Optical frequency comb based on mode-locked solid-state laser towards frequency synthesizer ranging from RF to optical frequency



杉山 和彦 (Kazuhiko SUGIYAMA, Ph. D.)
京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻 准教授
(Associate Professor, Kyoto University, Graduate School of Electronic Science and Engineering)
日本物理学会 応用物理学会 日本光学会 The Optical Society of America
受賞: 文部科学大臣賞 研究功績者 (2003 年).
研究専門分野:量子エレクトロニクス

あらまし

原子の遷移に周波数を安定化されたレーザーで、周 波数の不確かさが小さいものは光時計とよばれ、不確 かさが 10-18 に達するものも報告されてきた。この値 は、現在の周波数標準よりも2桁以上優れている。光 領域の基準周波数は、光周波数コム(光コム)を用い て、高周波~マイクロ波周波数に正確に分周すること ができ、電気的に利用することができる。このために は、低雑音かつ長時間連続動作可能な光コムが必要で ある。われわれは、そのような光コムの実現を目指し て、半導体レーザー励起モード同期固体レーザーを用 いた光コムの研究をおこなっている。本研究では、レ ーザー媒質として Yb:KYW を用いた光コムの、線幅狭 窄化した周波数安定化レーザーへの位相同期を実現し た。位相同期には、モード周波数とキャリア・エンベ ロープオフセット周波数 (fceo)の位相同期が必要で ある。前者は、ピエゾ素子を用いてレーザー共振器長 を制御して実現した。その際、鉛を詰めたマウントで 機械的振動を減衰させて、ピエゾ素子としては最速ク ラスの応答を実現した。後者については、Yb:KYW 結 晶の位置を制御して fceo の遅い変動を補償し、位相同 期の長時間連続動作を改良した。結果として、光コム をレーザーに対して3時間にわたり位相同期させるこ とに成功した。光時計実現に向けた我々の研究状況に ついても将来展望で簡単に触れる。

1.研究の目的

レーザーのモード同期は、超短パルス光を発生させ る方法として用いられていて、出力光は周期的な光パ ルス列となる。その出力光を周波数軸でみた姿は、周 期的光パルスをフーリエ変換したもので、等しい周波 数だけ離れた多数のレーザー光の集合体となっている。 その形状から、この光は光周波数コム(以下、光コム) とよばれる。光コムを利用してレーザー周波数を直接 測定する技術が 2000 年に実現されて以降[1]、光コム は光周波数をあつかううえで、必要不可欠な技術とな った。ほどなくレーザー光に位相同期された光コムも 実現されて[2]、周波数安定化されたレーザー光から安 定な高周波 (radiofrequency: RF) ~マイクロ波周波数 を発生させることも現実的となった。イオンを含む原 子・分子の遷移周波数に発振周波数を安定化されたレ ーザーの中で不確かさの小さいものは、光周波数標準、 あるいは光領域の原子時計という意味で光時計とよば れる。その周波数の不確かさは10-18にも達するものも 報告されてきた[3]。現在の単位"秒"の定義にもなっ ているセシウム原子のマイクロ波領域の遷移を基準と する周波数標準の不確かさは、最良で10-16台である。 光コムそのものの不確かさは 10⁻¹⁹ 台よりも小さいこ とが検証されている[4]。したがって、光コムを用いて 光時計の不確かさをもつ基準 RF~マイクロ波を発生 させることで、現在よりも不確かさの小さい基準周波 数を実用に供することが原理的に可能である。

このような光コムには、長時間連続した位相同期動 作と、光時計の性能を損ねることのない低雑音特性が 必要である。初期の光コムの研究で用いられたチタニ ウム・サファイア(Ti:Sapphire)レーザーは、低雑音 特性は優れているが、大きな出力の励起レーザーを必 要とし、ランニングコストとレーザー媒質の放熱の必 要性から長時間連続動作は容易とはいえない。その後 ファイバーレーザーを用いた光コムが登場した[5]。半 導体レーザー(laser diode: LD)励起でレーザー共振 器もコンパクトにまとめられるので、長時間連続動作 に向いている。開発当初は雑音が大きかったものの、 様々な技術が開発されて、現在では低雑音の光コムが 実現されている[6]。

