

研究課題別評価

1 研究課題名:

小型超高精度レーザー原子時計の実現

2 研究者氏名: 杉山 和彦

研究員:御園 雅俊 (研究期間 H.15.4~H.16.3)

研究員:Sergey N. Slyusarev (研究期間 H16.5~H.17.10)

3 研究のねらい:

モード同期レーザーは相対位相が決まった多数のモードで同時発振していて、時間軸上では一定の時間間隔の光パルス列を発生し、超短パルスレーザーとして広く利用されてきた。一方、周波数軸上でモード同期レーザーを見た姿は、パルス繰り返し周波数 f_{rep} だけ正確に周波数の異なった多数のレーザー光の集合体、いわゆる光周波数コム(comb = 櫛)となっている。モードの周波数間隔はスペクトル内どこでも 10^{-18} 以下で一致していることが実測されていて、光周波数の優れたマーカーとなる。モード同期レーザーによる光周波数計測技術は、1999年にドイツ・マックスプランク量子工学研究所のグループによってその有効性が実証されて以来急速に進歩し、現在では装置として市販されるまでになった。2005年にノーベル物理学賞を受賞した2人の研究者の主たる受賞理由にもなっている。

本研究の研究者はまだ初期の時代からこの技術の研究に取り組み、2001年には我国では初めて、世界でも4グループ目に光周波数計測に成功した。本研究ではこの技術をさらに進めて、原子等の共鳴周波数にその発振周波数を安定化したレーザーの周波数を、光周波数コムを使って正確に分周してマイクロ波周波数標準とする、新しい方式の原子時計を開発する。

この原子時計では基準周波数が光領域になるので、マイクロ波領域の原子の共鳴を基準とする現在の原子時計よりも周波数安定度が大きく改善される。(同じ大きさの周波数変動ならば、マイクロ波と光の周波数比だけ、相対的な周波数安定度が改善される。)また、分周の出力となるモード同期レーザーの f_{rep} は、その位相雑音が通常の発振器よりも小さい。したがって、安定化レーザーへ光分周器をロックする制御帯域よりも速い周波数領域まで含めて、どの周波数領域で評価しても現在の原子時計の安定度を上回ることができる。基準光周波数は、トラップした単一イオンの共鳴で与えることとした。単一イオンは一度生成すると極めて長時間(おそらく何ヶ月でも)保持することが可能なため、原子時計という装置を目標とする本研究には適している。

本研究では必要となるレーザーを全て半導体レーザーとすることで、低消費電力で可搬なシステムの開発を最終目標とした。現在の周波数標準は、現実には世界中にある200台あまりの商用セシウム原子時計の重み付平均で構成された時系で実現されている。GPSによる測地精度も、衛星に搭載されている原子時計、その多くは商用セシウム時計、により確保されている。レーザーのみを用いた商用の小型原子時計が実現されれば、時系や測地をはじめとして精密計測技術を高精度化することが可能になる。

4 研究成果:

本研究では(1)1オクターブ光周波数コムを用いた光分周器、(2)基準光周波数、(3)半導体レーザーによる光周波数コム、を実現させることを目標とした。(1)ではモード同期チタニウムサファイア(Ti:S)レーザーの光パルスにフォトニック結晶ファイバーを導入して確実に1オクターブ光周波数コムを発生させ、光分周器のプロトタイプを位相同期で実現させることに成功した。(2)では市販の半導体レーザーを低熱膨張率ガラス製の光共振器の共鳴に高速にロックし線幅を狭窄化した。長時間の周波数安定化と不確かさの低減をトラップした単一イットルビウムイオンの吸収線を用いて行うこととし、レーザー冷却光源の全半導体レーザー化を進め、イオントラップの動作を確認した。(3)ではDC電流を流すだけでパルス光を発する自励発振半導体レーザーのモード同期を実現した。注入同期による各モードの線幅狭窄化を行うとその影響で全体のスペクトル幅が狭くなってしまふものの、CWレーザーとのビート信号が高いSN比で得られ、光周波数コムとして充分

応用可能なものができた。自励発振半導体レーザーは DVD 読み出し用に開発された安価なもので、これで光周波数コムが実現できれば非常に面白い。各部分の詳細を以下に示す。

