

マイクロ光周波数コムを用いた超低位相雑音 THz 発生に関する研究

代表研究者

久世 直也

徳島大学ポスト LED フォトニクス研究所 准教授

1 研究調査の背景

Society 5.0 が実現された社会では完全自動運転車や遠隔医療が広く普及している。また、新型コロナウイルス感染症の拡大は世界的にテレワークやオンラインミーティングの重要性を明らかにした。これらに共通して必要なことはサイバー空間とフィジカル空間の密なつながりである。このような社会では情報の伝達・処理技術が極めて重要となり、大容量・高速な無線通信技術が必要となる。実際、データ通信量はインターネットが普及し始める前の 1992 年には 0.001 GB/秒であったのに対し、2016 年には 10000 GB/秒以上と実に 1000 万倍になっている。このデータ通信量の指数関数的増大は今後も継続していくことは確実である。データ通信量の増加に対応するためにキャリア周波数を大きくする方法がとられ、ごく最近、最大 100 GHz までのキャリア周波数を利用する第 5 世代通信 (5G) の無線通信が使用され始めたところである。2030 年以降の次世代の通信 (beyond 5G と呼ぶ) ではキャリア周波数はさらに大きくなり 1 THz 程度まで考えられている。しかし、キャリア周波数が大きくなるにつれ、半導体集積回路の微細加工の技術に依存したエレクトロニクスによる方法の技術的な困難さ (と価格) は増し、300 GHz を超える周波数では発生することすら難しい。さらに、キャリア周波数を大きくするにつれ、キャリアの位相雑音が大きくなるという問題もある。位相雑音の悪化は、例えば、キャリアの振幅と位相の両方を変調する方式 (quadrature amplitude modulation, QAM) を使うことを難しくし、同一帯域幅内に載せることができる情報量の低下につながる。

このような背景のもと、本研究ではキャリア周波数、位相雑音という通信の根源にあるキャリアに対する研究を行い、これまでにない手法で高周波キャリア発生 (100 GHz - 1 THz) と低位相雑音を両立する新規基盤技術の開拓を目指す。

2 研究内容と結果

光周波数コムは離散的で等間隔な光キャリア (コムモード) の集合 [1] であり、ファイバーレーザーや固体レーザーから構成されることが多い。これまで、ファイバーレーザー光周波数コム (以下、ファイバーコム) を用いて、コムモード間の超低位相雑音性をフォトディテクタによる光電変換によってマイクロ波に転写する研究がなされてきた。2017 年にはファイバーコムを用いて 12 GHz のキャリア周波数で、10 kHz のオフセット周波数で -170 dBc/Hz という超低位相雑音を実現した [2]。しかし、ファイバーコムのコムモード間隔は通常 100 MHz 程度であり、超低位相雑音の発生は 10 - 20 GHz 程度にとどまり、ミリ波・THz 帯に展開することは難しい。そこで本研究では同様の手法をマイクロ光周波数コム (以下マイクロコム) に転用する。マイクロコムは CW レーザー (励起レーザー) を半導体製造装置で作製可能な微小共振器に結合し、微小共振器内の非線形光学効果によって発生する [3, 4]。マイクロコムはファイバーコムとは異なり、その作製原理上、小型で量産性に優れた非常に実用性の高い光周波数コムである。さらに、マイクロコムのコムモード間隔は 100 GHz - 1 THz となり、次世代通信で必要となるキャリア周波数帯と相性が良い。本研究ではコムモード間隔が 560 GHz のマイクロコムを発生し、マイクロコムの低位相雑音化を進め、その低位相雑音性を THz に転写することで、低位相雑音な THz 発生を実現する。本研究ではマイクロコムの低位相雑音化の 2 つの手法の開発を行った。

2-1 光サイドバンドによるマイクロコムの低位相雑音化

マイクロコムの位相雑音は熱雑音による微小共振器の共振器長揺らぎ [5, 6, 7] に制限される。したがって、マイクロコムの低位相雑音化には熱雑音・共振器長揺らぎを何らかの方法によって抑制する必要がある。本手法では光サイドバンドによるマイクロコムの低位相雑音化を行った。

(1) 基本原理

基本原理の概要を図 1 に示す。マイクロコムが発生している時、CW レーザーは微小共振器の共鳴周波数に対して長波長側にある。この時、励起レーザーに加え、励起レーザーを元に電気光学変調器から発生する光

