

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82636

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20441

研究課題名（和文）マイクロ光コム発生系の可搬化と環境温度のコム雑音に対する影響の検討

研究課題名（英文）Development of a portable microcomb generation system and investigation of environmental temperature effects on microcomb noise

研究代表者

鐵本 智大（Tetsumoto, Tomohiro）

国立研究開発法人情報通信研究機構・テラヘルツ研究センター・主任研究員

研究者番号：50894870

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、集積可能な光周波数コムであるマイクロ光コム発生系の可搬化と動作環境温度の変化による位相雑音低減の機構の調査に取り組んだ。発生系の可搬化は構成要素の小型化により、系を30 cm×45 cmのブレッドボードに搭載可能な程度の大きさに実装した。また、ソリトンマイクロ光コム発生手法の簡易化のために、DFBレーザの電流直接変調によるソリトンマイクロ光コム発生に取り組み、成功した。位相雑音低減機構の調査については測定系の構築と動作確認は完了したが、当初計画していた実験は実施途中である。一方で、構築した測定手法を発展させた形で応用する事で複数の実験遂行に役立てる事が出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロ光コムは、光通信等での多波長光源としての応用だけでなく、光周波数コムの性質を活かした超高精度測定や超低雑音信号発生を民生応用に広く活用可能にする技術として期待されている。一方で、マイクロ光コムの発生に専門的知識や特殊な制御、大型な発生系が必要な事などがマイクロ光コムの分野を超えた応用やキラーアプリケーションを探索する上での障壁となっていた。本課題で開発した可搬マイクロ光コム発生系は分野横断的な共同研究等に直接役立てる事が出来るもので、先端技術の民生応用利用を推進するために有意義なものである。また、本課題で利用した測定手法は汎用性が高いものであり様々な学術的研究に応用できる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we developed portable generation systems for microcombs, which are integrated optical frequency combs, and investigated the mechanism of phase noise reduction due to changes in the operating environment temperature. By miniaturizing the components, the portable generation system was implemented to a size that could be mounted on a 30 cm × 45 cm breadboard. Additionally, we conducted direct current modulation of a DFB laser to simplify the generation method of soliton microcombs, successfully generating a soliton microcomb. Regarding the investigation of the phase noise reduction mechanism, the construction and demonstration of the measurement system have been completed. However, the originally planned experiments are still in progress. Nevertheless, the measurement methods we developed have been applied in an advanced form, contributing to the demonstration of multiple experiments.

研究分野：集積フォトニクス

キーワード：マイクロ光コム 光周波数コム 非線形光学

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

時間・周波数・空間領域での精密計測を可能にする光源である光周波数コムを小型化する手法としてマイクロ光コムが注目されている。その一方で、マイクロ光コムの発生には専門的な知識と特殊な制御が必要な事や発生系が大きくなりがちである事が、マイクロ光コムの分野を超えた応用を検討する上での障壁となっていた。また、マイクロ光コムの位相雑音の低減が望まれている一方で、雑音低減手法に開拓の余地があった。例えば、マイクロ光コムの位相雑音や周波数安定度が動作温度の影響を受けることを示唆する実験結果が報告されているにも関わらず、その原因や物理についての検討が十分でなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、マイクロ光コムの分野横断的な応用検討の裾野を広げるために、マイクロ光コム発生系の可搬化を目指した。また、マイクロ光コムの更なる低位相雑音化のために、動作環境温度のマイクロ光コム位相雑音への影響を調査する事を志した。

### 3. 研究の方法

マイクロ光コム発生系の可搬化は、マイクロ光コム発生に必要な主な構成要素を 30 cm×45 cm 程度の大きさのブレッドボード上に搭載し、可搬化する事を検討した。ソリトン化した低雑音なマイクロ光コムの発生には、励起光源、光源の高速変調用の変調器、光増幅器、チップ上の導波路への光入出力のための調芯系・カメラ系が必要となる。これらを小型に実装する構成を設計・試作・試験した。また、系の更なる簡略化のために、高速変調器を利用しないDFBレーザの直接変調によるソリトンマイクロ光コムの励起実験を検討した。

