

(様式 10)

ホームページ公開用

(海外特別研究員事業)

平成 31 年 4 月 7 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人 日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 29 年度

受付番号 249

氏名 遠藤 護

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： コロラド大学 （国名： アメリカ合衆国 ）
2. 研究課題名（和文）
アト秒精度に制御された光周波数コムの開発とデュアルコム・ポンププローブ分光
3. 派遣期間：平成 29 年 4 月 1 日 ～ 平成 31 年 3 月 11 日
4. 受入機関名及び部局名
コロラド大学 物理学専攻

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10－別紙 1～4 に記入の上、併せて提出すること。

本派遣期間中には主に、①モノリシックモード同期レーザーを元に超低位相雑音の光周波数コムを開発した。また、その応用として②高感度位相雑音測定手法と、③低雑音マイクロ波の発生手法を開発した。更に、④低位相雑音光周波数コムを作る際に欠かすことができない狭線幅レーザーを作る際に課題であったレーザーの制御帯域を、簡単な方法で 10 倍以上に拡張する手法を考案した。残念なことに、当初の研究計画で予定していたポンププローブ法に関しては、モノリシックモード同期レーザーの納品が遅れたことなどから実現できなかったが、超低位相雑音レーザーを活かした新しい応用を遂行することができた。これらの成果は査読付き論文 3 報と学会口頭発表 4 件で発表済みであり、追加の論文や学会発表も準備中である。下記ではそれぞれの概要と成果発表などの状況を述べる。

① モノリシックモード同期レーザーを元にした超低位相雑音光周波数コムの開発

光周波数コムとは、フェムト秒モード同期レーザーの光周波数（例えば、ある縦モードの光周波数や、オフセット周波数）を制御した光源で[1]、光格子時計をはじめとする計量標準分野のみならず、様々な応用に用いられている。特に、計量標準応用では、位相雑音の極めて小さい光周波数コムが必要となる。光周波数コムのもととなるモード同期レーザーには、チタンサファイヤレーザーなどの固体レーザー、ファイバーレーザー、半導体レーザーなどが使われるが、位相雑音の面ではレーザー共振器のロスや分散を抑えることのできる固体レーザーが優れている。しかし、一般的な固体レーザーではミラマウントを始めとしたフリースペースの光学系が必要であるため、定期的なアライメントが必要であり、長期的な安定性、堅牢性に欠けるといった課題があった。そこで、派遣先の研究室では、共振器全体をフッ化カルシウム結晶で作成し、その内部を光が通るモノリシック構造としたレーザーを開発していた[2]。モノリシック構造のため機械的安定度は非常に高く、一般的なフリースペースレーザーで見られるような振動の影響は受けない。特に、様々な応用で問題となる、可聴領域 (100~10 kHz) の雑音は、一般的な固体レーザーと比較して圧倒的に小さい。また、共振器の Q 値も高いため、ファイバーレーザーと比べて位相雑音は数桁低いというメリットを持つ。したがって、低雑音光周波数コムに適しているが、課題として、レーザーの繰り返し周波数制御が困難であるという点が挙げられる。つまり、可動部分のないモノリシック構造であるがために、ピエゾ素子などで共振器長を制御することが難しい。さらに、繰り返し周波数が 1 GHz と比較的高いために、オフセット周波数検出のための $f-2f$ 干渉計に必要なオクターブ光を生成することが難しい。以下では上記の二点について、具体的にどのように解決したかを説明する。

1. ピエゾによる繰り返し周波数安定化

モノリシックレーザーの繰り返し周波数を制御するために、ピエゾ素子をフッ化カルシウム共振器に貼り付け、制御信号によってフッ化カルシウムを歪ませる必要がある。しかし、ここで問題となるのはレーザー共振器や、それを取り付けてある金属製マウントの機械共振である。こうした共振の周波数は数百 Hz から数十 kHz の可聴周波数領域に集中しており、特にフッ化カルシウムは Q 値が高いため、鋭い共振ピークが多数存在してしまう。こうした共振周波数では、位相の遅れが非常に大きくなり、フィードバック制御の帯域を制限する。これらのピークを抑制するためには、ピエゾによって発生させた音響波を効率的にダンピングさせることが重要である。私たちは、ピエゾを貼り付けたフッ化カルシウム共振器を、銅製のマウントに貼り付け、さらにその銅製マウントの内部に鉛を溶かし込んだ。鉛は防音材として優れているため[3]、ピエゾで発生した音響波を抑え込み、40 kHz 程度まで共振のピークや位相遅れの少ない素直な周波数特性を得ることに成功した。ここで、制御帯域に関して一点コメントをしたい。高精度な光周波数コムには、100 kHz~MHz 程度のフィードバック帯域が必要であることが多い。これは、特にファイバーレーザーの場合、モード同期レーザー自体の雑音が大きいため、高周波数帯の雑音まで抑制する必要があるためである。対して我々の用いたモノリシックレーザーでは、フリーランでの雑音が小さいため、そこまで広いフィードバック制御は必要ない。