サイドバンドを共振周波数に対し短波長側に配置する。それにより共振器長揺らぎを抑制する。これを理解するために、例えば、共振器の温度が上昇し、共振周波数が長波長側にシフトした場合を考える。すると、共振器内の光サイドバンドの光パワーが低下し、それにより共振器の温度が減少する。つまり、共振器の温度上昇効果を抑制することができる。逆に、共振器の温度が減少し、共振周波数が短波長側にシフトした場合を考える。すると、共振器内の光サイドバンドの光パワーが上昇し、それにより共振器の温度が上昇する。つまり、共振器の温度減少効果を抑制できる。以上のように、光サイドバンドによって共振器の熱雑音による共振器長揺らぎが低減できる。

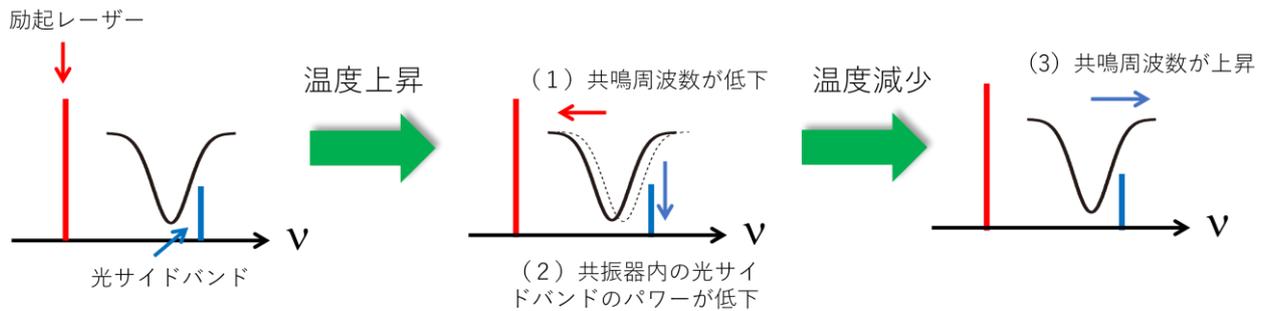


図1. 光サイドバンドによるマイクロコムの低雑音化の原理説明

(2) 実験セットアップ

図2に実験セットアップを示す。励起レーザーを2つに分け、片方に電気光学変調器を通して光サイドバンドを発生する。励起レーザーと光サイドバンドは微小共振器に対向方向から結合する。発生したマイクロコムはコムモード間の位相雑音を測定するために2波長マッハツェンダー干渉計(TWDI) [8]を伝搬する。TWDIの光学系部はアンバランスマッハツェンダー干渉計と、光バンドパスフィルタを伴った2つの光出力からなる。光バンドパスフィルタは1つのコムモードのみを取り出し、2つの光出力で異なる波長のコムモードを取り出すように設定する。電気系部では2つの光出力をフォトディテクタに照射する。この時、2つのフォトディテクタでは光バンドパスフィルタで抽出したN番目とM番目のコムモードの位相雑音を測定する。それらをアナログミキサで乗算することで、N番目とM番目のコムモード間の相対位相雑音が測定できる。実験では(N-M) = 2次(すなわち今回の実験では1.2 THz キャリアの位相雑音)の時の位相雑音を測定した。

