

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K15189

研究課題名（和文）光コムを用いたスキャンレスフーリエ分光計の開発

研究課題名（英文）Development of Scanless Fourier Spectrometer Using an Optical Frequency Comb

研究代表者

岩國 加奈（Iwakuni, Kana）

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授

研究者番号：80837047

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：研究成果の概要（200文字程度、最大300、改行2；英訳最大1000文字、改行2）
光コムは発振モードが等間隔に並んだ櫛状のスペクトルを有しているレーザーである。光コムを分光光源として用いると広帯域かつ高分解能なスペクトルを短時間で測定できるため、様々な分光手法が開発されている。フーリエ分光法では光源を2つに分ける、あるいは2つの光源を使うなどして、それらを干渉させ、得られた干渉信号をフーリエ変換してスペクトルを得る。本研究では、光コムを光源として用いた新たなフーリエ分光計の実現にむけ装置開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光コムを用いた分光手法としては高分散素子を用いた手法があるが特殊な光学素子が必要になる。また、フーリエ分光の一種であるデュアルコム分光法は光源となる2台の光コムが相対的に安定である必要があり、装置や実験手順が煩雑になる。本研究で目指すのはスキャンレスなマイケルソン干渉計を用いた分光計で上記手法よりも扱いやすく、光コムに不慣れな場合でも分光実験に活用できると期待される。

研究成果の概要（英文）：An optical comb is a pulse laser that has a comb-like spectrum with equally spaced oscillation modes. Various spectroscopic techniques have been developed because optical combs can be used as light sources to measure broadband and high-resolution spectra in a short time. In Fourier spectroscopy, the light source is divided into two, or two light sources are used to interfere with each other, and the obtained interference signal is Fourier transformed to obtain a spectrum. In this study, we developed a new Fourier spectrometer using an optical comb as a light source.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光コム 分子分光 フーリエ分光

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光コムは主にモード同期レーザーの出力として得られる。時間領域では一定の繰り返し周期で超短パルスが出力される。この信号をフーリエ変換して周波数領域の信号にすると繰り返し周波数 f_{rep} 間隔で発振モードが並ぶ櫛(コム)状スペクトルになっている。 f_{rep} が非常に正確に一定であることから、光コムは「周波数のものさし」として計測分野に利用され、近年は分子分光実験への応用が盛んに研究されている。光コムを分光の光源として用いると、分子の回転構造が観察できる程度の高い分解能や相対不確かさ 10^{-10} 程度の高い周波数精度を、白色光源で観察されるような広いスペクトル帯域にわたって、しかも $100 \mu\text{s}$ から数 ms の短い測定時間で実現できる。このような光コム分光の特徴を利用するには、約 50 MHz の f_{rep} 間隔で広がる光コムの各発振モードを分離する必要があるが、一般的な回折格子分光計では難しい。そこでこれまでに高分散素子を使った分光法やフーリエ分光法、また、フーリエ分光の一種であるデュアルコム分光法が開発されてきた。これまで開発されてきた光コムを光源とする分光実験の大半は、高性能な光コム光源が入手しやすい近赤外領域で行われている。しかし、分子分光には分子の指紋吸収線と言われる遷移強度の強い吸収が多数存在する中赤外領域が適しており、光コム分光計の中赤外領域への拡張が期待されている。高分散素子のような特殊な光学素子や高価な赤外カメラが必要ないことから、中赤外領域での分光法はフーリエ分光法が有力視されている。フーリエ分光の一種のデュアルコム分光法では、2台の光コムを用い、これらの出力を干渉させて干渉信号を得る。この干渉信号をフーリエ変換することでスペクトルを得る。デュアルコム分光法で広帯域・高精度なスペクトルを得るためには、2台の光コムのスペクトルがよく重なっていることや、高い相対安定度を実現するために精密な周波数制御が必要で、装置が複雑で大掛かりになり、実験手順も煩雑である。そこで本研究では新たなフーリエ分光法を開発することを目指して装置開発を行った。

2. 研究の目的

本研究では、光コムの時間領域での出力が繰り返し周期一定のパルス列であることに着目し、1台の光コムで近赤外デュアルコム分光と同等な周波数分解能と広帯域特性を有する新しいフーリエ分光手法の実現に向けて要となる光源や分光計などの装置開発を行う。