2. 窒化ケイ素導波路を用いたスペクトル広帯域化

オフセット周波数の検出には、一般的にフォトニッククリスタルファイバーや高非線形ファイバーによって出力スペクトルをオクターブ以上に広帯域化し、非線形光学結晶を用いた f - $2f$ 干渉計により行う。このとき、フォトニッククリスタルファイバーでオクターブ以上のスペクトルを得て、信号対ノイズ比 (SNR) の高いオフセット周波数信号を得るためには、約 1 nJ のパルスエネルギーが必要とされている。つまり、繰り返し周波数 1 GHz のモノリシックレーザーでは 1 W 以上の平均パワーが必要となる。こうしたパワーを得ること自体は、ファイバー増幅器を用いることで比較的容易に実現できるが、増幅過程における SNR 悪化が問題となる。したがって、できるだけ増幅することなくオクターブ光を発生させるために、非線形光学係数が高い、窒化ケイ素導波路の研究が進められている[4]。窒化ケイ素導波路では 100 pJ 以下のパルスエネルギーでも比較的 SNR の高い信号が得られており、魅力的である。私達は、モノリシックレーザーと、NIST のグループから提供された窒化ケイ素導波路、さらに単純なファイバー増幅器を用いることで、300 pJ 以下のパルスエネルギーでオクターブ光を発生させ、約 65 dB (分解能 100 kHz) という非常に高い SNR の信号を得ることができた。この SNR の値は、オフセット周波数の SNR としては現時点で世界最高である。オフセット周波数の制御自体は、窒化ケイ素導波路を用いないセットアップにより、積算した位相雑音の値を 20 mrad (一般的に、この値が数百 mrad 以下であれば、低雑音光周波数コムと呼ばれる) 以下に抑えることにすでに成功している。つまり同様の制御回路によってオフセット周波数を極めて高精度に安定化させることができると考える。

主に、上記二点の研究を行い、現在はこの内容についての論文を投稿準備中である。

② マイクロ波位相雑音の超高感度測定法の提案・実証

周波数が GHz から数十 GHz の電磁波であるマイクロ波は、航空管制用や車載などのレーダーや、超長基線電波干渉法を始めとする計量標準分野で使用される測定器の局部発振器として非常に重要である。特に、これらの応用では低位相雑音特性が求められ、広く研究が行われている。現時点で最も低位相雑音のマイクロ波が得られる手法は光周波数コムと高線形フォトダイオードを用いる手法 (Optical Frequency Division: OFD) であり、その位相雑音は X バンド (8-12 GHz) において -170 dBc/Hz 以下という値を記録している[5]。これは電氣的な発振器の位相雑音に比べて 40 dB 程度低い値である。こうした超低位相雑音の発振器を開発する際には、位相雑音を測定することが不可欠であるが、それは非常に困難である。その理由として、比較対象となる発振器が必要であるということに加え、測定系の雑音や感度が不足し、長時間の積算が必要という点が挙げられる。例えば上記の論文では 3 台の独立した超低雑音マイクロ波発振器を用意し、約 1 日かけて積算することで位相雑音の値を求めている。これでは、例えば OFD の設定を変えながら位相雑音を最適化することが困難になる。そこで私達は、マイクロ波のゼロクロス点を、フェムト秒レーザーによって直接光サンプリングすることで位相雑音を測定する手法を開発した。この手法は、マイクロ波ミキサを使用した従来手法に比べて 100 倍程度高い感度を持つ。これを用い、500 MHz フェムト秒レーザーを用いた OFD により発生させた 1 GHz マイクロ波の位相雑音を測定した。その結果、商用の位相雑音測定器よりも 40 dB 程度低い位相雑音 (-177 dBc/Hz) を 30 分程度で測定することができた。この結果は Scientific Reports 誌に掲載されたほか[6]、CLEO:2018 と応用物理学会 (2018 年 3 月) において口頭発表を行った。また、この応用物理学会の発表において第 44 回応用物理学会講演奨励賞も受賞した。