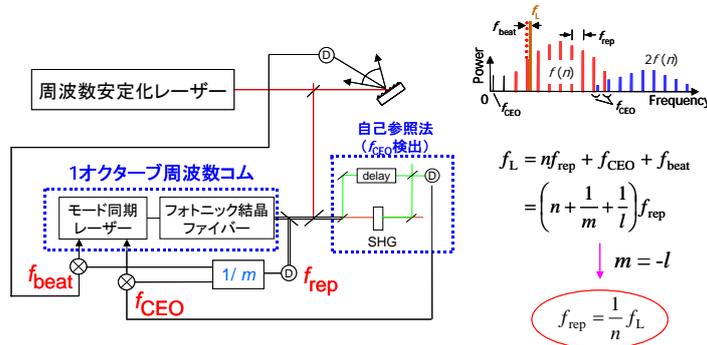


図 1 光分周器のブロックダイアグラム

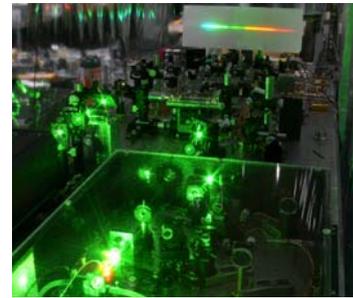
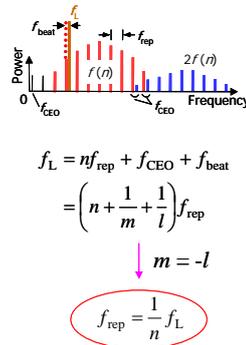


図 2 光分周器の全景

(1) 1オクターブ光周波数コムを用いた光分周器

1オクターブ光周波数コムの各モードの周波数は、 $f(n) = n f_{rep} + f_{CEO}$ と表される。ここで、 n はモード次数、 f_{rep} はパルス繰り返し周波数、また、 f_{CEO} は搬送波-包絡線オフセット周波数とよばれる。CWレーザーとコムとのビート周波数を f_{beat} とすると、レーザー周波数 f_L は $f_L = n f_{rep} + f_{CEO} + f_{beat}$ と表せる。ここで、 f_{CEO} と f_{beat} を、それぞれ f_{rep}/m 、 $-f_{rep}/m$ (m : 整数)にロックしたとすると、 $f_L = n f_{rep}$ 、すなわち、レーザー周波数を n 分周した値を f_{rep} から得ることができる。

開発した光分周器のブロックダイアグラムを図 1 に、装置全体の写真を図 2 に示す。1オクターブ光周波数コムの出力を低周波数側と高周波数側に分け、低周波数側の第 2 高調波をとり基本波の高周波数側と重ねて f_{CEO} のビート信号を検出する(自己参照法)。コムの一部を分けて、基準となる周波数安定化レーザーとのビートを検出する。検出した f_{CEO} と f_{beat} を f_{rep} の整数分の 1 に位相同期させ、1オクターブ光周波数コムを光分周器として動作させる。

モード同期TiSレーザーはプリズム対で分散を補償したもっとも伝統的なものを自作した。防音や結晶の冷却など改良を進め、出力 400 mW、スペクトル幅 50nmと、モード同期動作の安定性を含めて市販のものと同色のないものが得られた。フォトニック結晶ファイバーは試行錯誤の結果、コア径 2.2 μ m、及び、長さ 16cmと決定した。電圧制御発振器(VCO)の出力を 4 通倍して f_{rep} に位相同期させ、 $f_{rep}/4$ を準備し、 f_{CEO} と f_{beat} の位相同期に用いた。光周波数コムの f_{rep} の方がスペクトル純度が高いので、位相同期によってVCOの線幅が狭窄化され、制御時のVCOのスペクトルが f_{rep} と等しいことも確認された。自己参照法により検出した f_{CEO} のビート信号を、音響光学変調器でポンプ光のパワーを制御して位相同期を行った。制御帯域幅 400 kHzが得られ、これは論文で公表されている諸外国の例よりも 1 桁広い。また、位相同期はサイクルスリップなく強固にかかることを確認した。

