

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年12月28日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760254

研究課題名（和文） 超小型原子発振器の実現化に関する研究

研究課題名（英文） Pulse excitation method suitable for chip-scale atomic clocks

研究代表者

五箇 繁善 (GOKA SHIGEYOSHI)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：80305416

研究成果の概要（和文）：

超小型原子発振器を実現するために、低消費電力化と水晶振動子より数桁優れた周波数安定度の獲得を目指し、次の2つの課題に関する研究を行った。省電力化に適したレーザ変調周波数の選択、および小型化に適したCPT共鳴線幅の狭線化とS/N比の改善である。これら2つの方法を組み合わせることにより、省電力化と高安定度を両立させ、短期安定度の良い高性能な超小型原子発振器の実現化を目指した。

研究成果の概要（英文）：

A pulse excitation method of coherent population trapping (CPT) with a liquid crystal optical modulator (LCM) and a higher-order harmonic excitation method combined with a pulse excitation were proposed for chip-scale atomic clocks (CSACs). Since liquid crystals enable reductions in size, weight, cost, and power consumption compared with acousto-optical modulators (AOMs), our methods are suitable for CSACs. Experiments showed that pulse excitation with a LCM can narrow the CPT resonance linewidth and reduce the light shift effect. The CPT resonance linewidth and light shift sensitivity were less than one-eighth and one-third those for continuous excitation, respectively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：超小型原子発振器，CPT共鳴，ラムゼイ共鳴，マイクロ波発振器

1. 研究開始当初の背景

インターネットや携帯電話などを代表とする情報伝送量の急激な増加に伴い、基準となる周波数源には高安定化かつ低消費電力化に対する性能向上が強く求められている。また各種計測装置においても、測定分解能向上のためには時間分解能を高める必要があり、理学や工学など分野問わず安価で高

安定な周波数源が切望されている。これら機器類には、温度補償型や温度制御型水晶発振器が利用されているが、その周波数精度・安定度は 10^{-6} ～ 10^{-8} 程度が限界である。したがって、更なる精度および安定度を得るためには、ガラスで封じされた蒸気状態のアルカリ元素を利用したガスセル型原子発振器が必要となる。しかし、現状の小型原子発振器の

場合には、次のような問題点があり小型化に適していない。

- ① 共鳴周波数に依存する共振器長 (100cm³以上の体積)
- ② 堅牢な共振器の構造 (大きな重量)
- ③ ガスセル加熱とマイクロ波発振器 (5W以上の大きな消費電力)
- ④ 非常に高い価格

これら問題点の根本的な原因は、①のマイクロ波共振器が必要となるためである。ルビジウム(⁸⁵Rb)を用いた場合 22.5mm の共振器長が必要となり、これ以上の小型化は原理的に困難である。したがって、特殊な用途を除きほとんど利用されていない。

上記①および②の問題は、共振器を用いない方法を採用することにより改善可能である。米国国立標準技術研究所 (NIST) は、超小型原子発振器(Chip Scale Atomic Clock)の開発に取り組んできた。この超小型原子発振器は、Coherent Population Trapping (CPT)というある条件下においてアルカリ元素の吸収線に細い線幅の透明化現象が起こることを利用したもので、光学装置のみで基準周波数を取り出すことが可能であり、共振器の必要がなく小型化に適している。申請者もルビジウムおよびセシウムガスセルを用いた CPT 原子発振器を実験的に組上げ、諸特性および長期周波数安定度を測定していたが、上記③の消費電力低減と④のコスト削減策が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、小型・高安定な次世代周波数源として超小型原子発振器の実現化を目的とし、次の2つの提案を行う。

まず、消費電力低減を可能とする新たな励起方法を提案する。現状の超小型を目指した原子発振器において、消費電力全体の半分以上は、マイクロ波発振器とその周辺 PLL 回路の電力が占めている。そこで励起用レーザの変調周波数を最適化し、CPT 現象に必要なマイクロ波周波数を低下させることにより大幅な電力削減を可能とする。加えて、マイクロ波周波数の低下は周辺回路の作製を容易にし、かつ変調帯域幅の低下はレーザの選択肢を広げることに繋がるため、コスト削減にも非常に有効である。

次に、周波数源としての性能向上を目的として、周波数安定度 (特に短期安定度) の向上を狙う。短期安定度は共鳴の Q 値と S/N 比によりおおよその特性が決まるため、Q 値向上を実現させることで短期安定度を向上させる。ここでは特性励起用半導体レーザの波長を安定化させたままパルス化すること