このような状況の中で、我々のグループでは LD 励

Optical frequency comb based on mode-locked solid-state laser towards frequency synthesizer ranging from RF to optical frequency

起固体レーザーによる光コムの実現を目指している。 Ti:Sapphire レーザーの低雑音特性とファイバーレー ザーの長時間連続動作の両方をあわせもつ光コムの実 現を狙いとした。これまでに、イッテルビウム(Yb) を添加した KY(WO4)2(Yb:KYW)結晶をレーザー媒 質として光コムの実現に成功した[7]。本研究では、 Yb:KYW レーザー光コムの安定化レーザーへの位相 同期、ならびに長時間動作を主な目標として研究をお こなった。並行して、光コムを位相同期させる光時計 の実現を目指した研究を進めた。

2. 研究の背景

光コムの n 次モードの周波数 f(n)は、f(n) = n frep + fcEo であらわされる。ここで、frep はパルス繰り返し 周波数、fcEo はキャリア・エンベロープオフセット周 波数である。後者は、レーザー共振器内を伝播するパ ルス光の群速度と位相速度の差に起因するもので、時 間軸で見ると、パルス電場の包絡線のピークと位相の ピークがパルスごとにずれていく現象にあたる。周波 数軸で見ると、モードを周波数ゼロまで外挿した時に、 ゼロからの余りとして残る周波数である。モード同期 レーザーの frep は通常 100 MHz 程度であるが、1 GHz を超えるものも開発されている。

レーザー周波数 f. とコムの n 次モードとのビート を f.eat とすると、f.=nfrep+fcEO+f.eat となる。(ビ ートは負側にも発生するが、ここでは省略している。) ここで、frep と fcEO を基準 RF に位相同期させて f.eat を測定すると、基準 RF の不確かさでレーザー周波数 f.を測定することができる。一方、fcEO は基準 RF に 位相同期させた状態で、f.eat を基準 RF に位相同期す ると、光コムの各モード周波数がレーザー周波数に位 相同期されるとともに、レーザーの安定度をもった RF が frep から得られる (図 1 参照)。



図 1 光コムのレーザーへの位相同期と光周波 数比較。赤字が本研究で導入された。

光コムをレーザー光に位相同期させるには、光コム のモードを高速で制御する必要がある。ファイバーレ ーザー光コムでは、電気光学変調器をレーザー共振器 内に組み込む方法が用いられている。しかし、電気光 学変調器はLiNbO3などの光学結晶を用いるため、光 損傷やレーザー共振器の分散制御に注意を払う必要が ある。一方、レーザー共振器の共振器長をミラーの位 置を介して高速で制御できれば、光損傷や分散制御へ の対応は不要となる。ミラーの位置の制御にはピエゾ 素子 (piezoelectric transducer: PZT) が用いられる。 通常の使用方法では PZT の機械的共振により自己共 振周波数よりはるかに低い周波数までしか応答させる ことができない。しかし近年、PZT を高速で使用する 方法が報告されてきた。本研究では、その方法の一つ、 鉛を充填したマウントにより機械的共振を減衰させる 方法[8]を用いて、ミラーの位置を高速で制御可能とし た。

長時間連続動作に関して、Yb:KYW レーザーは、励 起波長 981 nm に対して発振波長が約 1030 nm と差 が小さく、レーザー発振時の発熱が小さいと期待され る。また、波長 981 nm は、光通信用ファイバーアン プの励起波長に近いため、信頼性の高い LD が比較的 安価に入手でき、ランニングコストも小さくてすむ。 実際に我々が開発した光コムでは、温度調節の放熱側

Optical frequency comb based on mode-locked solid-state laser towards frequency synthesizer ranging from RF to optical frequency

が自然空冷で十分であり[7]、水冷装置が必要な Ti:Sapphire レーザーと比べて放熱設計が容易である。 問題は、fceoの位相同期の継続時間であった。fceoの 位相同期は、通常は励起レーザーパワーにより fceo が 変化する現象を利用して行われる。Yb:KYW レーザー の励起レーザーパワーによる fceo の応答周波数は 45 kHz と、Ti:Sapphire レーザーに比べてかなり遅い[9]。 これは、fcEOのスペクトル幅をおよそ 45 kHz 以下に 抑えなければ、位相同期ができないことを意味する。 一方、[7]では、励起レーザーのパワーによって、fceo の値だけではなくスペクトル幅も変化することを確認 した。位相同期中に長時間での遅い変動(ドリフトと よぶ)を励起レーザーパワーで補償していくと次第に 動作点が変わり、やがてスペクトル幅が 45 kHz を超 えてしまう。長時間 fcEoの位相同期を継続するために、 本研究では、fceoのスペクトル幅に対してより鈍感な、 Yb:KYW の結晶位置の制御[7]を fceo のドリフト補償 のために導入した。