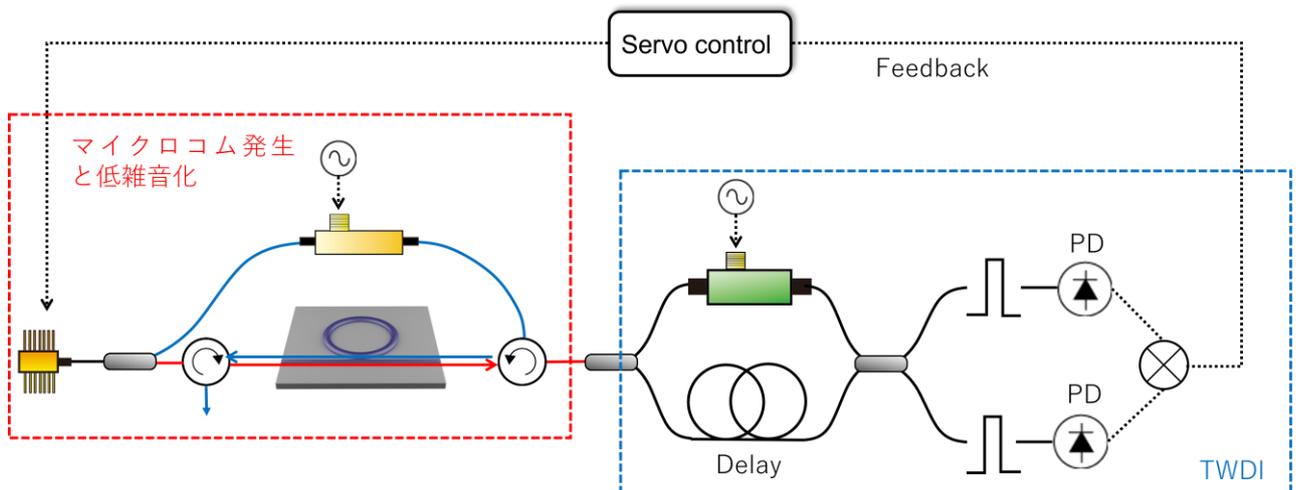


図2. 実験セットアップの概要図

(3) 実験結果

図3に実験結果を示す。基本原理で説明した効果により、光サイドバンドを加えると、マイクロコムのコ

ムモード間の位相雑音が最大 20 dB 程度抑制できた。ただ、オフセット周波数が大きくなるにつれて、位相雑音の低減効果が小さくなっていく様子が観測された。これは微小共振器の光サイドバンドの共振器内の光パワーが熱に変換する応答速度に制限されていると思われる。また、光サイドバンドの強度を大きくしていくと、位相雑音の低減効果の飽和が見られ、これ以上の位相雑音低減効果が困難であった。これは光サイドバンド由来の別のマイクロコムが発生し始め、それにより光サイドバンドのパワーが実際には上昇していないか、第2のマイクロコムが主マイクロコムに何らかの悪影響を及ぼしているのではないかと考えられる。この飽和効果の追求と改善は今後の研究の1つの課題である。

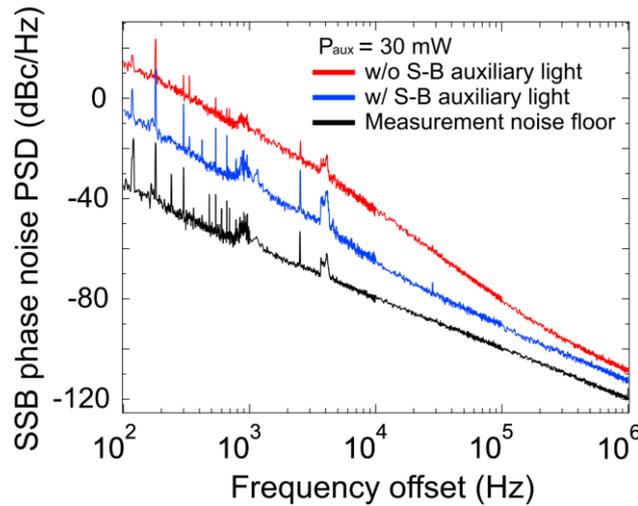


図3. 光サイドバンドがある時（青線）とない時（赤線）の1.2 THzのキャリア相当の位相雑音。（黒線）測定のノイズフロア。

2-2 TWDIによるマイクロコムの低位相雑音化

前項では光サイドバンドを利用した受動的なマイクロコムの低位相雑音化を行った。本項ではTWDIを用いて、能動的にマイクロコムの低位相雑音化を行った。また、低位相雑音化したマイクロコムを使ってTHz発生を行い、さらにTHzの位相雑音を測定する系を考案し、実際にTHzの低位相雑音性を実証した。

(1) 基本原理

TWDIはマイクロコムのコムモード間の位相雑音のリアルタイムの測定を可能にする。リアルタイム測定が可能ということはフィードバックループを構成することで測定対象の雑音を小さくできることを意味する。具体的には、TWDIで測定したコムモード間位相雑音をエラー信号として、励起レーザーの周波数をエラー信号がゼロになるようにフィードバックループを構成する。