マイクロ光コムの雑音への動作環境温度の影響の調査は、Fig. 1に模式的に示したPDH制御によって励起光・共振器モードの離調周波数が制御可能な実験系で行う事を考えた。先行研究で、マイクロ光コムの位相雑音が極小化する離調周波数がある事が知られていた。また、動作温度を変更した際に雑音が極小値を取る離調周波数がシフトする事が実験で示されていたが、その原因は明らかでなかった。本研究では、離調と動作環境温度の両方を制御できる系でこの原因の調査を行う事を考えた。系の動作の概要は次のようなものである。励起光は、PDH制御のエラー信号を得るために位相変調器で変調され、シングルサイド変調器を経由後にエルビウムファイバ増幅器(EDFA)で増幅され、マイクロリング共振器に入力される。この際に、シングルサイドバンド変調器によって励起光周波数を低周波数側へ高速掃引する事でソリトンマイクロ光コムが形成される。マイクロ光コムをフォトダイオードで受光する事で位相変調周波数が得られる。それと位相変調に利用した信号発生器からの信号を適切な位相関係で周波数ミキサに入力する事でPDH制御のためのエラー信号が得られる。制御用のフィルタ回路の出力はシングルサイド変調器を介して、励起光周波数に作用する。この際に、信号発生器の周波数を変更する事で離調周波数を制御する事が出来る。また、マイクロリング共振器を搭載したチップが置かれているステージの動作温度も制御可能となっている。離調と動作温度を変更した際のマイクロ光コムの位相雑音を測定する事で先行研究の追実験を行う事が出来る。位相雑音の測定には後述する電気変調光学コムに基づく系を用いる事を考えた。また、ソリトン形成時のコムの状態をより詳細に観測するため、コヒーレント検波に基づくコンプレックス光スペクトルアナライザでの測定によって励起光以外のコム線の離調を測定する事を計画した。