以上の結果を中心に次章では述べる。詳細は[10]に 報告している。

3. 研究の方法

3.1 実験装置

研究に用いた LD 励起モード同期 Yb:KYW レーザ ー光コムは、当研究室において開発したものである[7]。 その性能等、概略を示す。モード同期は、ソフトアパ ーチャー型のカーレンズモード同期による。Yb³⁺レー ザーのモード同期でよく用いられている過飽和吸収鏡 は利用せず、モード同期のために特別な素子は利用し ていない。ソフトアパーチャー型カーレンズモード同 期は、Ti:Sapphire レーザーでよく用いられているが、 レーザー共振器の安定領域の端でモード同期を実現し ている。開発したレーザーはそれとは異なり、横モー ド縮退点による不安定性を利用してモード同期を実現 した。この点が安定領域の中央付近にあるため、励起 光パワー750 mW に対してモード同期出力パワー350 mWと、高い効率でモード同期発振が得られる。中心 波長、スペクトル幅、パルス幅、および frep は、それ ぞれ 1030 nm、8.0 nm、160 fs、および 91 MHz であ る。レーザー共振器を固定した基板を温度制御し、共

振器全体をアルミ製の箱で密閉していて、再アライメ ントすることなく1か月以上、モード同期発振を維持 できる。

出力光は、フォトニック結晶ファイバーを通して、 スペクトル幅1オクターブに拡大している。光コムの スペクトル幅を1オクターブ以上に広げることは、 fcEoを検出するために有用である。幅1オクターブの 光コムの長波長端の第2高調波は、基本波の短波長端 と重なる。第2高調波ではfcEoも2倍になるので、重 なった波長帯では、第2高調波と基本波のモード周波 数はfcEoだけずれている。このずれをビート周波数と してfcEoを検出する。この構成をf-2f干渉計という。 検出したfcEoを基準 RFに位相同期させる。本研究で は励起レーザーパワーの制御により位相同期を行うと ともに、ドリフトの補償のためYb:KYW 結晶の位置の 制御を導入した。結晶マウント全体を、PZT で位置を 制御できる直進ステージに設置した。

光コムのモード周波数をレーザーに位相同期させる ために、上述した高速で動作する PZT 制御ミラーを導 入した。銅をくりぬいて鉛を詰めたマウントに PZT と ミラーを順に接着したものである。形状等は[8]を参照 されたい。

光コムを位相同期させる基準レーザーは、低熱膨張 率ガラス製の高フィネス光共振器の共鳴に対して線幅 狭窄化された、外部共振器型半導体レーザー (extended-cavity laser diode: ECLD) である。制御 の詳細は省略するが、1台の光共振器に、波長 871 nm と 822 nm の ECLD が線幅狭窄化されている[11]。線 幅は 500 Hz 以下である。871 nm の ECLD を、光コ ムを位相同期させる基準レーザーとして用いる。波長 822 nm の ECLD は、位相同期させた光コムとのビー ト周波数を測定し、光周波数比較の実証実験に用いる。 これら2波長の狭線幅レーザーは、Yb+ 2S_{1/2}-2D_{3/2}、 および ²S_{1/2}-²D_{5/2} 遷移を励起するために準備してい るもので、超高真空中に閉じ込めた単一 Yb+イオンの 遷移を基準とした光時計を構築するためのものである。 光時計が完成すれば、不確かさの非常に小さい基準 RF が frep から得られることになる。

Optical frequency comb based on mode-locked solid-state laser towards frequency synthesizer ranging from RF to optical frequency

3.2 結果

線幅狭窄化した波長 871nm ECLD と Yb:KYW レ ーザー光コムのモードとのビートを、RF スペクトル アナライザで検出した。測定帯域幅 300 kHz で信号対 雑音比は 35 dB であった。ビートのスペクトル幅は短 時間では 30 kHz 以下であり、光コムのモードは低雑