図4に低位相雑音化したマイクロコムを元にTHz発生と位相雑音測定する手法について説明する。通常、マイクロコムからTHzを発生するには、低位相雑音化したマイクロコムから2本のコムモードを切り出し、それらをフォトディテクタに照射すればよい。しかし、本研究では位相雑音を測定するために、低位相雑音化したマイクロコムを2台（コムモード間隔が f_{rep1} と f_{rep2} ）用意し、それぞれのマイクロコムから2本のコムモードを切り出し、合計4本のコムモードをフォトディテクタに照射する。すると、周波数が f_{rep1} と f_{rep2} の2つのTHzが発生する。続いて、それらをショットキーバリアダイオード（SBD）で2乗検波することで、周波数が $|f_{\text{rep1}} - f_{\text{rep2}}|$ のマイクロ波が発生する。このマイクロ波の位相雑音は2つのTHzの位相雑音が転写されるため、周波数下方変換されたマイクロ波の位相雑音を測定することでTHzの位相雑音が測定できる。

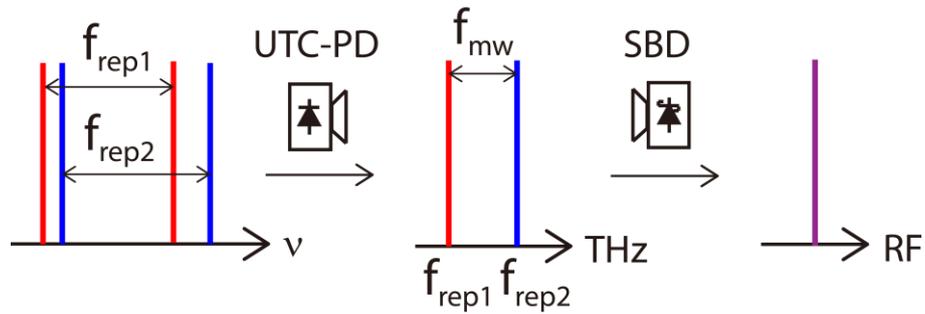


図4. THz の位相雑音測定 の原理説明

(2) 実験セットアップと結果

図5(a)に実験セットアップを示す。2台のマイクロコムを用意し、それぞれを独立のTWDIを安定化する。コムモード間の位相雑音を低減化後、2台のマイクロコムの出力を一部取り出し、それらから任意波形整形器によってコムモードを2本ずつ、合計4本抽出する。それらをUTC-PDに照射し、2つのTHzを発生する。発生したTHzは2つのレンズでコリメート、集光し、SBDに照射する。SBD上での2乗検波によってマイクロ波が発生し、そのマイクロ波の位相雑音測定を行う。

図5(b)に2台のマイクロコムから発生した2つのTHz波から周波数下方変換したマイクロ波の位相雑音を示す。今回 f_{rep1} と f_{rep2} は約 560 GHz であるので、発生する THz の周波数も約 560 GHz になる。また周波数下方変換されたマイクロ波の周波数は 1.26 GHz であった。コムモード雑音を低減していない場合に比べ、40 dB 以上位相雑音を低減できた。得られた位相雑音は 560 GHz のキャリア周波数に対しては世界高品質である。現状、位相雑音の低減化の限界は TWDI の測定感度で制限されていると考えられ、今後、測定感度の限界の追求と改善が必要である。