3. 研究の方法

本研究では、下記の開発を行った。

(1) 分光光源として利用する光コム光源を数種類の方式で開発した。将来的に中赤外領域に移行することを想定し、波長変換の際の種光となる波長 $1.5 \mu\text{m}$ 領域で開発した。また、開発した光源の性能評価のために N_2O 分子の分光を行って遷移周波数を測定し、これらから分光定数を決定した。

(2) 分光実験する際の周波数の基準となるヨウ素安定化レーザーを開発した。ヨウ素分子を飽和吸収分光し、その吸収線の一つに連続発振(CW)レーザーを安定化した。このCWレーザーに光コムを安定化することで、光コムの各発振モードに絶対周波数が値付けられる。

(3) 開発を目指す新規分光計の特性評価をする際の評価基準としてプッシュ・プル型マイケルソン干渉計を構築し、その動作確認を行った。また、データサンプリングと解析プログラムを開発し、光コムの f_{rep} に同期して信号をサンプリングできることを確認した。

4. 研究成果

(1) 光源開発とその評価

ファイバーコムの開発

図1は開発した2種類のファイバーコムの構成図を示す。これらの光コムはレーザー共振器が光ファイバーで構成されており、図1(a)は非偏波保持ファイバーで構成されるリング型共振器、(b)は偏波保持ファイバーで構成されるリニア型共振器となっている。繰り返し周波数はそれぞれ 54 MHz 、 61 MHz である。(b)のレーザー共振器は一部が空間に出て、エンドミラーはピコモータ付きの移動ステージにのっている。これによりモード同期を維持しながら f_{rep} を掃引できる構成になっている。(a)の光コムは、レーザー共振器の出力をファイバースタンプで増幅し、高非線形ファイバーでスペクトルを1オクターブにわたり広帯域化した。その後、 $f-2f$ 干渉計を用いて f_{ceo} 信号を検出した。検出した f_{ceo} ビート信号と、レーザー共振器の出力を一部取り出して検出した f_{rep} 信号を Rb 時計基準のマイクロ波に安定化することで、光コムの全ての発振モードの周波数を安定化した。

E0 コムの開発

本研究では、CW レーザーの出力を電気光学変調器 (EOM) で変調することで櫛状のスペクトルを持つ光源を開発した。これも光コム的一种である。上記で開発したファイバーでレーザー共振器を構築するタイプの光コムでは、繰り返し周波数が 50 MHz 程度と低めとなる。一方、EOM を用いる EO コムでは EOM に印加する RF 信号の周波数で繰り返し周波数が設定され、 f_{rep} の掃引も容易である。本研究では EOM で CW レーザー光を位相変調した。しかし、位相変調だけでは高次サイドバンドは強度にばらつきがあり、分光実験などへの展開が難しい。そこで強度変調用の EOM も組み合わせることで強度が概ね様なスペクトルを得た。しかし、分光測定にはスペクトル帯域が不十分で、今後は高次のサイドバンドが立つように変調の深さなどを最適化する。