図 2 位相同期中に観測したレーザーと光コムのモー ドとのビートのスペクトル。検出帯域幅 100 Hz。

音で高周波成分の雑音がないことが確認された。

図2は位相同期中のビートのスペクトルである。制 御ループ内のビートなので、パワーがキャリアに集中 している。RF スペクトラムアナライザの分解能を上 げても、キャリアはアナライザの分解能の幅で観測さ れるだけである。キャリアへのパワー集中率は中心周 波数から1MHzの範囲で91%であった。誤差信号を 用いて、残留位相雑音を推定したところ0.47 rad (積 分範囲1Hzから10MHz)となった。位相雑音はπ/2 よりも十分に小さく、完全な位相同期が達成されてい ることが確認された。

結果を過去の報告と比較する。位相同期ループの発 振周波数は 200 kHz であった。図 2 にも発振周波数 が観測されている。以前に同様の高速ピエゾ制御ミラ ーを導入した Ti:Sapphire レーザー光コムでは、発振 周波数は 80 kHz であった [12]。より軽いミラーを使 用したことにより、制御帯域を拡大できた。また、残 留位相雑音は、以前にほかのグループが Yb:KYW レー ザー光コムで得た値[13]の 40 %程度に改善されてい ることが推定された。

さらに、fbeatとfcEOを 同時に位相同期すると、光コ



ムのモードがレーザー光に完全に位相同期される。こ

れまでに、最長で3時間にわたって、レーザーへの光

図 3 光コムのレーザーへの位相同期中の(a)位相同 期に用いたレーザー光と光コムのモードとのビ ート、(b)fcEO、(c)位相同期に用いたレーザーとは 別波長のレーザーと光コムのモードのビート周 波数、(d)frep。

コムの位相同期に成功した。

図3はその際に同時にトリガをかけて4つの周波数 を周波数カウンタで測定した結果である。(a)は fbeat、 すなわち位相同期に用いた基準レーザーと光コムのモ ードとのビート周波数、(b)は fcEo、(c)は波長 822nm の被測定レーザーとのビート周波数、および (d)は frep である。周波数カウンタのゲート時間は1秒である。 なお、3時間の制限は、基準レーザーか被測定レーザ ーの線幅狭窄化の制御が外れたことによるものである。 光コムの2つの位相同期ループにはまだ余裕が残って いて、さらに長時間の連続動作が可能であった。

詳しくみていくと、(a)、(b)は位相同期に用いている 位相同期ループ内のビート周波数であり、位相同期の 基準に用いた RF 周波数シンセサイザの周波数からの 偏差がほぼゼロとなっている。偏差が周波数カウンタ のゲート時間の逆数よりも大きい、すなわち、今回の 測定では1 Hz を超える場合は、位相同期ループでサ イクルスリップが発生したことを示す。3 時間での測

Optical frequency comb based on mode-locked solid-state laser towards frequency synthesizer ranging from RF to optical frequency

定中、サイクルスリップはビート周波数で 0.24%、fceo で 0.94 % であった。(c)は、2 つのレーザー光の周波数 比較の結果を示す。モード次数がわかっている場合は、 周波数比を計算することもできる。波長は異なるが、 2 つのレーザー光は同じ光共振器の共鳴に安定化され ている。この場合、光共振器の共鳴周波数が温度ドリ フトしても光コムで測定するときにキャンセルされて、 ドリフトは検出されないはずである。観測された周波 数ドリフトの原因には、レーザーを光共振器の共鳴に 線幅狭窄化する回路のオフセットドリフトか、線幅狭 窄化したレーザー光を光ファイバーで光コムまで輸送 する際に発生する周波数シフトが疑われる。(d)は基準 レーザーに完全に位相同期された RF であり、基準レ ーザーの周波数安定度がそのまま表れている。観測さ れた周波数ドリフトは、光共振器の共鳴の温度ドリフ トによる。

