

小型超高精度レーザー—原子時計の実現

杉山 和彦

京都大学大学院 工学研究科 電子工学専攻

1. 研究のねらい

超短パルスレーザーとして利用されているモード同期レーザーは、周波数軸上で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。この光周波数コムはレーザーの周波数計測に応用されて大きな成果を収め、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た。本研究ではこの技術をさらに進めて、安定化したレーザー周波数を、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。基準周波数が光周波数になるので、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。必要となるレーザーを全て半導体レーザー化し、低消費電力で可搬なシステムの開発を最終目標とする。これが実現すれば、商用原子時計により不確かさが決まっている、時系(周波数標準)や GPS による測地などをはじめ、精密計測技術の高精度化に貢献することができる。

2. 研究成果と考察

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。

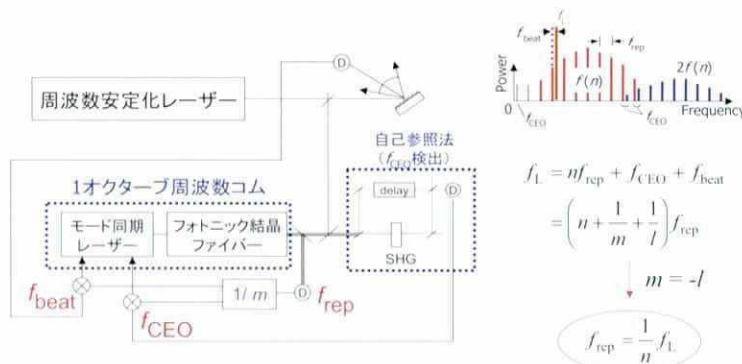


図1 光分周器のブロックダイアグラム

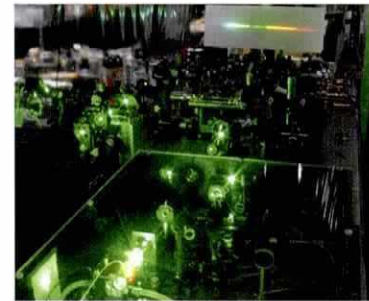


図2 光分周器の全景

(1) 1オクターブ光周波数コムを用いた光分周器

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をフォトニック結晶ファイバーに導入する方法で 1 オクターブ光周波数コムを発生させ、安定化レーザーに対して位相同期した光分周器のプロトタイプを実現させた。光周波数コム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である。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。プリズム対で分散を補償した自作のモード同期 Ti:S レーザーを用いた。防音や結晶の冷却など改良を進め、市販のものと同色の性能を有する。自己参照法により検出された 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する方法で位相同期させた。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。

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実現した。図3に示すビート信号の中央に観測された 10 dB

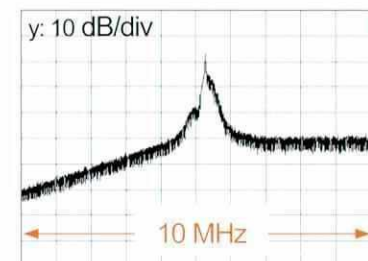


図3 安定化レーザーへ位相同期中のビート信号

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行い、 f_{rep} を周波数カウンタで測定した結果を図4に示す。観測された周波数変動は、基準周波数レーザーが安定化されている共振器の温度変化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。回折光子による光帰還でまず 1 MHz まで、続いて低フィネス共振器へ高速制御し 10 kHz まで線幅を狭窄化した。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。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 Yb⁺イオンの吸収線を用いて行うこととし、トラップを確認した。波長 370 nm レーザー冷却光源の半導体レーザー化を目指して、2 台の和周波を共振器内で発生させる方法の確立(出力 60 μ W)と、紫外線半導体レーザーの単一周波数化を行った。

(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、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、波長 1.5 μ m の光通信帯用に開発されている。ここでははるかに安価な、DVD 読み出し用に開発された自励発振半導体レーザーに、外部鏡による光帰還をかけることによりモード同期を実現した。チップ端面が AR コートされていない場合は、チップ単体のパルス繰返し周期 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。チップの端面に AR コートを施すと、特性が大きく改善された。とくに f_{rep} のスペクトル幅は、AR コート前の 10 kHz 程度から、100 Hz まで狭くなった。しかし、CW レーザーとのビートは非常に限られた条件でしか観測できなかった。

この理由は各モードの線幅がなお広いと考え、外部から CW レーザー光を注入してモードの線幅狭窄化を試みた。これにより全スペクトル幅が 1.5 nm から 0.2 nm へ減少してしまうものの、スペクトル範囲内であればどこでもビート信号が SN 比 30 dB で得られるようになった(図 5)。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。光周波数コムを安価な半導体レーザーで実現する、その基礎を確立できたと考える。

3. 謝辞

終始暖かくご指導いただいた花村榮一領域統括、領域アドバイザーの先生方に感謝します。本研究に関わった御園雅俊、Sergry Slyusarev 両博士研究員、岩城吉剛、生田力三、池田充彦、藪伸彦、中原雅之、Oleg Kazarsky をはじめとする学生諸氏、いつもご協力いただく北野正雄教授、並びに北野研の皆様へ感謝します。

4. おもな論文

- 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)
- 3) 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).

5. その他

特許 出願中 2 件

著書 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.

受賞 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"

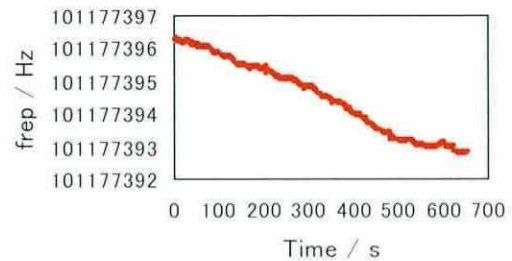


図 4 光分周器の連続動作

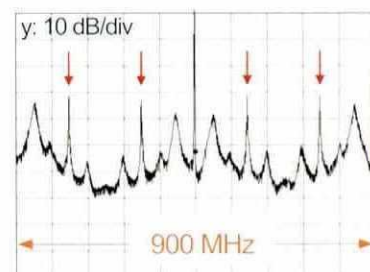


図 5 注入同期された外部共振器型モード同期半導体レーザーと CW レーザーとのビート信号(矢印)