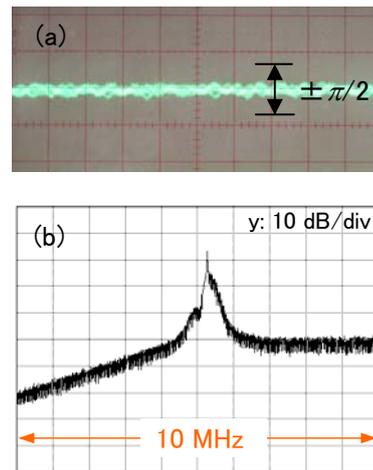


図 3 安定化レーザーへの光周波数コムの位相同期。
(a) 誤差信号、(b) ビート信号

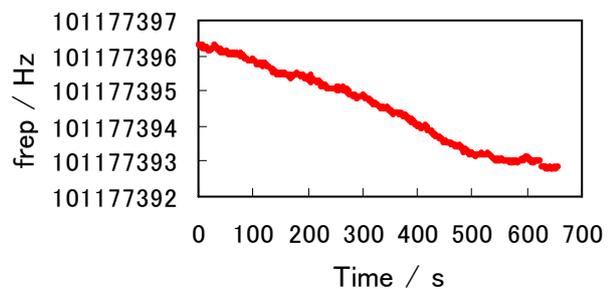


図 4 光分周器の連続動作

周波数安定化レーザーへの光周波数コムモードの位相同期は、応答速度は速いが伸びの小さいピエゾ素子と、応答速度は遅いが大きく伸びるものを併用してレーザーの共振器長を制御し実現した。2種類用いた理由は、長時間の変動を補償し、かつ、制御帯域幅をできるだけ広くするためである。この制御ループは光分周器の性能に直結するため、まず VCO をビート信号にロックする、いわゆるトラッキング発振器でビート信号の SN 比を改善した。また、トラッキング発振器の出力周波数を 32 分周して原周波数に換算して $\pm 16\pi$ までロックできるようにした。図 3 に実験結果を示す。誤差信号は充分 $\pm \pi/2$ 以内に収まっている。また、ビート信号の中央に観測された 10 dB ほどの鋭いスパイクは、位相同期が達成されてパワーが集中したことを示す。

最終的に f_{beat} と f_{CEO} を $f_{\text{rep}}/4$ に位相同期し光分周を達成した場合に、 f_{rep} を周波数カウンタで測定した結果を図 4 に示す。10 分程度の連続動作に成功した。観測された周波数変動は、周波数安定化レーザーがロックされている共振器の温度変動によるものと推定する。

(2) 基準光周波数

特別に無反射コーティングを施した半導体レーザーを利用することなく、3 段階の線幅狭窄化を行うことによって、キャリアへのパワー集中度の高い狭線幅レーザーを実現した。チップ単体では数 10 MHz に広がっている発振線幅を、まず、回折光子による光帰還により 1 MHz 程度まで、続いて低フィネス共振器へ高速制御し 10 kHz まで狭窄化した。光帰還後の線幅 1 MHz よりも充分広い 2 MHz の制御帯域を実現できたため、キャリアへの高いパワー集中度 40 dBc が得られた。そして、低熱膨張率ガラス ULE で製作された高フィネス共振器の共鳴へ安定化し、最終的な線幅と周波数安定度を得た。図 5 に高フィネス光共振器へ安定化した場合の誤差信号のスペクトルを示す。レーザー外部に置いた音響光学変調器を周波数シフタとして用い、制御帯域幅 170 kHz を得た。

不確かさの小さな基準周波数を与える単一イオンは、一価のイッテルビウムイオン (Yb^+) を用いることとした。磁場による周波数シフトが小さい奇数同位体 171 の核スピンの $1/2$ と準位構造が比較的単純で、かつ全ての光源を半導体レーザーで実現できる。緩衝気体を導入して Yb^+ のトラッ

プを確認した。レーザー冷却光源の半導体レーザー化のために、2 台の半導体レーザーの和周波混合を両波長ともに共鳴する光共振器内で行う装置で $60 \mu\text{W}$ の出力を、また、紫外線半導体レーザーの単一周波数発振を得た。その他、共鳴イオン化によるイオン生成、1 mm サイズのトラップの試作を行い、レーザー冷却実験を進めた。

(3) 半導体レーザーによる光周波数コム

モード同期半導体レーザーとしては、光通信への応用を目指した波長 $1.5 \mu\text{m}$ 帯のものが開発されている。これはモード同期させるための構造を微細加工で作った高価なもので、また、 f_{rep} が