4. 将来展望

図 3(d)に示すように、レーザー光に完全に位相同期 された RF が frep から出力される。レーザー光が光時 計になれば、その周波数安定度と不確かさをもった RFがfrepから得られることになる。我々は光時計とし て、超高真空中に閉じ込めた単一イオンの遷移を基準 とする、単一イオン光時計の研究を行っている。これ までに単一 ¹⁷¹Yb⁺ ²S_{1/2}-²D_{3/2} 遷移のスペクトルを幅 380 Hz で検出した[11]。ドップラーシフトを抑えるた めイオンの運動エネルギーを低減させるが、この時は 温度に換算して7mK と、用いた冷却方法の限界 0.47 mK に対して不十分であった。単一イオンは、高周波 電圧を印加された電極に囲まれた空間に捕捉される。 この装置は RF トラップとよばれる。RF トラップで は、イオンがトラップ中心から離れるにしたがって高 周波電場が大きくなり、これによるイオンの振動が大 きくなる。この振動をマイクロ運動とよぶ。もし不要 な静電場が存在すると、イオンがトラップ中心から押 されるため、マイクロ運動が大きくなり、イオンが加 熱される。本研究では、補正電圧印加による不要な静 電場の打ち消しにより、マイクロ運動の最小化を進め、 図4に示すようなスペクトルを得た。スペクトルのサ イドバンドが小さくなり、冷却限界温度に近づいた

[14]。このスペクトルは、波長 822 nm のレーザー光 の第2高調波を発生させて、単一 174 Yb+ の 2 S_{1/2}- 2 D_{5/2} 遷移を分光したものである。スペクトル幅には、レー ザーのスペクトル線幅に加えて、磁場によるスペクト



図4単一¹⁷⁴Yb⁺²S_{1/2}-2D_{5/2}遷移のスペクトル

ル広がりが加わっている。

今後はレーザー光の線幅狭窄化をさらに進め、かつ 磁場に対して鈍感な ^{171}Yb +から基準スペクトルを検出 して光時計を構築する。光コムを位相同期させること で、不確かさの小さい RF を発生させることができる。 Yb+には、寿命が 10 年近くのため極めて狭い基準スペ クトルが得られる能力をもつ、 $^{2}S_{1/2}-^{2}F_{7/2}$ 遷移がある。 この遷移を基準とする単一イオン光時計では、不確か さ 3 × 10⁻¹⁸ が報告されている[15]。本研究で開発し た光コムを組み合わせることで、不確かさ 10⁻¹⁸の基準 RF を出力する、実用に供する光時計の実現をめざし たい。

また、線幅狭窄化レーザーに Ti:Sapphire レーザー 光コムを位相同期させ、狭線幅となった光コムに2つ のレーザーを位相同期させてそれらの差周波光を発生 させることにより、線幅 100 Hz の狭線幅な差周波光 を発生させることにも成功している[16]。同様のシス テムを長時間連続位相同期動作可能な LD 励起固体レ ーザー光コムで実現できれば、様々な光周波数を発生 する、光周波数シンセサイザの実現もみえてくる。

おわりに

LD 励起モード同期固体レーザーで発生させた光コ ムを、レーザー光に完全に位相同期させる技術を開発 した。3 時間にわたる位相同期の継続を確認し、長時 間連続動作の可能性を示した。モード同期固体レーザ

Optical frequency comb based on mode-locked solid-state laser towards frequency synthesizer ranging from RF to optical frequency

ーは、光コムとして低雑音である。長時間連続動作可 能な光コムとして開発が進んでいるファイバーレーザ ー光コムと同等、さらには低雑音の上位互換システム として、低雑音性の評価と改良を進めつつ、光時計の 不確かさで長時間連続動作するシステムの実現を目指 していきたい。

