

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01907

研究課題名(和文)2種の光コム融合による高速かつ高分解能な分光計測技術の開発

研究課題名(英文)High speed and high resolution spectroscopy using two types of optical frequency combs

研究代表者

柏木 謙 (Kashiwagi, Ken)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：10509730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、変調器型光コム制御技術、2種の光コムを組み合わせる技術及びそれらを利用した分光測定システムを開発した。変調器型光コムについては、その広帯域化、可視域への変換、および狭線幅化する技術を開発した。この狭線幅化する技術は、2種の光コムを組み合わせるためにも利用可能であり、これを利用して2種の光コムを位相同期して互いに干渉可能とした。この位相同期した2台の光コムを用いて、分光計測システムを構築し、従来よりも平均化回数を抑え、高速に分光計測が可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で得られた成果は、高い繰り返し周波数の光コムである変調器型光コム制御が簡便になり、より計測応用として利用しやすい装置を構築可能とする。また、2種の光コムを組み合わせ構築した分光システムは、その高速性を生かして環境ガスのリアルタイム解析、生体や細胞を高速に分析するなどのニーズに応えると共に、非平衡状態の物理現象の観測など、環境・製造・医療・物性などの研究分野への適用が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed techniques that control electro-optic modulator based frequency combs (EOM-combs), combine two types of frequency combs for spectroscopy. The EOM-comb was broadened and was converted to the visible wavelength range. We phase-locked the EOM-comb to a narrow-linewidth frequency comb and established mutual coherence between the two combs. Finally, we developed a dual-comb spectroscopy system using the combs. The system realized shorter measurement time compared to conventional method by suppressing averaging time.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光周波数コム 光コム 分光計測 デュアルコム分光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光周波数コム(光コム)は一定の周波数間隔で光成分を持ち、適切に光源を制御することにより高精度にその光周波数を安定化することができる。光コムの絶対値が安定な光周波数の成分は、様々な応用が期待され研究が展開されている。それら光コムの応用先の1つに分光計測がある。例えば、環境ガスの分析や呼気分析による病理診断などの応用での分光計測は、ガス分子の吸収線を測定する。そこで、ガス吸収線を十分に細かく測定する高い周波数分解能と高速性を兼備する分光技術の要求が高まっている。機械的なミラー掃引が必要なフーリエ変換赤外分光法(FTIR)に対し、FTIRのミラー掃引を2台の光コムの繰り返し周波数の差で置き換えるデュアルコム分光(Dual Comb Spectroscopy)が提案され[Coddington et al., PRL, 100, 013902 (2008)]、活発に研究されている。デュアルコム分光は機械的な可動部がなく安定に分光計測ができるが、周波数分解能と測定速度はトレードオフの関係にある。また、高い信号対雑音比(SN比)を得るためには平均化が必要であり、この点からも更なる高速化に障害があった。

2. 研究の目的

本研究課題では、高い周波数分解能と高速性を兼ね備えた分光計測を実現するデュアルコム分光システムを開発することを目的とする。高分解能かつ高速な分光システムを実現するための要素技術開発から信号処理まで、全体システムを開発する。このシステムを実現するために高い繰り返し周波数の変調器型光コムをデュアルコム分光に利用することで高速化し、また少ない本数の光コム成分にエネルギーが集中して強い信号強度が得られるため平均化回数を抑えられ、全体として高速測定が可能となる。

3. 研究の方法

図1に本研究で用いた変調器型光コムの実験系を示す。1551 nmの単一周波数レーザからの光を強度変調器と位相変調器により10 GHzの信号で変調し変調器型光コムを発生させる。これを光増幅器で増幅した後に高非線形ファイバに伝搬させてスペクトルを拡大する。次節では、このスペクトル拡大した変調器型光コムを用いた。また、最終的に構築した分光計測システムには、2台目の光コムを用いている。2台の光コムの繰り返し周波数を適切に調整し、干渉信号を取得できるデュアルコム分光のシステムを開発した。この2台の光コムの相対コヒーレンスを高めて、干渉信号を取得するための制御技術の開発などについて、次節で説明する。