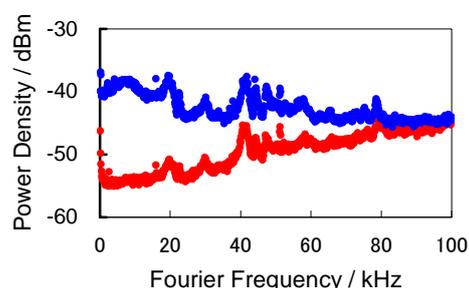


図 5 高フィネス光共振器へのロック時の誤差信号。赤: AOM 制御あり、青: 同なし

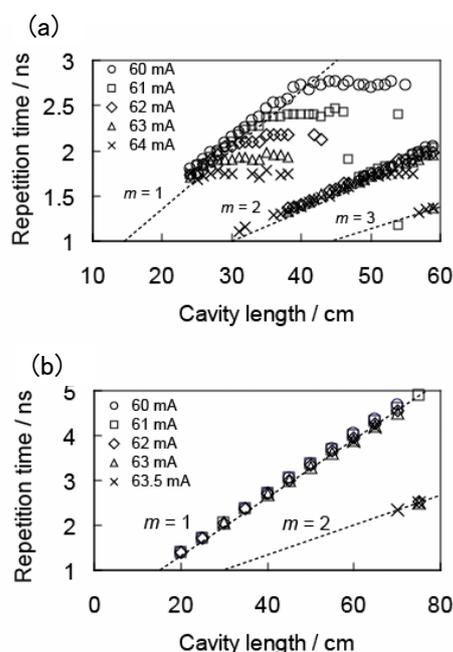


図 6 外部共振器型モード同期半導体レーザーの共振器長 vs パルス周期特性。 m は外部共振器内のパルス数。(a) AR コートなし、(b) AR コートあり

数 10 GHzで高価なマイクロ波の部品が必要となる。本研究ではDVD読み出し用に開発された安価な自励発振半導体レーザーの利用を迫及した。

外部鏡による光帰還を行うことで、自励発振半導体レーザーのモード同期を試みた。図 6(a)に結果を示したように、注入電流が一定の条件では外部共振器長を長くするにしたがってパルス繰り返し周期 T_{rep} は増加し、やがて飽和した。さらに外部共振器長を長くすると共振器内に存在するパルス数が増加し、 T_{rep} の増加と飽和が繰り返し観測された。飽和した値はチップ単体での T_{rep} に等しい。したがって、チップ単体の T_{rep} よりも速く外部鏡から光パルスを帰還させることにより、外部共振器で T_{rep} を制御できることが分かった。

外部鏡によるモード同期はある程度達成されたが、CWレーザーとのビートは全く観測できなかった。特性を改善するために、半導体チップの出端面に無反射コーティングを施した。無反射コーティングは研究者が所属する北野研究室で施された。図 6(b)に示すように、外部共振器長による T_{rep} の制御性が大きく改善されている。また、 f_{rep} のスペクトル幅は無反射コーティングなしの場合は 10 kHz 程度であったが、無反射コーティングによって 100 Hz まで狭くなった。1 パルスあたりのエネルギーが、チップ単体で動作させた場合と同程度になる場合に性能がよく、内部構造の少ない 10ps の時間波形や各モードの線幅が最も狭くなる条件を見出した。しかし、この条件下でも、CWレーザーとのビート信号は非常に限られた周波数範囲で 10 dB 程度の SN 比でしか観測できなかった。

ビート信号を改善するために、外部から線幅の狭い CW レーザー光を注入し、モード線幅の狭窄化を試みた。これにより全スペクトル幅が 1.5 nm から 0.2 nm へ減少してしまっただが、0.2 nm の範囲内であればどこでも SN 比 30 dB のビート信号が得られるようになった。得られたビート信号を図 7 に示す。注入同期はもとのスペクトル幅 1.5 nm 内のどこでもかかることが分かった。偏光を利用する方法でモード同期半導体レーザーの外部共振器モードと注入光の周波数差を検出できることを見出し、この信号をフィードバック制御に用いて注入同期を長時間保つことに成功した。

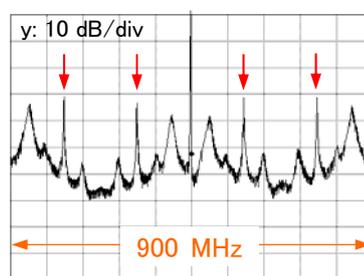


図 7 注入同期された外部共振器型モード同期半導体レーザーと CW レーザーとのビート信号(矢印)

