

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286065

研究課題名(和文) 高強度マルチギガヘルツコムを用いた広ダイナミックレンジ分光・形状計測

研究課題名(英文) Wide dynamic range optical measurement using highly intense multi-gigahertz comb

## 研究代表者

柏木 謙 (KASHIWAGI, Ken)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10509730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では周波数間隔の広い光周波数コムを用いて広ダイナミックレンジの計測法を開発した。光周波数コムはある一定の間隔で周波数成分を持つ光源であり、一般的な周波数間隔の狭い光周波数コムは光強度が多くの周波数成分に分散するため各周波数成分の強度が低い。周波数間隔が10 GHz以上と広い光周波数コム(マルチギガヘルツコム)は少ない周波数成分に光強度が集中するため各成分の強度が高い。これにより広いダイナミックレンジが期待できる。本研究課題ではこのようなコムを計測に利用するため、広帯域マルチギガヘルツコムの周波数可変技術を開発し、そのようなコムを用いた計測応用を検討した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we used an optical frequency comb with wide mode spacing for high dynamic range optical measurement. An optical frequency comb has optical modes at a certain frequency spacing and, generally, the spacing is relatively narrow in the order of 100 MHz. Each lines of such the optical frequency comb has low intensities because the average power is distributed to the large number of the lines. In this study, we used an optical frequency comb whose line-spacing is wider than 10 GHz (multi-gigahertz comb) to obtain high intense comb lines. The high intensity can lead to wide-dynamic-range measurement. To realize the measurement technique, we realized a broadband optical frequency comb with wide mode-spacing and frequency tunability. Finally, we employed the comb as a lightsource for optical measurement.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光周波数コム 光パルスシンセサイザ 光学非線形性 分光計測

1. 研究開始当初の背景

光周波数コムは一定の周波数間隔で成分を持つ光であり、高精度にその周波数の間隔と絶対値が安定化されている。このような光源は、光周波数や長さなど様々な対象を高精度に計測するために利用されている。一般的な光周波数コムは周波数間隔が 100 MHz 程度と狭く、平均光強度は多数の周波数成分に分散されるため各コム成分の強度は弱い。また、周波数間隔が狭いため各コム成分を分光器などにより分解することはできないため、成分毎の情報を得るためにはヘテロダイン検出などの手法を用いる必要がある。

一方、周波数間隔が 10 GHz 以上と比較的広いマルチギガヘルツコムでは強度が少ない周波数成分に集中し各コムの成分が強いという利点がある。また、各コムを分光器で直接分解できるため、成分毎の情報を取得しやすい。しかしながら、このような周波数間隔の広い光周波数コムを広帯域に得るには、光パルスのピーク強度が不足して非線形光学効果による広帯域化に制限があり、広いスペクトル帯域にわたる計測は困難であった。

2. 研究の目的

本研究課題では、光周波数コムの中でも周波数間隔が 10 GHz 以上と広いマルチギガヘルツコムを用いて、広ダイナミックレンジの計測を行うことを目的とした。このような計測を実現するために、マルチギガヘルツコムの各周波数成分が高い強度を持つことを利用する。そのため、広帯域マルチギガヘルツコムの光周波数可変の技術を開発し、このマルチギガヘルツコムを利用した計測応用を検討した。

3. 研究の方法

図 1 に周波数可変のマルチギガヘルツコム及びそのコムを利用した分光計測の実験系を示す。マルチギガヘルツコムは単一周波数レーザからの光に位相変調を掛けて光パルスの種となるコムを生成し、光パルスシンセサイザによりパルス化した後に高強度に増幅して高非線形ファイバ中を伝搬することで広帯域にスペクトルが拡大される。広帯域化したマルチギガヘルツコムはシアン化水素(HCN)のガスセルを透過した後に計測機器に入力される。実験系の詳細を以下に示す。単一周波数レーザからの光に 12.5、25.0 GHz 信号を混合して位相変調を掛けることで光パルスの元となる種コムを生成する。この変調に利用した信号はルビジウム発振器からの基準信号により高精度化している。種コムは光増幅器により損失を補償した後に光パルスシンセサイザへと入力される。各周波数成分が平面導波路型の分光素子であるアレイ導波路格子(AWG)により別々の導波路に分離され、個々の導波路に設置された強度・位相変調器により独立に変調が施される。変調後の各周波数成分はミラーで折り返し