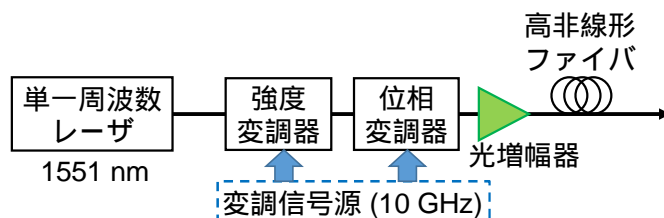


図1 本研究課題で用いた変調器型光コムの基本的な実験系

4. 研究成果

図1の実験系で発生した光スペクトルを拡大した変調器型光コムを、導波路型分極反転二オプ酸リチウム(WG-PPLN)に入射することで可視域に変換した。WG-PPLNからの出力スペクトルを2種の光スペクトラムアナライザ(OSA)により測定した。OSA1は350-1750 nmの波長域を測定可能で、OSA2は可視域全体は測定できないが高い波長分解能(0.01 nm)を持っているものを使用した。

図2にOSA1で測定したWG-PPLNから出力された光コムの光スペクトルを示す。2, 3, 4次高調波が発生しており、可視域まで光コムが生成されている。OSA1は各コム成分を分離して測定できないため、OSA2を用いて分解能0.01 nmで同じ光のスペクトルを測定した。基本波のスペクトルの各コム成分が10 GHz間隔で分離して観測されたことに加え、2次高調波もスペクトルが分解されて観測できることを確認した。2次高調波では分解された光コムのコントラストが基本波の光コムと比べて低かったが、これはOSA2の分解能による制限である。10 GHz間隔は波長1550, 775 nmではそれぞれ0.08, 0.01 nm間隔に相当し、2次高調波はOSA2の波長分解能と光コムの間隔が同程度となったため、コントラストが低下して測定されたものである。このように、2次高調波でも10 GHz間隔で光スペクトルが生成されていることが確認でき、可視域の3次, 4次高調波も同様に10 GHz間隔の光コムが生成されていることが予想される。

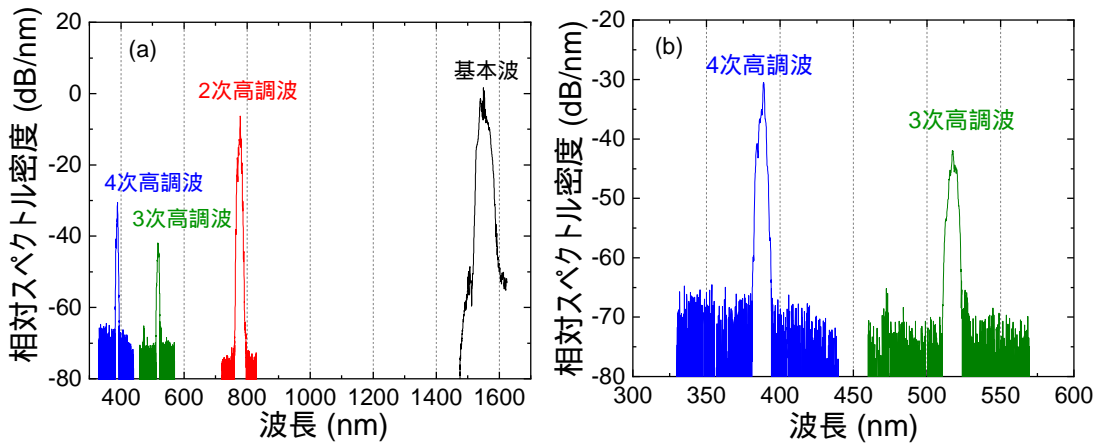


図 2 可視域へと拡大した高繰り返しの変調器型光コムスペクトル
(a)スペクトル全体図, (b) 可視域の拡大図

2 台の光コムを用いてデュアルコム分光計測を行うためには、それらの相対的なスペクトル線幅が細い、つまり 2 台の光コムのコヒーレンスが高い必要がある。そのため位相同期技術を開発した。

