

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800217

研究課題名(和文) 可視から中赤外領域にスペクトルを持つ狭線幅光周波数コムの開発

研究課題名(英文) Development of an optical frequency comb spanning from visible to mid-infrared

研究代表者

大久保 章 (Sho, Okubo)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：30635800

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：偏波保持出力型の光周波数コムオシレーターを製作し、中心波長1570 nmで半値全幅49 nmの広いスペクトル帯域を持つ光周波数コムを発生させた。続いて、偏波保持型の光ファイバーアンプを製作し、高いパルスエネルギーが得られるように分散を調整したが、まだ波長広帯域化に十分なパルスエネルギーは得られていない。

また、偏波保持型ではない光周波数コムとPPLN導波路を用いて可視から中赤外のスペクトル発生を達成しており、これを偏波保持化することで高効率かつ安定なスペクトル発生を実現できる見通しは立った。

研究成果の概要(英文)：We developed a polarization-maintain-type optical frequency comb oscillator and generated a comb light with a center wavelength of 1570 nm and a full-width at half maximum of 49 nm. Then we developed a polarization-maintain-type fiber amplifier and adjusted its dispersion to obtain a high pulse energy. However, we have not obtained the sufficient energy to broaden the spectrum more than one-octave.

On the other hand, we have successfully obtained the optical frequency comb spanning from visible to mid-infrared using non-polarization-maintain-type comb and PPLN waveguide. Therefore we can see the prospect to a efficient and stable generation of the broadband comb by replacing this system to polarization-maintain type.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：光周波数コム 超短パルスレーザー 周波数メトロロジ 非線形波長変換

1. 研究開始当初の背景

(1) 周波数は最も高精度に測定できる物理量であり、光周波数の測定を可能にした光周波数コムは史上最も正確な「ものさし」と言える。光周波数コムを用いた周波数計測は、光周波数標準をはじめとする多くの研究で利用されており、さらに、コム自身を光源として使用する分光測定法の開発など応用分野での研究も広がっている。こうした背景の中、光周波数コムには周波数制御性の向上とともに、発振波長域の拡大が求められている。これらの性能を満たすことで、任意の周波数の狭線幅光源を自由に得られる。

(2) 光周波数コムへの応用研究において、波長域拡大と高繰り返し化は重要な開発要素であり、様々な種類のコムが開発が進められている。特に波長域が拡大すると、コムで周波数測定できる波長域が広がり、コム直接分光で測定できる原子、分子の種類が増加するなど、応用の範囲が格段に広がる。現在、実用化されている Er ファイバーコム (中心波長 1560 nm)、Yb ファイバーコム (1040 nm)、Ti:Sapphire コム (800 nm) に加えて、Ho:YLF レーザーコム (2060 nm)、Cr:ZnSe レーザーコム (2450 nm)、Tm ファイバーコム (1950 nm)、量子カスケードレーザーコム (~7 μm) などの中赤外領域をターゲットにした新しいコムの研究が盛んに行われている。しかし、新しい素材でコムを作り波長域を拡大しようとする場合、高速制御性などその他の重要な性能を同時に達成できるかという点では不確定要素が多く、上に挙げた例では実現できていない。

(3) 一方、既に実用化された Er ファイバーコムなどを基本波とし、非線形光学結晶を用いた波長変換によってコム波長域の拡大する研究も進んでいる。例えば、波長 1064 nm の Nd:YAG レーザーと Er ファイバーコムとの差周波発生で中赤外コムを得たという報告がされている[1]。この方法であれば、コム性能を損なうことなく波長域を拡大できる。波長変換技術の開発も進んでおり、導波路型の PPLN (Periodically poled lithium niobate) 結晶はバルクの PPLN に比べて 2~3 桁ほど波長変換効率が高く、2 次高調波や和周波、差周波を高効率に発生させることができる[2]。

(4) 以上の点から、申請者所属グループの高速制御型 Er ファイバーコム技術と導波路型 PPLN による波長変換の組み合わせで、高速制御性と波長域の拡大を両立する光コムの実現を目指すに至った。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、高速制御型光周波数コムと非線形光学結晶による波長変換を用いて、可

視～中赤外領域にスペクトルを持つ狭線幅光周波数コムを開発する。

(2) そのために偏波保持・高速制御型コムを新たに開発する。まず、分散調整したファイバーアンプによってパルスピークパワーを増強し、高非線形ファイバーで広帯域化する。次に、 $f-2f$ 干渉計を使って、光コムオフセット周波数 (f_{ceo}) を観測する。そして、基準となる狭線幅レーザーとのビート周波数と f_{ceo} を、それぞれ基準信号に位相同期することで、狭線幅光コムを実現する。

(3) 光コム出力光を導波路型 PPLN 結晶に直接入射し、可視・中赤外コムを発生させる。光コムは狭線幅レーザーに位相同期されているので、全ての波長領域で狭線幅化した光コムを得ることができる。

