EDFA に入射するパルスの時間幅を 100 fs 程度に整形し、EDFA を非線形増幅³⁾で動作させた。その結果、最大出力 547 mW でパルス幅 43 fs（Sech² 近似）の光パルスを得た。この光パルスを基に HNLF を用い広帯域化を行った結果、1.4~1.7 μm の広帯域光コムの生成に成功した。さらに、非線形光学結晶として Orientation-patterned リン化ガリウム結晶（OP-GaP）を用いて、DFG による LWIR コムの発生を試みた。Fig. 1(b)に LWIR 光コムの光スペクトルを示す。測定条件を調整することで、5~12 μm の LWIR 光コムの発生に成功した。Fig. 1(c)は、MCT 光検出器により検出した LWIR 光コムの RF スペクトルであり、光コムを形成していることを確認した。

- 1) I. Coddington, et al., *Optica* **3**, 414-426 (2016).
- 2) Y. Nakajima, et al., *Optics Express* **27**, 5931-5944 (2019).
- 3) J. Takayanagi, et al., *Optics Express* **16**, 12859-12865 (2008).

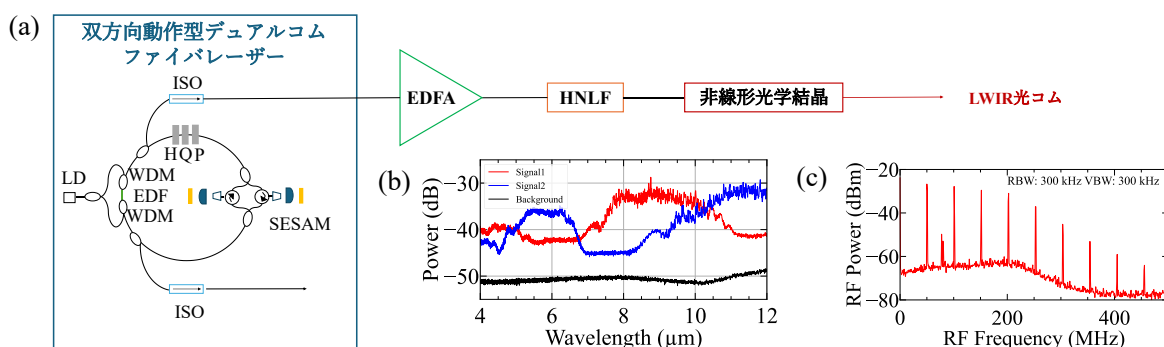


Fig. 1 (a) Experimental setup of bi-directional dual-comb fiber laser and LWIR comb generation system. (b) Optical spectra and (c) RF spectrum of OP-GaP output.

フリーランニングデュアルコムファイバレーザを用いたデジタル信号補正による高感度分光手法の開発

内山 竜成（量子エレクトロニクス教室）

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 台の光周波数コムを用いることで実現するフーリエ分光法であり、広帯域・高分解能の分光情報を高速で取得可能である¹⁾。しかし、2 台の光周波数コムを高精度に安定化する必要があり、システムが複雑かつ大掛かりになる。この課題に対し我々は、デュアルコムファイバレーザの開発を進めており、2 台のレーザ共振器を一体化または密接に配置することで、環境外乱を共有し、受動的に高い相対安定性を実現している^{2,3)}。これにより、複雑な制御系を不要とし、小型・簡便・低コストなデュアルコム分光システムの実現が可能となる。

本研究では、フリーランのデュアルコムファイバレーザを用いて取得したデュアルコム分光の結果に対して、デジタル信号補正による高感度分光手法の開発を行った。デュアルコムファイバレーザは周波数安定化を行っていないため、残留非共通ノイズの影響で 2 台の光コムの干渉波形 (インターフェログラム) およびスペクトル位置が 1 回の測定ごとに変動する。そのため、補正処理なしに積算を行うと吸収信号が潰れて SN 比が悪化する。そこで、周波数領域で 1 回の測定ごとのスペクトル位置変動を検出・補正し、スペクトル位置を揃えた後に積算することで、高感度な信号の取得を実現した。