て再度合波されて光パルスとなる。出力光は光フィルタで雑音を除去された後に、高強度光増幅器で増幅された後に非線形ファイバを伝搬して広帯域化する。広帯域化したコムは直接またはシアン化水素ガス(HCN)ガスセルを透過後に光スペクトラムアナライザで光スペクトルを測定する。また、必要に応じて光減衰器により強度を減衰した。

この時、生成されるコムの間隔は変調信号の周波数に相当する 12.5 GHz 間隔であり、その中心周波数は単一周波数レーザの周波数で決定される。この周波数の測定のためにレーザ光の一部を分岐して、周波数安定化レーザとのビート周波数を測定することにより、マルチギガヘルツコムの周波数を決定した。コム周波数可変化には、単一周波数レーザの周波数を掃引することで行った。

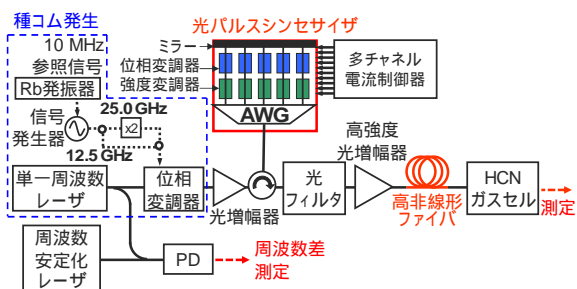


図 1 広帯域光周波数コム生成と計測の実験系

4. 研究成果

(1) 広帯域マルチギガヘルツコムの生成

図 2 に分光計測に利用した光周波数コムスペクトルの全体図と拡大図を示す。繰り返し周波数 12.5 GHz、幅 4 ps のパルスを増幅後に高非線形ファイバに伝搬させて広帯域化したスペクトルである。スペクトル幅は 100 nm 程度までコントラストが 15 dB 以上で広がっていることが分かる。また、拡大図からも 12.5 GHz 間隔のコムが明確に分離できていることが分かる。

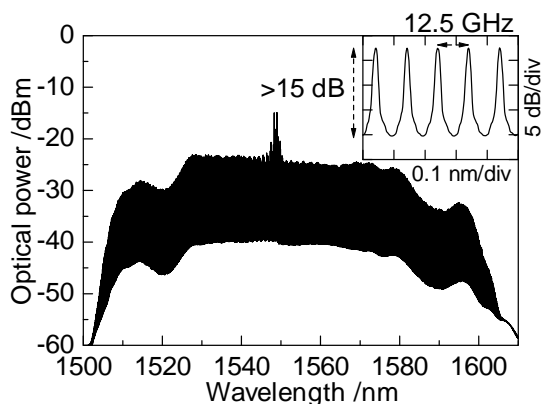


図 2 計測に利用したマルチギガヘルツコムスペクトル(全体図と拡大図)

## (2) 周波数可変なマルチギガヘルツコム

本研究で用いた光周波数コムは周波数間隔が 12.5 GHz と広いため、測定対象のスペクトル幅が狭い分光計測を行う場合には、コム周波数成分の間に入ってしまふとスペクトルが測定出来ない。そのため、コムを掃引しながら、計測する必要がある。単一周波数レーザの周波数シフトすることでコム全体をシフトした結果を図 3 に示す。単一周波数レーザと周波数安定化レーザの周波数が等しい時のコムスペクトルを 0 GHz の基準とした(黒線)。そして、その周波数シフトしたコムを併せて示している。図 3 からコムスペクトル全体の周波数が掃引できていることがわかる。周波数掃引は周波数間隔である 12.5 GHz の範囲をカバーできることは確認している。

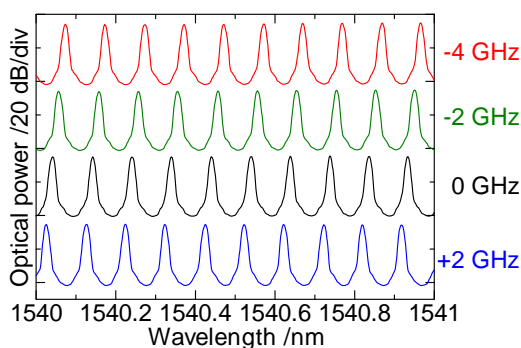


図 3 中心波長を掃引した光コムスペクトル拡大図

## (3) マルチギガヘルツコムを利用した HCN ガスの分光計測

コムを利用した HCN ガスの P11 枝の吸収分光の結果を図 4 に示す。コムを中心周波数を 100 MHz 間隔で掃引し、各掃引周波数毎にガスセル透過後の光スペクトルを測定した。測定したスペクトルから P11 枝の吸収スペクトルの周波数に相当するコム成分のピーク強度を取得して重ねた結果が図 4 である。P11 枝の吸収スペクトルが確かに測定できていることがわかる。ここでは P11 枝を示したが、ガスセル透過後のマルチギガヘルツコムの光スペクトル全体を測定しているため、同時に他の吸収線も測定できている。