3. 研究の方法

(1) 図 1 は、偏波保持出力型の光コムオシレーターの構成を示す。コムオシレーターは、非線形偏波回転を用いたモード同期 Er ファイバーレーザーである。フリーラン時の周波数雑音を提言するため、共振器分散はゼロ付近になるように調整する。また、オシレーターには電気工学変調器が組み込まれており、共振器長を高速制御できる。出力は、PBS を用いて直線偏光で取り出す。これを偏波保持ファイバーに入射し、オシレーター以降は偏波保持型の光コムとなる。

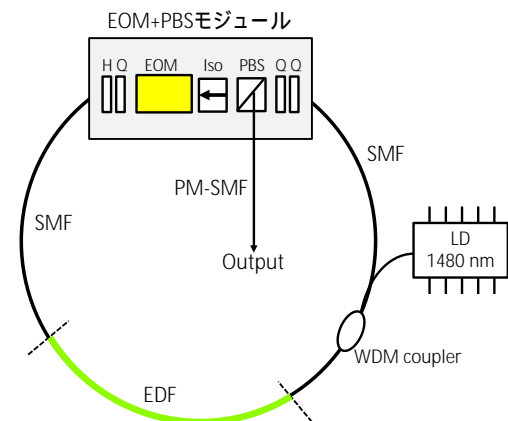


図 1: 偏波保持出力型光コムオシレーター。H: $\lambda/2$ 板、Q: $\lambda/4$ 板、PBS: 偏光ビームスプリッター、Iso: アイソレーター、EOM: 電気光学変調器、SMF: Single-mode fiber、EDF: Erbium-doped fiber、PM-: 偏波保持。

(2) 図 2 は、コムオシレーターからの出力パルスのピークパワーを増強するためのファイバーアンプの構成を示す。PM-EDF 部分で効率的にパルス圧縮を行うために、正常分散を持つ EDF の前に、異常分散を持つ PM-SMF を加え、その長さを変えて分散を調整する。赤文字で示した部分の長さを変えながら出力光を光スペクトラムアナライザで観測し、最適な分散量を探す。

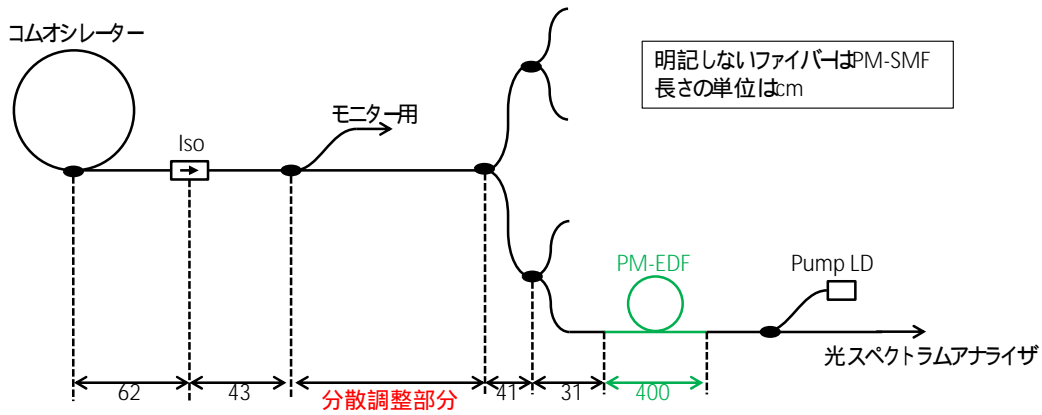


図2: オシレーター後のマルチブランチ式ファイバーアンプ系

4. 研究成果

(1) 図3は、製作したコムオシレーターの光スペクトルを示す。共振器分散をゼロに近づけるため、スペクトル幅が広がるように調整した。分散調整に正常分散ファイバーを用いた場合、図3(a)に示すようにスペクトルにフリンジが生じる。これは、デュアルコム分光など光コムを分光用光源とする場合に問題となる。フリンジの原因としては、ファイバー融着点の反射によるエタロン効果や、正常分散ファイバーに僅かな複屈折性があって干渉効果が疑われる。そこで、PM-EDFとPM-SMFのみで分散調整を行い、図3(b)のようにフリンジのないスペクトルを得た。中心波長は約1570 nm、半値全幅は約49 nmである。ガウス型を仮定した場合のフーリエ限界パルス幅は約70 fsに相当する。