Fig. 1(a)に示すのは、本研究で用いた双方向動作型デュアルコムファイバレーザ²⁾の構成であり、単一レーザ共振器の時計回り (CW) と反時計回り (CCW) の両方向から光コムを同時に出力し、高い相対安定性を実現している。Fig. 1(b)に示すのは、レーザからの出力光スペクトルであり、帯域幅 55 nm 以上の広帯域スペクトルを有していることが分かる。Fig. 1(c)に示すのはデュアルコム分光の構成であり、2 つの出力をカプラを用いて同一光路上に合波した後、HCN ガスセルとバンドパスフィルタ (BPF) を透過し、受光器とディジタイザを用いて干渉信号を取得した。BPF は中心波長 1545 nm、帯域幅 40 nm であり、測定可能帯域幅を考慮して Δf_{rep} を 144 Hz に設定した。Fig. 1(d)に示すのは、積算回数 2500 回 (取得時間 17.4 秒) で取得した HCN ガスの透過率スペクトルであり、NIST データベースと良く一致している。これにより、フリーランのデュアルコムファイバレーザを用いて 1525-1565 nm の広帯域にわたる HCN ガス吸収線の高感度一括取得に成功した。

1) I. Coddington, N. Newbury, and W. Swann, *Optica* **3**(4), 414-426 (2016).

2) Y. Nakajima, Y. Hata, and K. Minoshima, *Optics Express* **27**(5), 5931-5944 (2019).

3) T. Yumoto, W. Kokuyama, S. Matsubara, T. Yasui, and Y. Nakajima, *Opt. Contin.* **2**(8), 1867-1874 (2023).

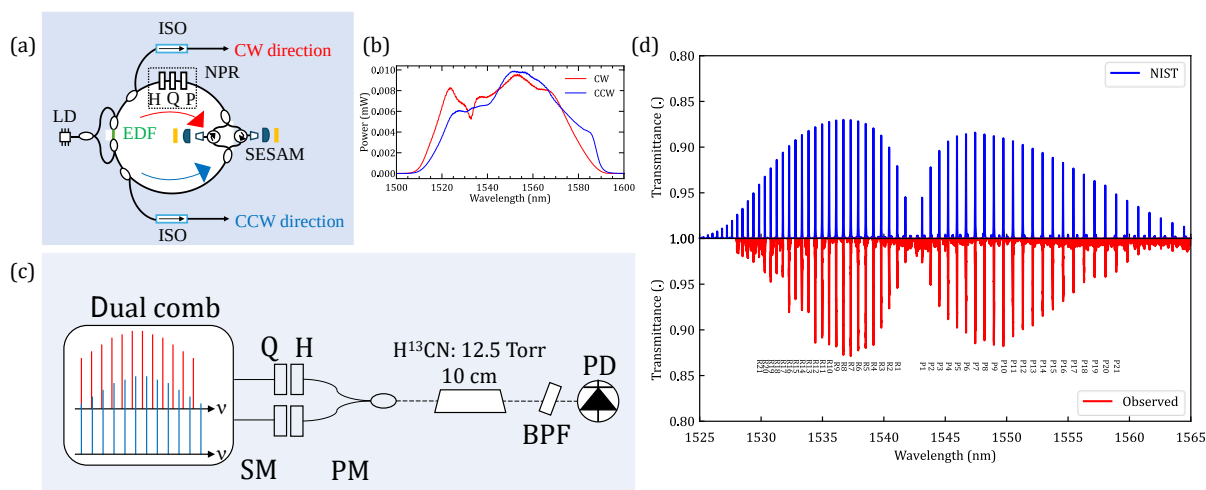


Fig. 1(a) Oscillator configuration and (b) acquired optical spectra. (c) Dual comb spectroscopy configuration and (d) acquired transmittance spectrum.