③ フリーランニングレーザーによる低位相雑音マイクロ波発生

上記で、現在最も低位相雑音が得られるマイクロ波発生手法は OFD であると述べた。しかし、OFD の課題は光周波数コムを用意する必要がある、という点である。メンテナンス性や長期安定性の良さから、モード同期レーザーとしてファイバーレーザーが使用されることが多いが、位相雑音が多いため、広帯域なフィードバック制御や、参照となる光周波数標準が必要となる (マイクロ波発生応用の場合、搬送波から 1 k~100 kHz 離れた部分の雑音が特に重要である)。特に光周波数標準は、真空チャンバー内で温度を安定化した高フィネス共振器が使われ

ることが多く、手軽に持ち運べるものではない。そこで我々は、フリーランでも十分に低い位相雑音を持つモノリシックレーザーを用いて、一切の周波数安定化をすることなく、最先端の OFD (光周波数を完全に位相同期した光周波数コムを使用したもの) に迫る位相雑音を実現した。この実験では特に以下の 2 点に注力したので、それぞれ説明する。

1. モノリシックレーザーの強度雑音 (RIN) の抑制

一般にモード同期レーザーでは、位相雑音の一部は RIN 由来であることが多い。詳細は我々の発表した論文を参考にされたい[7]。簡単に言えば、非線形屈折率の影響により、レーザーの実効的な共振器長はレーザーの内部パワーに依存する。つまり、レーザーのパワーが揺らぐと共振器長も揺らぐことになり、結果として位相雑音が増加する。また、モード同期を実現するために共振器に導入されている半導体可飽和吸収体 (SESAM) の影響で、レーザーパワーによってパルス波形が非対称に変化することで、パルスの重心位置が変動し、位相雑音の増加につながる。こうした効果はモード同期レーザーの位相雑音を制限しているのだが、RIN 由来の位相雑音を抑制するには、単に RIN を安定化すればよい。これは光周波数の安定化 (f-2f 干渉計によるオフセット周波数制御や、光共振器を用いた縦モードの光周波数制御) に比べれば遥かに容易である。実際、我々の実験では、RIN 制御を市販の InGaAs フォトダイオードと、オペアンプ数個からなるループフィルタによって行っており、位相雑音を簡単に 10 dB 以上抑制することに成功した。

2. モノリシックレーザーの光パルスを電気信号に変換するフォトダイオード

位相雑音の低いマイクロ波を OFD によって発生させるためには、雑音の少ないモード同期レーザーを使用するだけでは不十分である。ある程度のパワーを持つマイクロ波 (0 dBm 以上) が必要なとき、マイクロ波の増幅器を使用すると、その増幅器によって位相雑音は制限されてしまう。したがって、ハイパワーの光パルスを入射しても飽和しないようなフォトダイオードを用いて、直接マイクロ波を発生させることが重要である。しかし、一般的な PIN 型フォトダイオードは数 mW の入射光で飽和してしまうため、ハイパワーの光を入射すると波形が歪み位相雑音は増加する。また、別の効果として、フォトダイオードの PN 接合点で発生するフリッカー雑音は -120 dBc/Hz (オフセット周波数 1 Hz) 程度であることが知られており、これがマイクロ波の位相雑音を制限することもある。近年では、移動度の高い電子のみをキャリアとして利用し、帯域や飽和パワーを向上させた Uni-traveling carrier photodiode (UTC) や、その改良品である MUTC の開発が進んでおり、飽和光強度が数百 mW のものも存在する[8]。また、MUTC はフリッカー雑音も低いことが知られており、一般的な PIN フォトダイオードに比べてフリッカー雑音は 10 から 20 dB 低い[5]。この MUTC を最適な条件で使用するためには、入射パワーや光電流、バイアス電圧などのパラメータを最適化する必要がある。我々は、複数の MUTC に対して、それぞれの特性を測定し、最適な条件を求めることができた。

主に上記の二点について詳細な実験を行い、最終的に位相雑音が約 -165 dBc/Hz (オフセット周波数 10 kHz) の 8 GHz マイクロ波を発生させることに成功した。この位相雑音の値は、最先端の OFD によるものと比較して 10 dB 程度高いが、圧倒的に簡素なセットアップで実現できるため、持ち運びや扱いも容易である。この内容は 2019 年 5 月にアメリカ合衆国サンノゼで開催される CLEO:2019 において発表することが決定しており、論文も投稿準備中である。