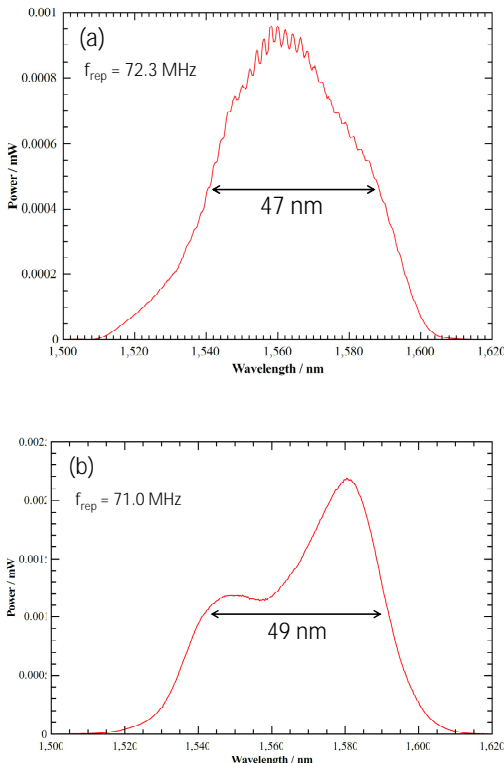


図3: オシレーターの光スペクトル。(a) 正常分散ファイバーで分散補償した場合。フリンジが生じ

ているのが確認できる。(b) EDFとSMFだけで分散調整した場合。フリンジは生じない。

(2) PM-EDF前のPM-SMF長を500 cmから徐々に短くしていき、増幅後の光出力を光スペクトラムアナライザで観測した。275 cmまで短くしたが、パルス圧縮を示すスペクトルは観測されず、分散調整が不十分であることを示唆する。どこまでPM-SMF長を短くできるかは、ファイバーコンポーネントや融着器の大きさで物理的に制限されており、より短くする場合には、集積化されたファイバーコンポーネントへ交換が必要となる。

(3) 偏波保持型のファイバーアンプによるパルス圧縮を達成する前に、偏波保持でない通常のファイバーアンプを用いた系で、広帯域光コムの発生を試みた[3]。図4は、広帯域コムを発生させるための系と、発生した光コムのスペクトルを波長帯域の異なる3台の光スペクトラムアナライザで観測した結果を示す。双方向励起でパルス増強された光コムを、高非線形ファイバーに通して波長1~2 μmにわたって広帯域化し、さらにPPLN導波路に入射して可視から中赤外領域にわたる光コムを得た。短波長側は、350 nmまでの発生が確認できており、これは光スペクトラムアナライザの帯域で制限されている。長波長側は4.4 μmまでの発生が確認できる。2.7 μm帯、4.3 μm帯には、空気中の水と二酸化炭素の吸収線も確認できる。

(4) 非偏波保持の系では、可視から中赤外にわたる広帯域コムの発生が確認できた。同様の構成で偏波保持化することで、より安定に広帯域コムが得られると考えられる。

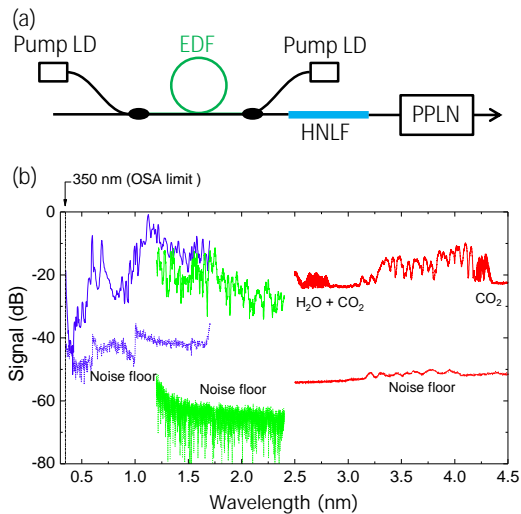


図 4: (a)広帯域コム発生のための系。HNL: 高非線形ファイバー。(b)発生した広帯域コムのスペクトル。各色は、波長帯域の異なる 3 種類の光スペクトラムアナライザを示す。

<引用文献>

- [1] E. Baumann, *et. al.*, Phys. Rev. A **84**, 062513 (2011).
- [2] O. Tadanaga, *et. al.*, Appl. Phys. Lett. **88**, 061101 (2006).
- [3] K. Iwakuni, *et. al.*, Opt. Lett. **41**, 3980 (2016).

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)

[学会発表] (計 2 件)

大久保 章、中村 圭佑、シュラム マルテ、山本 宏樹、石川 純、洪 鋒雷、大苗 敦、美濃島 薫、筒井 寛典、神戸 栄治、泉浦 秀行、小林 拓実、保坂 一元、稲場 肇、天体視線速度観測用分光器のための波長校正用光コムの開発、レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会、2016 年 1 月、徳島大学

大久保 章、光周波数コムによる周波数合成の進展、第 33 回先端光量子科学アライアンスセミナー、2016 年 3 月、慶應義塾大学

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

大久保 章 (Sho Okubo)
 産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員
 研究者番号：30635800