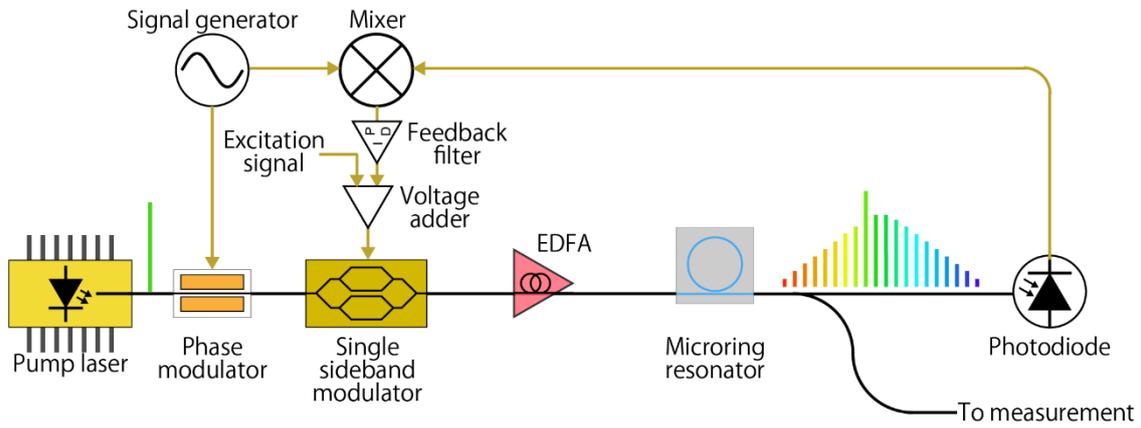


Fig. 1: 励起・共振器周波数間の離調と動作環境温度のマイクロ光コム位相雑音への影響を調査するための実験系模式図。

#### 4. 研究成果

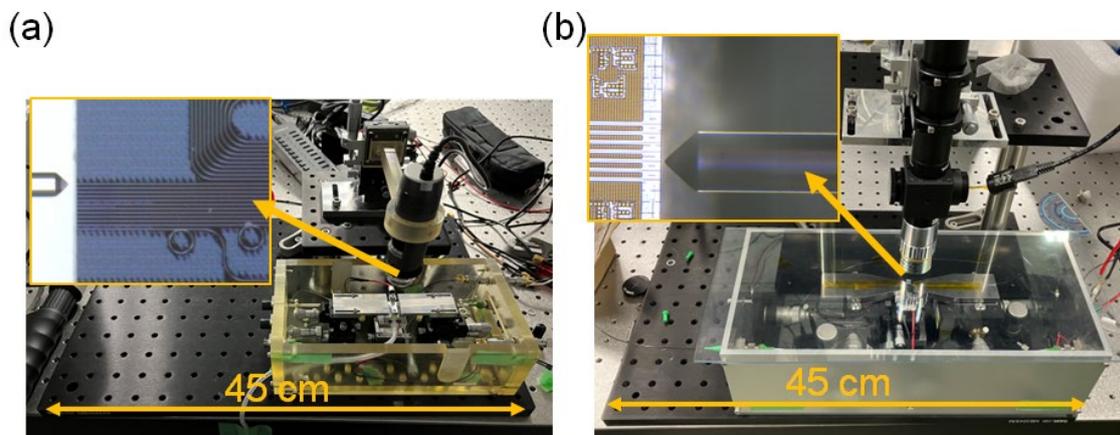


Fig. 2: マイクロ光コム発生用の調芯系・カメラ系。(a) 2022年度版、(b) 2023年度版。

作製したマイクロ光コム発生のための調芯系・カメラ系を Fig. 2 に示す。2022年度の検討では Fig. 2(a)の系を構築した。調芯系は中央に共振器チップを保持するステージ、その両側に集光用レンズドファイバの位置調整用の3軸ステージが置かれた形となっている。調芯時のチップとレンズドファイバの位置関係はカメラ系で観察される (Fig. 2 挿入図)。調芯系とカメラ系を合わせて、 $30\text{ cm} \times 45\text{ cm}$  のブレッドボードの半分程度の面積で実装し、光の入出力が可能な事を確認した。一方で、ステージのバックラッシュが仕様から想定していたより大きくチップを傷つけてしまう恐れがある事、より安全な操作には高倍率のカメラ系が好ましいことが分かったため、2023年度に改良版を設計・構築した (Fig. 2(b))。基本構成は同じである。より高精度で大きい3軸ステージを利用したためサイズがやや大きくなったが、 $30\text{ cm} \times 45\text{ cm}$  のブレッドボードに収まる大きさで前述の2つの課題を解決する事が出来た。また、他の実験装置について、EDFAとシングルサイド変調器の小型な構成を考え、実装した (Fig. 3)。



Fig. 3: (a) 自作 EDFA、(b) シングルサイド変調器関連備品を小型に実装した物。

また、シングルサイド変調器を利用しないDFBレーザの直接変調による簡易な構成でのソリトンマイクロ光コム励起を試みた。シングルサイド変調器を利用する場合とDFBレーザの電流を直接変調する場合の系の違いをそれぞれFig. 4(a), (b)に模式的に示した。シングルサイド変調器による励起 (Fig. 4(a)) では信号発生器から立ち上がり早いステップ型の電圧を出力し、それを電圧制御発信器で周波数の高速変化に変換する。高速に周波数変調した信号をシングルサイド変調器に加える事で励起光周波数の高速掃引を行う。この際に、RFパワーの増幅器と位相が異なる2信号を変調器に加えるためのハイブリッドスプリッタが必要となる。単純なステップ信号の利用でコム励起が可能なため条件出しが比較的容易である一方、系の構成要素が多い。一方で、DFBレーザの電流の直接変調の場合 (Fig. 4(b)) は信号発生器の出力をDFBレーザに直接入力する事で励起が可能である。その一方で、電流変調によって励起光周波数だけでなくレーザパワーも変化してしまう事などから、信号発生器の出力波形形状の工夫が必要となる。DFBレーザの直接変調時に利用する信号波形の条件出しを行い、ソリトンマイクロ光コム発生に成功した (Fig. 4(c))。