また、光周波数コムの強度をガスセル入力点で 50 dB 減衰させた状態でもコム成分を図 3 と同様のコントラストで分解ができ、各成分のピーク強度を測定できている。このことから、非常に深い吸収ピークなどの高ダイナミックレンジな測定が可能であることを確認している。

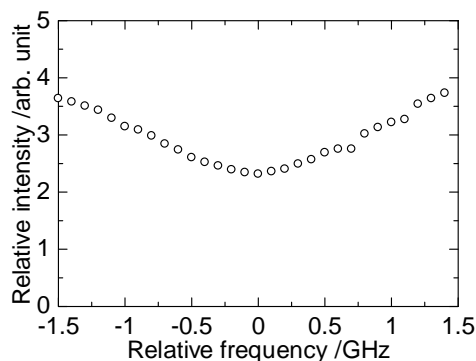


図 4 中心波長を掃引して測定した HCN ガス P11 枝のスペクトル

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

- (1) Azusa Hasegawa, Ken Kashiwagi, Yosuke Tanaka, and Takashi Kurokawa, "Temporal Imaging of Optical Asymmetric Waveform Pulses With a Time Lens," IEEE Photonics Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 1-11, 3rd Aug. 2015. 査読有, DOI:10.1109/JPHOT.2015.2464078
- (2) Ken Kashiwagi, Yosuke Kasuya, Shuto Kojima, and Takashi Kurokawa, "Synchronous scanning of reference mirror and objective lens for high-resolution full-field interferometry," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 54, No. 3, pp. 032501-1-5, 28th Jan. 2015. 査読有, DOI:10.7567/JJAP.54.032501

[学会発表](計 6件)

- (1) (招待講演) 柏木謙, 黒川隆志, "パルス合成による広帯域コム発生技術とその計測応用" 第3回 IPDA 研究会, 東レ総合研修センター, 三島, 静岡県, 2016年3月4日.
- (2) (Invited) Ken Kashiwagi and Takashi Kurokawa, "Photonic Arbitrary Waveform Generation Using Optical Pulse Synthesizer and Its Applications," Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2015), TOP HOTEL Prague, Prague, Czech Republic, 7th Jul. 2015.
- (3) Satoshi Seki, Tatsutoshi Shioda, Ken Kashiwagi, Yosuke Tanaka, Takashi Kurokawa, "Frequency-Variable Comb Light Source Using an Optical Frequency Shifter," Frontiers in Optics/Laser Science 2014 (FiO/LS 2014), no. FM3C.2, JW Marriott Tucson Starr Pass Resort, Tucson, Arizona, USA, 20th Oct. 2014.

- (4) 関智史, 塩田達俊, 柏木謙, 田中洋介, 黒川隆志, “波長可変なコム光源を用いた広帯域精密分光法の提案,” 2014年 第75 回応用物理学会秋季学術講演会, 18a-S8-8, 北海道大学 札幌キャンパス, 北海道, 2014年9月18日.
- (5) 関智史, 塩田達俊, 柏木謙, 田中洋介, 黒川隆志, “パルスシンセサイザを用いた波長可変なマルチギガヘルツコム光源,” 2014年 第61 回応用物理学会春季学術講演会, 19p-F8-16, 青山学院大学 相模原キャンパス, 神奈川県, 2014年3月19日.
- (6) Yoichi Tanaka, Shota Suzuki, Ken Kashiwagi, Takashi Kurokawa, “Waveform Reshaping of Compressed Pulse by Feedback Control of Optical Pulse Synthesizer,” Nonlinear Optics 2013, no. NW3A.5., The Fairmont Orchid, Kohala Coast, Hawaii, USA, 24th Jul. 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柏木 謙 (KASHIWAGI, Ken)  
東京農工大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 10509730

### (2) 研究分担者

黒川 隆志 (KUROKAWA, Takashi)  
東京農工大学・大学院工学研究院・名誉教授  
研究者番号: 40302913

### (3) 連携研究者

田中 洋介 (TANAKA, Yosuke)  
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 20283343

塩田 達俊 (SHIODA, Tatsutoshi)  
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 10376858