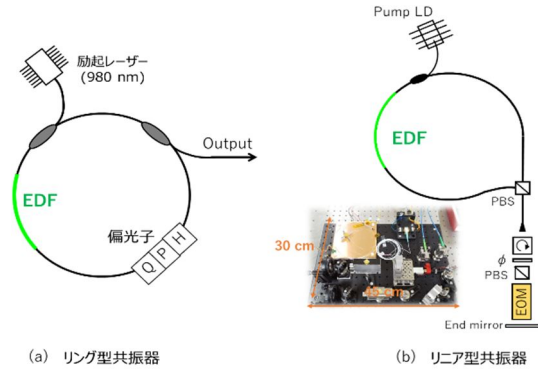


図 1. 開発した光コムの構成。

(a)リング型共振器、(b)リニア型共振器。

N_2O 分子の分光実験

図 1(a)の光コムを用いて気体の N_2O 分子のドップラー分解能分光を行った。波長 $1.52 \mu\text{m}$ 帯に存在する N_2O 分子の吸収線は、近い波長域で高分解能分光されているアセチレン分子に比べて吸収強度が 3 桁小さい。そのため、分光計には高い感度が要求される。本研究では、 $1.52 \mu\text{m}$ で発振する外部共振器半導体レーザー (ECDL) を分光光源とし、この周波数を Rb 時計に安定化した光コムに安定化する。そして、光コムの f_{rep} を掃引することで ECDL の周波数を掃引する。このようにすることで、周波数ドリフトの影響を受けることなく分子の吸収線を測定できるので、往復平均が可能となる。また、 N_2O 分子をマルチパスセルに封入することで、セルの実際の長さ 76 cm の 13 倍だけ吸収長が長くなり、高感度な測定が実現される。この分光計を用いて取得した N_2O の吸収スペクトルを図 2 に示す。図 2 は $3 \nu_1$ 振動バンドの P(12) 遷移であり、同様の測定を P(28) ~ R(28) について行い、遷移周波数を 0.5 MHz (相対不確か率 10^{-9}) の精度で決定した。これらの値から 3 つの分子定数を決定したところ、他の分光手法で測定した先行研究と不確かさの範囲内で一致した。

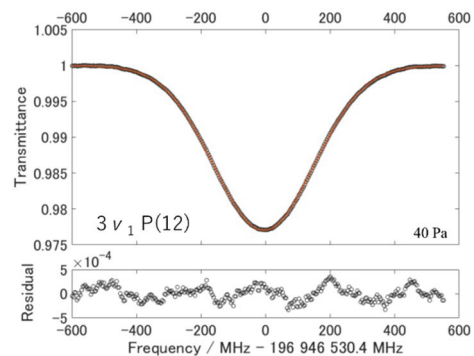


図 2. 観察した N_2O の吸収スペクトル。

(2) 基準信号の開発

光コムを分光光源として使用する際に、光コムは f_{rep} を安定化すれば各モードの間隔は高精度に一定になるが、周波数の絶対値を知るには周波数基準が必要である。そこで本研究では、ヨウ素分子の吸収線に安定化した CW レーザーの周波数を基準として用いることとした。図 4 に実験構成を示す。使用する光源は Nd:YAG レーザーで、これを導波路型 PPLN で倍波 (532 nm) を得た。532 nm の光を 2 つに分けて、片方の光路に音響光学素子と電気光学素子を挿入して変調移行分光の系にした。もう一方のレーザー光はセルにそのまま入射し、透過光を受光器で検出して、この信号を復調してエラー信号とした。R(56)32-0 遷移に Nd:YAG レーザーを安定化し、その周波数安定度を Rb 時計に安定化された光コムで測定したところ、相対安定度 10^{-11} が得られ、絶対周波数基準として十分な性能を有していることが確認できた。

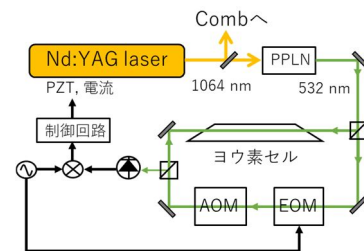


図 4. ヨウ素安定化レーザーの実験セットアップ

(3) マイケルソン干渉計とデータ取得

このフーリエ分光計はプッシュ・プル方式と呼ばれるマイケルソン干渉計である。図 5 は構成を示す。干渉計の腕の長さは約 2 m で、周波数分解能は約 75 MHz となる。腕の長さを掃引するための台車にはレトロリフレクターが背中合わせに 2 台設置されており、これを 2.5 cm/s で掃引して干渉信号が安定して観測されることを確認した。また、データサンプリングと解析用プログラムの一部を FPGA を用いて開発し、光コムの f_{rep} あるいは f_{rep} を分周した信号に同期したサンプリングレートでデータ取得ができ、得られたデータを FFT 処理してスペクトルが得られることを確認した。



図 5. マイケルソン干渉計の構成図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kana Iwakuni	4. 巻 384
2. 論文標題 Absolute frequency measurement of the 3 1 band of N2O with comb-locked rapid scan spectroscopy using a multi-pass cell	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Molecular Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 6 pages
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高橋 亜稀、岩國 加奈
2. 発表標題 デュアルコム分光に向けた偏波保持NALM型ファイバーコムの開発
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋亜稀、岩國加奈
2. 発表標題 新奇デュアルコム分光計の開発に向けたモード同期ファイバーコムの開発
3. 学会等名 第21回分子分光研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kana Iwakuni
2. 発表標題 Absolute frequency measurement of N2O at 1.52 μm
3. 学会等名 The 4th Asian Workshop on Molecular Spectroscopy (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------