で、CPT 共鳴信号を細い線幅へ向上させる方法を提案する。

以上2つの手法を組み合わせることにより、省電力化と安定度向上を両立させ、短期安定度に優れた高性能な超小型原子発振器の実現化を目指す。

3. 研究の方法

超小型原子発振器を実現化するため、下記2つの課題について研究を行う。

(1) [課題 I] 省電力化に適したレーザ変調周波数の選択。

これまでの研究では、マイクロ波周波数の低いアルカリ元素(⁸⁵Rb)を用いた省電力化を検討してきたが、遷移周波数が低いと共鳴 Q 値が下がるため、短・長期安定度を低下させる要因となってしまう。そこで本研究では、レーザ変調強度を上手く調整し、発生させるサイドバンドの2次以上の成分 (従来は1次成分を利用) を利用することでマイクロ波周波数を 1/2 以下にし、マイクロ波発振器および周辺回路の消費電力を低減させる。本方法は、原理的にすべてのアルカリ元素へ適用できるため非常に有効的な方法である。ただし、共鳴振幅が若干低下するため、下記の課題 II を併用することにより、全体としての共鳴特性を大きく向上させることが可能となる。

(2) [課題 II] 小型化に適した CPT 共鳴線幅の狭線化と S/N 比の改善。

パルス励起することによりラムゼイ共鳴が起こり、CPT 共鳴の狭線化と振幅の増加 (S/N 比の改善) が可能であることが報告されている。しかし、小型化に適したレーザ駆動電流によるオン・オフ制御の場合、レーザ出力周波数が大きく変化し、数 100MHz 以内に抑え込む必要がある CPT 観測にはまったく使用できない。パルス駆動による文献では AOM (音響光学変調器) を用いた変調が基本となっており、安価・小型化の制約から超小型原子発振器には適用できない。そこで本研究では、透過型の液晶パネルを用いてパルス化する方法を提案する。液晶は消費電力も非常に小さく、安価・小型・省電力の要求をすべて満たしている。

以上の課題 I および II の利点を組み合わせ、省電力化と高安定度を両立させながら、実用化が可能な本提案法の有効性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 課題 I に関して、超小型発振器の省電力化を実現すべく高次高調波を用いた励振方法についての実験を行った。CPT 共鳴の観測には、アルカリ原子の超微細構造における 2

つの基底準位および共通の励起準位からなる3準位系に対し、波長の異なる2つのレーザー光を同時に照射する必要がある。ここで、2つのレーザー光の周波数差は基底準位間の周波数差 f_{hfs} に一致しなければならない。図1のように、これまでに報告されてきた研究では、励起用レーザーである VCSEL の駆動電流に f_{hfs} の半分の RF 周波数を重畳させ、FM および AM 両方の変調効果により発生した2つの1次高次高調波（サイドバンド）を CPT 共鳴の励起に利用していた。そこで本研究では、FM 変調により2次以上の高次高調波成分が発生することに着目し、RF 周辺回路における消費電力の削減を図る。

高次高調波で CPT 共鳴を観測する場合、変調に必要となる RF 周波数を f_{RF} とすれば次の式で表せる。

$$f_{\text{RF}} = \frac{f_{\text{hfs}}}{2n} \quad (1)$$

n は高次高調波次数であり1以上の整数である。従って、 n が大きいほど次数の高い高調波を利用することとなる。本測定では、キャリアに対し高周波側と低周波側に生じる n 次のサイドバンド2つを用いて共鳴観測した。

図2に n 次のサイドバンドにより観測された CPT 共鳴特性を示す。縦軸は最大値で規格化した共鳴振幅であり、横軸は RF の離調周波数を示している。同図より、 n 次のサイドバンドによる CPT 励起が可能であることが分かる。次数 n の増加に伴い共鳴線が狭線化しているように見えるが、RF 周波数が異なるためであり、共鳴 Q 値はほぼ同一の値が得られている。図3は共鳴の S/N 比に相当するコントラスト（共鳴振幅値 / 共鳴外での透過光強度）を示している。同図より、コントラストは次数の増加に伴い低下する傾向であることが分かる。

一般的に、原子発振器におけるアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau)$ の短期安定度は次式で表される。

$$\sigma_y(\tau) \propto \frac{1}{Q \cdot (S/N)} \tau^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここで、 τ は平均化時間、S/N 比はコントラストに相当する。共鳴の Q 値とコントラストの積を性能指数（Figure of Merit）とすれば、この値が大きい程、原子発振器の短期安定度は向上する。したがって、高次高調波励起によるコントラスト減少を補う必要がある。

そこで本研究では、パルス励起を併用することでコントラスト低下を補う方法を提案した。励起用レーザー光をパルス化することで、CPT 共鳴にラムゼイ共鳴を生じさせ、共鳴線の狭線化（Q 値を増加）が可能となる。パルス励起による測定結果を図4に示す。連続励