5 自己評価:

主たる具体的成果は、光分周器のプロトタイプをレーザー光に位相同期させた形で完成させることができたこと、安価な自励発振半導体レーザーで光周波数コムを実現できる可能性を見出したこと、である。研究開始当初はまだ実現されていなかった位相同期器型の光分周器はアメリカの標準研究所 NIST に先を越された。しかし、特別なモード同期レーザーではなく、自作のレーザーでも位相同期で光分周器が実現できることを示せたことは、本研究の根幹となる原理を確認できたほかに、広く使える技術であることも証明されたと思う。(例えば、狭い線幅のレーザー光を広い波長範囲へ移す、波長の離れたレーザーを位相同期させる)。また、本研究で実現した自励発振半導体レーザーのモード同期は、世の中でもっとも安価なモード同期レーザーである。今後スペクトル幅を広げることができれば、時間軸を使う計測への応用も含めて非常に面白く、楽しい研究の芽ができた。

商用の原子時計を全レーザーで置き換える、という最終目標に照らし合わせて考えると、イオントラップの部分の進捗が悪かったこともあり、本研究では光分周という根幹となる原理を確認し、光分周を半導体レーザーで実現するための基礎となるレーザーを見出したところにとどまった。公募時に提案した小型の全レーザーによる原子時計は、光周波数コムの実用として、基礎物理学を除いた実用面を考えたときには、今なおもっともインパクトがあるものと確信している。最終目標に向けた基礎を本研究期間内で固めることができたので、今後研究を発展させて当初目標を実現させたい。

6 研究総括の見解:

GPSによる測地精度は、人工衛星に搭載されているセシウム時計により確保されている。マイクロ波領域を基準とするこの原子時計に代えて、より高性能化が見込める光領域を基準とし、さらに、必要となるレーザーを全て半導体レーザーとして、低消費電力で可搬なシステムを開発することを目標とした。そのための第一歩として、原子(イオン)の共鳴周波数にその発振周波数を安定化したレーザーの周波数を、光周波数コムを使って正確に分周してマイクロ波周波数標準とする新しい方式の原子時計を提案、開発した。

そのプロトタイプとして、モード同期チタニウムサファイヤ(TiS)レーザーの光パルスをフォトニック結晶ファイバーに導入して、1オクターブ光周波数コムを発生させ、光分周器を実現させた。次に市販の半導体レーザーを高速ロックして線幅を狭窄化した基準周波数レーザーを構築し、安定な単一イッテルビウムイオンを供給するトラップの動作を確認した。更に、DC電流を流すだけでパルス光を発する自励発振半導体レーザーのモード同期を実現し、光周波数コムとして充分応用可能であることを示した。

これら3つの要素技術を開発したことは高く評価出来る。更にこれらを統合して、所期の新しい原理に基づく原子時計の実現が待たれる。

7 主な論文等:

論文(2件予定)

- 1) Y. Iwaki, M. Nakahara, O. Kazarsky, M. Kitano, and K. Sugiyama, "Mode-locking of a self-pulsation laser diode by external cavity configuration and its injection locking" (投稿予定)
- 2) K. Sugiyama, S.N. Slyusarev, M. Misono, R. Ikuta, and M. Kitano, "Frequency control of a mode-locked titanium-sapphire laser for optical frequency divider" (投稿予定)

解説等(3件)

- 1) 杉山, "モード同期レーザーによる光周波数計測", 光学, Vol. 31, No. 12, pp.871-876 (2002).
- 2) 杉山, "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, No. 3, pp.175-181 (2003).
- 3) 杉山, "レーザーハンドブック(第2版) 19・3節 光周波数標準", レーザー学会編, オーム社, 2005.

特許(出願2件)

- 1) 杉山, 中原, 北野, 岩城, "モード同期半導体レーザー", 特願2004-222501 (出願日2004.7.29)
- 2) 杉山, 岩城, 北野, "モード同期半導体レーザー装置", 特願2005-031159 (出願日2005.2.7)

受賞(1件)

平成15年度文部科学大臣賞 第28回研究功績者 "超短パルスレーザーによる光周波数計測技術の研究"

一般国内発表(14件)