⑤狭線幅レーザー

光周波数コムを完全に安定化するためには、オフセット周波数を位相同期することに加え、コムの縦モードの一つを安定な光共振器にロックすることが必要である。後者のロックを行う際は、SNR の問題から、CW レーザーを Pound-Drever-Hall 法 (PDH 法) によって予め共振器にロックしておき、その CW レーザーに光周波数コムの縦モードをロックするのが一般的である。つまり、CW レーザーの安定化が不十分であると、コムの雑音も増加してしまうことになる。高精度なロックをするためには CW レーザー内部に組み込まれたピエゾ素子や、励起レーザーへの電流フィードバック制御で行うことが多い。また、共振器の外部に音響光学素子 (AOM) を追加し、それにフィードバック信号を送ることもある。しかし、前者のような共振器

内部に変調素子を組み込む手法では、ピエゾの場合その制御帯域は数十 kHz に制限され、電流フィードバックの場合も MHz 程度が限界である。さらに市販品の CW レーザーを使用している場合は、改良することは不可能に近い。また共振器外部に AOM などを追加する手法では、AOM 追加による光学系の複雑化や消費電力の増大、また出力パワーの減少といった課題がある。そこで、我々は PDH 法に元から使用されている電気光学変調素子 (EOM) を、フィードバック制御用としても共用することで、追加部品をほとんど必要とすることなく、ピエゾ素子単体では 10 kHz 程度であった制御帯域を数 MHz に拡張する手法を考案・実証した。この手法で必要となるのは、制御用のループフィルタや EOM ドライバ、そしてフィードバック信号を EOM に合波するためのデュプレクサのみである。これらは簡単な電子回路であり、合わせて 1 万円以下で収めることができ、セットアップの変更もほとんど必要ない。私達は市販の CW ファイバーレーザー(波長 1550 nm、Koheras BASIK MIKRO, NKT Photonics)と、高フィネス共振器(フィネス 400,000、Stable Laser Systems)を用いてこの手法を実装し、百倍近い制御帯域を実現できた。この手法は、新たに制御帯域の高い CW レーザーや AOM を購入することなく、簡便に残留位相雑音を抑制し、狭線幅レーザーを作ることができるという優れた手法である。この成果は、応用物理学会で口頭発表と学術誌 OSA Continuum において発表した[9]。

参考文献

1. S. T. Cundiff, and J. Ye, "Colloquium: Femtosecond optical frequency combs," Rev. Mod. Phys. **75**, 325 (2003).
2. T. D. Shoji, W. Xie, K. L. Silverman, A. Feldman, T. Harvey, R. P. Mirin, and T. R. Schibli, "Ultra-low-noise monolithic mode-locked solid-state laser," Optica **3**, 995–998 (2016).
3. T. C. Briles, D. C. Yost, A. Cingöz, J. Ye, and T. R. Schibli, "Simple piezoelectric-actuated mirror with 180 kHz servo bandwidth," Opt. Express **18**, 9739–9747 (2010).
4. A. R. Johnson, A. S. Mayer, A. Klenner, K. Luke, E. S. Lamb, M. R. E. Lamont, C. Joshi, Y. Okawachi, F. W. Wise, M. Lipson, U. Keller, and A. L. Gaeta, "Octave-spanning coherent supercontinuum generation in a silicon nitride waveguide," Optics Letters **40**, 5117–5120 (2015).
5. 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, R. Holzwarth, and Y. Le Coq, "Photonic microwave signals with zeptosecond-level absolute timing noise," Nature Photon **11**, 44–47 (2017).
6. M. Endo, T. D. Shoji, and T. R. Schibli, "High-sensitivity optical to microwave comparison with dual-output Mach-Zehnder modulators," Sci. Rep. **8**, 1–6 (2018).
7. M. Endo, T. D. Shoji, and T. R. Schibli, "Ultralow Noise Optical Frequency Combs," IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. **24**, 1–13 (2018).
8. A. Beling, X. Xie, and J. C. Campbell, "High-power, high-linearity photodiodes," Optica **3**, 328–338 (2016).
9. M. Endo, and T. R. Schibli, "Residual phase noise suppression for Pound-Drever-Hall cavity stabilization with an electro-optic modulator," OSA Continuum **1** (2018).