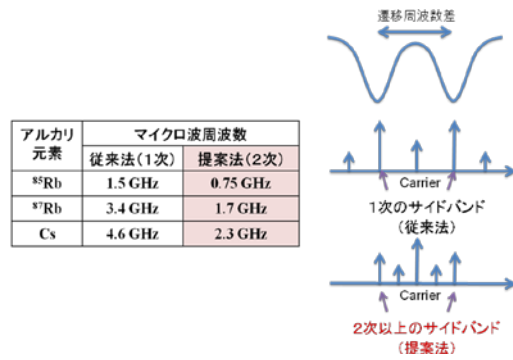


図1 高次高調波による励起方法

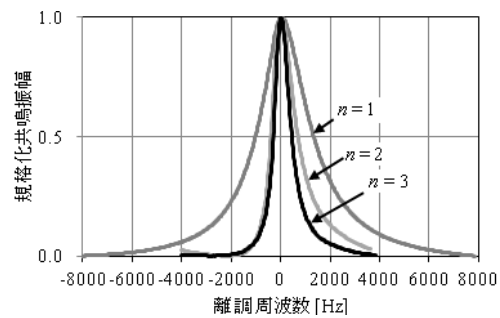


図2 CPT 共鳴特性（連続励起）

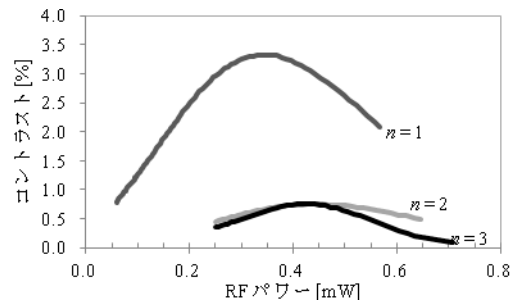


図3 高次高調波励起による CPT 共鳴コントラスト（連続励起）

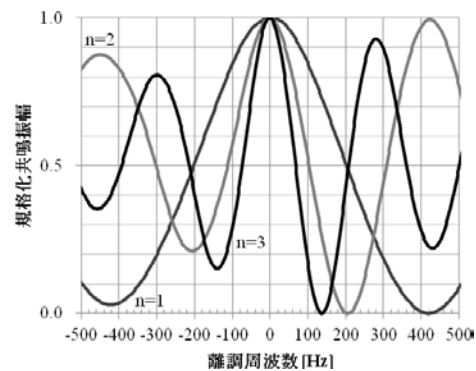


図4 CPT 共鳴特性（パルス励起）

起（図 2）と比較して、大幅な狭線化が達成出来ていることが分かる。

表 1 に性能指数の相対値を示す。これまでの励起方法である連続励起の $n=1$ を基準とすると、パルス励起により 9.2 倍、すなわち 1桁近くの短期安定度の改善が見込めることが分かる。また、提案手法である高次高調波励起 $n=3$ の場合でも、性能指数は 2.3 倍が得られており、RF 関連回路の電力を約 1/3 に抑えながら、短期安定度を 2.3 倍向上可能であることが明らかになった。

表 1 相対性能指数

次数 n	励起方法	RF 周波数 [GHz]	相対性能指数
1	連続	4.596 325	1.0
	パルス	4.596 325	9.2
2	連続	2.298 162	0.2
	パルス	2.298 162	2.9
3	連続	1.532 108	0.3
	パルス	1.532 108	2.3

(2) 課題 II に関して、パルス励起で一般的に用いられている AOM では無く、液晶を使った変調器を用いることを提案した。液晶は消費電力が非常に低く、かつ小型化可能なため、パルス励起用変調器として超小型発振器に適用可能である。

図 5 は、透過型のネマティック液晶と偏光板 2 枚を組み合わせて光強度変調を行った場合の透過光強度を示している。CPT 共鳴をパルス励起する場合には、励起光の立ち下り特性が急峻である必要があるため、立ち下がり特性を重視した光学設定を行った。このパルス光源により観測した CPT 共鳴を図 6 に示す。同図より、連続励起 (640 [Hz]) よりも十分に細い線幅 (70 [Hz]) の共鳴線が得られていることが分かる。この線幅は AOM による値 (60 [Hz]) とほぼ同様の値であり、本方法の有効性が示されている。

次に、長期安定度の主要因であるライトシフトの測定を行った。ライトシフトとは、励起用光源の光パワーが共鳴周波数を変動させる現象である。光源のエイジング特性による長期的な光パワー変動が、周波数変動を引き起こす原因となる。図 7 は液晶および AOM によるパルス励起を比較した結果である。相対周波数シフト ($10^{-11} \text{ cm}^2/\mu\text{W}$) は、連続励起で 1.9、液晶パルス励起で 0.64、AOM パルス励起で 0.38 が得られ、パルス励起の場合には、連続励起よりもライトシフトの影響が少なくなっていることが分かる。この結果は、液晶によるパルス励起を行うことで、連続励起よりも 1/3 程度に抑えることが可能であることを示している。