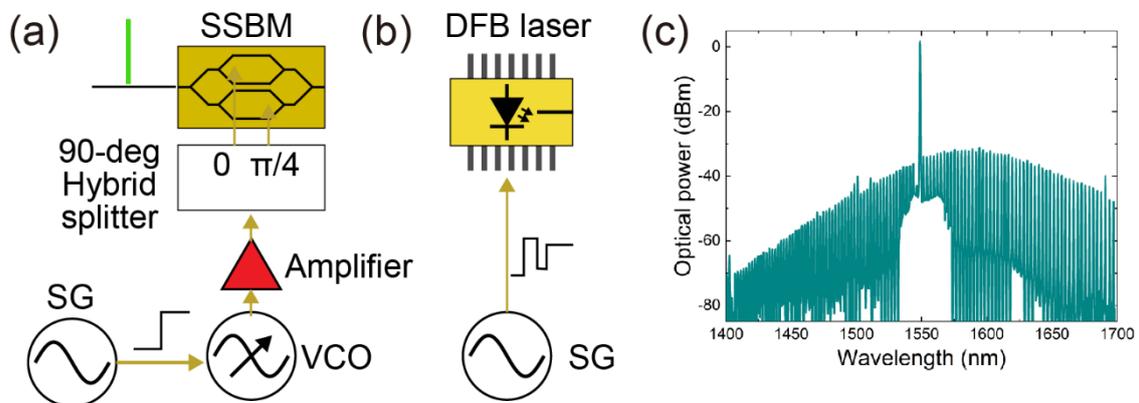


Fig. 4: (a)シングルサイド変調器利用時と(b)DFBレーザ直接変調時のコム発生のための系の模式図。(c)DFBレーザの直接変調によって励起したソリトンマイクロ光コム。

次に、マイクロ光コムの位相雑音関係の調査のために、測定・評価手法の確立を試みた。構築したマイクロ光コムの雑音測定系の模式図を Fig. 5(a)に示す。2つのコム線を入力とし、位相変調を加える事でそれらの電気光学変調コムを発生する。この際に、それぞれのコム線から発生した電気光学変調コムは、スペクトルの重なりを持つ程度に広げる。ここで、スペクトルの重なり部をバンドパスフィルタで取り出し、フォトダイオードで受光する事で得られたビート信号はマイクロ光コムの雑音と電気光学変調コムの雑音の情報を有している。ここで、電気光学変調コムの発生に十分に低雑音な発信器を利用すると、マイクロ光コムの雑音を取り出せる。実際に系を構築し、発生した電気光学変調コムを Fig. 5(b)に示す。また、得られたビート信号から位相雑音測定が可能なる事を確認した。更に、マイクロ光コムの詳細な評価のために、コンプレックス光スペクトルアナライザによる測定で励起光以外のコム線・共振モード間の離調周波数が得られる事を確認した (後述)。

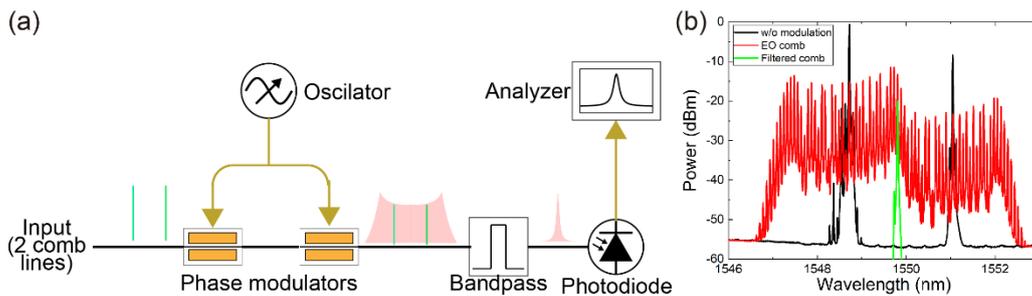


Fig. 5: (a) 位相雑音測定系の模式図。(b) 位相雑音測定時の電気光学変調コムスペクトル。

なお、Fig. 1 の実験は、系の構築と動作確認、及びいくつかの条件での実験は行ったものの、電子部品の故障等の影響で完遂は出来ていない。本課題の期間内の終了は出来なかったが、探索の余地があるため、準備が整い次第改めて再実験を行いたいと考えている。

その一方で、本課題で検討した手法の発展形を 2 つの実験に役立てることが出来た。1 つ目は、マイクロ光コムを参照とした広い周波数可変幅を有する低雑音テラヘルツ波発信器の原理実証である (Fig. 6(a))。実験の詳細は割愛するが、出力の位相雑音と周波数の評価 (Fig. 6(b)) を前述の電気光学変調コムに基づく位相雑音測定系の改良版で行う事が出来た。2 つ目は、コンプレックス光スペクトルアナライザを利用した離調測定の実験である。測定手法を Fig. 6(c) に示すが、基本は、マイクロ光コムと共振スペクトル測定用のプローブ光と同時にコヒーレント検波する事で、コムスペクトルと共振スペクトルを広い範囲に測定するものである。コム線と共振モードの周波数差を見る事で各モードの離調周波数が測定出来た。発展形として、この際に得られた離調周波数を解析する事で、共振器の高次の群速度分散の見積もりが可能であることを示した (Fig. 6(d))。これにより、スペクトル、離調、分散等のマイクロ光コム発生において重要なパラメータを高速・広範囲に取得する事が可能である。