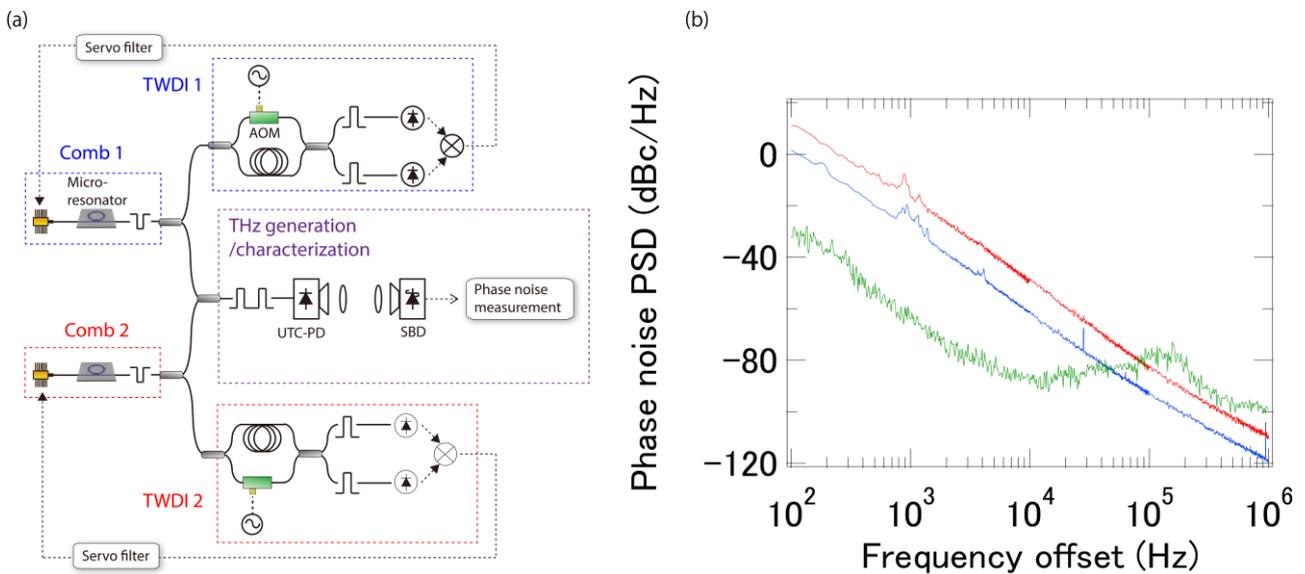


図5. (a) 低位相雑音 THz 発生と測定のためのセットアップ. (b) 低位相雑音化した THz の位相雑音 (緑線). (赤線と青線) 安定化していないマイクロコムの位相雑音

【参考文献】

- [1] S. A. Diddams, K. Vahala, and T. Udem, “Optical frequency combs: Coherently uniting the electromagnetic spectrum,” *Science* 369, eaay3676 (2020).
- [2] X. Xie, R. Bouchand, D. Nicolodi, M. Giunta, W. Hänsel, M. Lezius, A. Joshi, S. Datta, C. Alexandre, M. Lours, P. A. Tremblin, G. Santarelli, and Y. L. Coq, “Photonic microwave signals with zeptosecond-level absolute timing noise,” *Nat. Photonics* 11, 44–47 (2017).
- [3] T. Herr, V. Brasch, J. D. Jost, C. Y. Wang, N. M. Kondratiev, M. L. Gorodetsky, and T. J. Kippenberg, “Temporal solitons in optical microresonators,” *Nat. Photonics* 8, 145–152 (2014).
- [4] T. J. Kippenberg, A. L. Gaeta, M. Lipson, and M. L. Gorodetsky, “Dissipative Kerr solitons in optical microresonators,” *Science* 361, eaan8083 (2018).
- [5] X. Sun, R. Luo, X.-C. Zhang, and Q. Lin, “Squeezing the fundamental temperature fluctuations of a high-Q microresonator,” *Phys. Rev. A* 95, 023822 (2017).
- [6] G. Huang, E. Lucas, J. Liu, A. S. Raja, G. Lihachev, M. L. Gorodetsky, N. J. Engelsen, and T. J. Kippenberg, “Thermorefractive noise in silicon–nitride microresonators,” *Phys. Rev. A* 99(6), 061801 (2019).
- [7] T. E. Drake, J. R. Stone, T. C. Briles, and S. B. Papp, “Thermal decoherence and laser cooling of kerr microresonator solitons,” *Nat. Photonics* 14, 480–485 (2020).
- [8] N. Kuse, T. C. Briles, S. B. Papp, and M. E. Fermann, “Control of Kerr-microresonator optical frequency comb by a dual-parallel Mach-Zehnder interferometer,” *Opt. Express* 27, 3873–3883 (2019).

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Thermal control of a Kerr microresonator soliton comb via an optical sideband	Optics Letters	January, 2022
Amplification and phase noise transfer of a Kerr microresonator soliton comb for low phase noise THz generation with a high signal-to-noise ratio	Optics Express	January, 2022
Thermal control of a Kerr microresonator soliton comb via an optical sideband	International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies ISNTT 2021	Dec. 2021
Low noise 560 GHz generation from a fiber-teferenced Kerr microresonator soliton comb	CLEO 2022	May. 2022
Thermal control of Kerr microresonator soliton comb via an optical sideband	CLEO 2022	May. 2022
Injection locking of two CW lasers via a Kerr microresonator soliton comb for low noise THz generation	CLEO 2022	May. 2022
マイクロソリトンコムの光サイドバンドによる熱冷却	第82回応用物理学学会秋季学術講演会	2021年9月