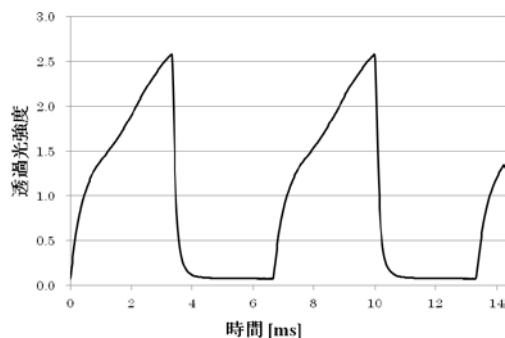


図 5 液晶変調器によるパルス透過光

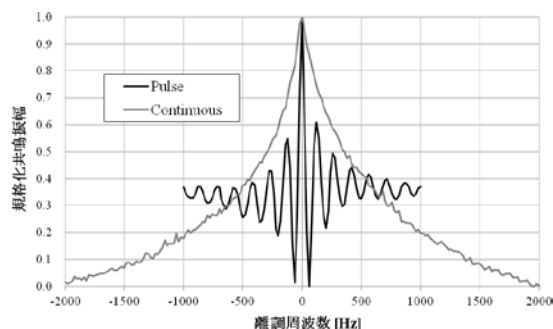


図 6 液晶変調器による CPT 共鳴特性

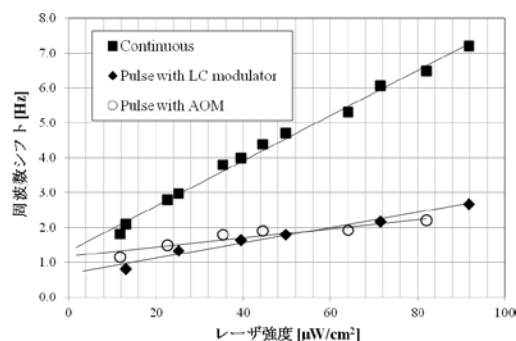


図 7 ライトシフト特性

(3) まとめ

課題 I および II の研究成果から、本研究の提案手であった、①高次高調波による電力削減化と、②パルス励起による特性改善の有効性が明らかになった。これらの手法は、課題 II の液晶を用いた研究成果から、超小型原子発振器への適用が容易であることも示された。

以上の結果より、本提案手法の有効性が明らかにされ、高性能な超小型原子発振器の実現化への方策を得ることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Shigeyoshi Goka, ^{85}Rb D1-Line Coherent-Population-Trapping Atomic Clock for Low-Power Operation, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, **49**, 2010, 062801
- ② Yuichiro Yano and Shigeyoshi Goka, Pulse Excitation Method of Coherent-Population-Trapping Suitable for Chip-Scale Atomic Clock, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, **51**, 2012, 122401

[学会発表] (計 6 件)

- ① Shigeyoshi Goka, Experimental Study of Coherent-Population-Trapping Atomic Clock for Low-Power Operation, Asia-Pacific Radio Science Conference, 2010 年 9 月 23 日, 富山国際会議場
- ② 矢野雄一郎, 五箇 繁善, CSACに適したレーザーパルス化手法, 電気学会 高機能EM回路デバイスの応用技術調査専門委員会, 2011 年 7 月 15 日, 千葉大学
- ③ 矢野雄一郎, 五箇 繁善「超小型原子発振器に適したレーザーパルス化の手法」電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2011 年 9 月 7 日, 富山大学
- ④ 五箇 繁善, 矢野雄一郎「CSACに適したCPT共鳴のパルス励起手法」電気学会 精密周波数の発生と高精度分配のための次世代回路技術調査専門委員会 2011 年 10 月 14 日, 日本電波工業(伊豆高原)
- ⑤ 矢野雄一郎, 五箇 繁善「チップスケール原子発振器に適したレーザーパルス化手法」電気学会 電子回路研究会, 2011 年 11 月 21 日, 村田製作所(京都)
- ⑥ 五箇 繁善, 矢野雄一郎「Cs-D₁線VCSELを用いたCPTパルス励起」電気学会 精密周波数の発生と高精度分配のための次世代回路技術調査専門委員会, 2011 年 12 月 16 日, 情報通信研究機構(小金井)

[図書] 計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 原子発振器及び CPT 共鳴の励起方法
発明者: 五箇 繁善, 矢野 雄一郎

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 100107766

出願年月日: 24 年 8 月 30 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://researchmap.jp/read0192151/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

五箇 繁善 (GOKA SHIGEYOSHI)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号: 80305416