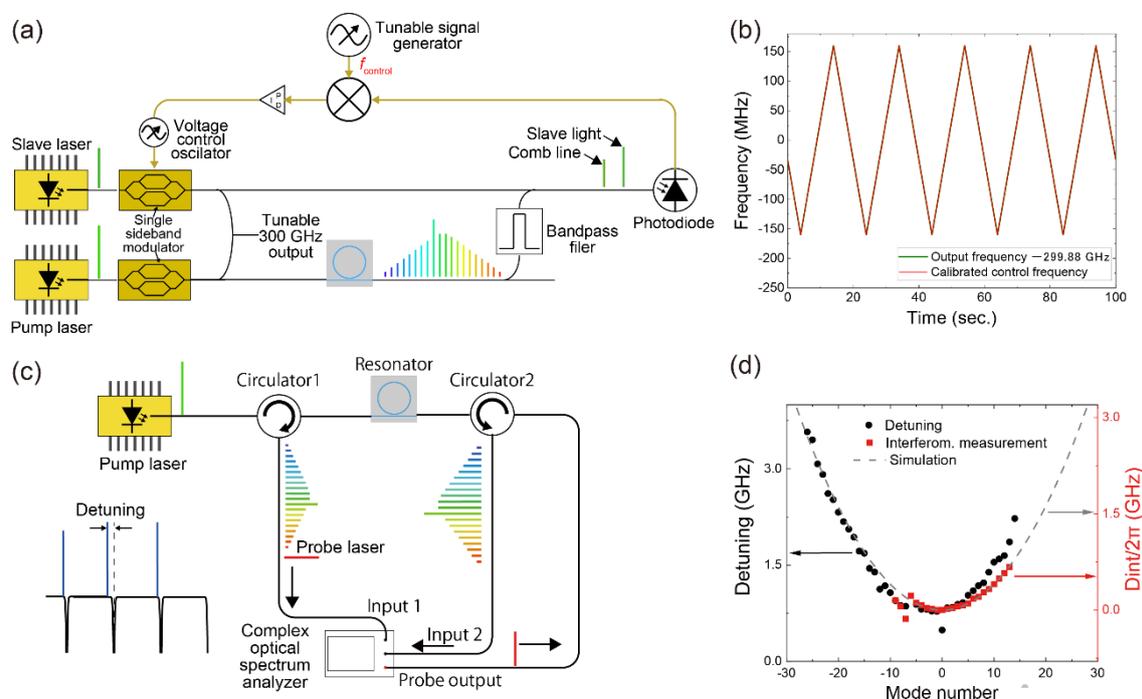


Fig. 6: (a) マイクロ光コムを参照とした広範囲の周波数掃引可能な低雑音テラヘルツ波発生実験系の模式図。(b) 掃引実験結果。(c) マイクロ光コムの高速度・広範囲な特性評価のための実験系の模式図。(d) 群速度分散の見積もり結果。

## 5. まとめ・展望

マイクロ光コム発生系の各構成要素の小型化・可搬化を行った。また、マイクロ光コム位相雑音低減に関する検討については、当初計画していた実験は期間内に完遂出来なかったが、検討過程で開発した技術を発展させることで他の実験に役立てる事が出来た。

本課題で開発した技術は、マイクロ光コム実験において汎用性が高く、応用実験を進める基礎として有意義なものである。実際、開発した可搬化系の構築法は無線通信応用プロジェクトに活用する計画が立ち上がっており、実験の準備を進めている。今後も様々な分野横断的な応用の開拓への利用を見込んでおり、研究のスタートアップにおいては心強い成果が得られたと考えている。本制度による支援に心から感謝している。

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 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鐵本智大
2. 発表標題 マイクロリング共振器を用いたKerr光周波数コムによるテラヘルツ波発生
3. 学会等名 IEEE MTT-S/PS Kansai共催ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安東亜八香、鐵本智大、古澤健太郎、今井一宏、関根徳彦
2. 発表標題 マイクロ光コムのコム周波数と共振周波数の精密同時測定
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鐵本智大
2. 発表標題 マイクロ光コムの低位相雑音化技術と通信応用展開
3. 学会等名 超高速光エレクトロニクス(UFO)研究会 第5回研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鐵本智大、古澤健太郎、関根徳彦
2. 発表標題 マイクロ光コムに位相同期した周波数可変テラヘルツ波信号源
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023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
---------	---------