高フィネス光共振器の共鳴周波数に対して周波数安定化された狭線幅レーザ(波長 1535 nm)に対し、1 台目の光コムをこのレーザに対して位相同期する。この狭線幅レーザは 1 Hz 級の線幅を持ち、位相同期により光コムの周波数成分が狭窄化される。前記のレーザに対して約 2 THz 周波数が離れた単一周波数の連続発振レーザをこの光コムの 1 本の周波数成分に対して位相同期して、変調器型光コムの基となる狭線幅レーザ光とした(図 1 中の波長 1551 nm のレーザに相当)。そのレーザ出力を 10 GHz で変調することで変調器型光コムを生成し、光ファイバ増幅器で増幅した後に高非線形ファイバを伝搬させることで光スペクトルを拡大した。このスペクトル拡大した光コムのおよそ 200 次の成分(中心から 2 THz 離れた成分)と前記の共振器に安定化した波長 1535 nm の狭線幅レーザとのビート信号を、マイクロ波参照信号に対して位相同期した。この位相同期は、変調器型光コムの変調器への変調信号を制御することによって行った。制御時のインループビート信号のスペクトル線幅は 1 Hz 以下であった(図 3)。この測定したスペクトル線幅は、使用した測定器の分解能で制限されたものである。そして、1 台目の光コムとのアウトオブレンジビートを観測し、細い相対スペクトル線幅が得られることを確認した。

上記までの開発により、デュアルコム分光のための 2 台の光コムが準備できたため、それらを用いて分光計測システムを構築した。まず、2 台の光コムの繰り返し周波数の差を適切に設定し、そしてそれらの光を合波して受光器に入射した。得られた干渉信号は、デジタルで波形データとして取り込んだ。実際に計測を行った結果、高い信号対雑音比の干渉信号が得られ、平均回数を少なく抑えることができ、従来よりも短時間で測定ができることを確認した。

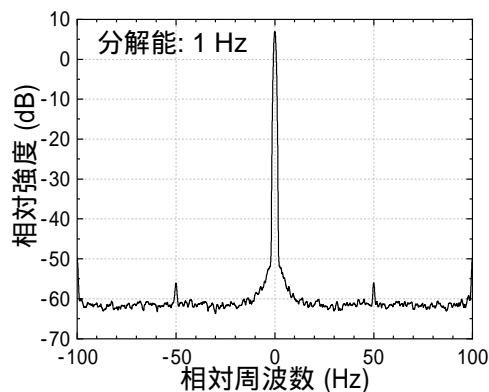


図 3 2 台の光コムの相対線幅制御のインループビート信号のスペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ken Kashiwagi, Sho Okubo, and Hajime Inaba
2. 発表標題 Narrow Linewidth Electro-Optic Modulator Based Comb Generation with a Simple Modulator Configuration
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro Optics 2020 (CLEO 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柏木謙, 大久保章, 稲場肇
2. 発表標題 変調器型光コム of 狭線幅化
3. 学会等名 2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Kashiwagi, Sho Okubo, and Hajime Inaba
2. 発表標題 High Repetition Rate Visible Frequency Comb Generation from Electro-Optic Modulation in the 1550 nm Region
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro Optics 2019 (CLEO 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柏木謙, 大久保章, 稲場肇
2. 発表標題 通信波長帯変調器に基づく高繰り返し可視光コム発生
3. 学会等名 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019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
研究分担者	大久保 章 (Okubo Sho) (30635800)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員 (82626)	
研究分担者	稲場 肇 (Inaba Hajime) (70356492)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長 (82626)	

	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
研究協力者	清水 祐公子 (Shimizu Yukiko) (30357222)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長 (82626)	

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
---------	---------