参考文献

- [1] S.A. Diddams, D.J. Jones, J. Ye, S.T. Cundiff, J.L. Hall, J.K. Ranka, R.S. Windeler, R. Holzwarth, T. Udem, and T.W. Hänsch, "Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb," Physical Review Letters, Vo.84, pp.5102-5105 (2000) など.
- [2] S.A. Diddams, A. Bartels, T.M. Ramond, C.W. Oates, S. Bize, E.A. Curtis, J.C. Bergquist, and L. Hollberg, "Design and control of femtosecond lasers for optical clocks and the synthesis of lownoise optical and microwave signals," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.9, pp.1072-1080 (2003).
- [3] S.M. Brewer, J.-S. Chen, E.R. Hankin, E.R. Clements, C.-W. Chou, D.J. Wineland, D.B. Hume, and D.R. Leibrandt, "²⁷Al⁺ quantum-logic clock with a systematic uncertainty below 10⁻¹⁸", Physical Review Letters, Vol.123, 033201 (2019).
- [4] L.-S. Ma, Z. Bi, A. Bartels, L. Robertsson, M. Zucco, R.S. Windeler, G. Wilpers, C. Oates, L. Hollberg, and S.A. Diddams, "Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the 10⁻¹⁹," Science, Vol.303, pp.1843-1845 (2004).
- [5] H. Inaba, Y. Daimon, F.-L. Hong, A. Onae, K. Minoshima, T.R. Schibli, H. Matsumoto, M. Hirano, T. Okuno, M. Onishi, and M. Nakazawa, "Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb," Optics Express, Vol.14, pp.5223-5231 (2006).
- [6] C. Benko, A. Ruehl, M.J. Martin, K.S.E. Eikema, M.E. Fermann, I. Hartl, and J. Ye, "Full phase

stabilization of a Yb:fiber femtosecond frequency comb via high-bandwidth transducers, Optics Letters, Vol.37, pp.2196-2198 (2012).

- [7] M. Mitaki, K. Sugiyama and M. Kitano, "Octavespanning optical frequency comb based on a laser-diode pumped Kerr-lens mode-locked Yb:KYW laser for optical frequency measurement," Applied Optics Vol.57, pp.5150-5160 (2018).
- [8] T.C. Briles, D.C. Yost, A. Cingöz, J.Ye, and T.R. Schibli, "Simple piezoelectric-actuated mirror with 180 kHz servo bandwidth," Optics Express, Vo.18, pp.9739-9746 (2010).
- [9] S.A. Meyer, J.A. Squier, and S.A. Diddams, "Diode-pumped Yb:KYW femtosecond laser frequency comb with stabilized carrier-envelope offset frequency," European Physical Journal D, Vol.48, pp.19-26 (2008).
- [10] M. Mitaki and K. Sugiyama, "Phase-locking of octave-spanning optical frequency comb based on Kerr-lens mode-locked Yb:KYW laser to reference laser," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.60, 022603 (2021).
- [11] Y. Imai, T. Nishi, M. Nishizaki, S. Kawajiri, Y. Muroki, R. Ikuta, K. Matsumoto, M. Kitano, and K. Sugiyama, "Single-ion spectroscopy system for the ²S_{1/2}(F=0) ²D_{3/2}(F=2) transition in ¹⁷¹Yb⁺," Radio Science, Vol.51, pp.1385-1395 (2016).
- [12] S. Hatanaka, K. Sugiyama, M. Mitaki, M. Misono, S.N. Slyusarev, and M. Kitano, "Phase locking of a mode-locked titanium-sapphire laserbased optical frequency comb to a reference laser using a fast piezoelectric actuator," Applied Optics, Vol.56, pp.3615-3621 (2017).
- [13] S.A. Meyer, T.M. Fortier, S. Lecomte, and S.A. Diddams, "A frequency-stabilized Yb:KYW femtosecond laser frequency comb and its application to low-phase-noise microwave generation," Applied Physics B, Vol.112, pp.565-570 (2013).

Optical frequency comb based on mode-locked solid-state laser towards frequency synthesizer ranging from RF to optical frequency

- [14] 今井, 杉山, 入江, 北野, "RFトラップに閉じ込め た単一イオンの時計遷移分光で観測されるサイド バンドの解析,"日本物理学会 2017 年秋季大会,
- [15] N. Huntemann, C. Sanner, B. Leibrandt, C. Tamm, and E. Peik, "Single-Ion Atomic Clock with 3×10⁻¹⁸ Systematic Uncertainty," }Physical Review Letters, Vol.116, 063001 (2016).
- [16] 川田, 杉山, 藤崎, 北野, "Ba+時計遷移励起に用 いる差周波光の光周波数コムを用いた線幅狭窄化," 日本物理学会 2016 年秋季大会,

関連文献

[1] 初期の光コム研究について, 拙著解説、「マイクロ 波と光周波数を結ぶ新しい周波数チェーン:モード 同期レーザーによる光周波数計測技術」,日本物理学 会誌, Vol.58, pp.175-181 (2003).

この研究は、平成27年度SCAT研究助成の対象と して採用され、平成28~30年度に実施されたもの です。