

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15009

研究課題名（和文）2位相変調法によるチップスケール原子時計の小型化

研究課題名（英文）Two phase modulation spectroscopy for minitizing chip-scale atomic clock

研究代表者

矢野 雄一郎 (Yano, Yuihir)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所電磁波標準研究センター・研究員

研究者番号：80781765

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：携帯電話などの小型端末に搭載できるチップスケール原子時計に際して、磁気シールドを軽装化することを目的として、磁場に鈍感な時計遷移と磁場に敏感な遷移（ゼーマンサブレベル）の同時観測する2位相変調法に関する研究開発を実施した。この研究開発では、アルカリ原子が有する型3準位で生じるCoherent Population Trapping（以下、CPT）に対し、基底準位間の遷移周波数を検出するために2つの異なる変調周波数で位相変調を行った場合の共鳴スペクトル特性の解析及び実験を行い、解析結果と実験結果は定性的に一致することを確認し、提案法の実現性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

位相変調法では従来の周波数変調によるCPT共鳴取得と異なり、より高い変調周波数を利用できることが特徴であり、この特徴を利用して2つの周波数の同時計測が可能であると考えられる。本方式を利用することで2つの異なる遷移周波数を同時の実現可能性が示された。これによって、磁場に敏感な遷移（ゼーマンサブレベル）を提案方式により高精度に計測し、磁場をアクティブ制御することが可能となれば、量子部の大幅な小型化と低コスト化が可能となり、原子時計のチップ化に大きく貢献する。

研究成果の概要（英文）：We have developed a two-phase modulation method to simultaneously observe magnetic field insensitive transition (clock transition) and magnetic field sensitive transitions (Zeeman sublevel) in order to reduce the magnetic shielding for chip-scale atomic clocks that can be installed in small devices such as cell phones. In this study, we analyzed the resonance spectral characteristics of Coherent Population Trapping (CPT) in the -type three levels of alkali atoms by using two different modulation frequencies to detect the transition frequencies between the ground levels.

研究分野：電子回路、量子光学、周波数計測

キーワード：チップスケール原子時計 位相変調

1. 研究開始当初の背景

近年、Coherent Population Trapping(CPT)と呼ばれる原子共鳴を利用したチップスケール原子時計(Chip Scale Atomic Clock: CSAC)が注目されている。CSAC は、MEMS 技術を利用して作られ、体積が 1cm^3 と小型でかつ低消費電力でありながら良好な周波数安定度が実現できるため、近年、センサーネットワークやスマートグリッド、インフラモニタリングなど IoT 向けのタイミングデバイスとして応用が期待されている。2011 年には米 Symmetricom 社からチップスケール原子時計が民生用として発売されたものの、未だ上述のような小型端末に搭載できる CSAC は実現されていない。

原子共鳴を取得する量子部の小型化で障害となっているのは、ガスセル内の静磁場を安定に保つための堅牢な磁気シールド構造である。例えば、原子が封入されるガスセルは 1.5mm 角なのに対し、磁気シールドは 2 重構造で厚さは 1mm 程度もある。加えて、磁気シールドである強磁性体材料は、MEMS 技術との親和性が低い(mm オーダの厚膜は製膜品質と製膜時間の点で現実的ではない)ため、大量生産に向かず製造コストを上げる要因となっている。このように、CSAC は堅牢な磁気シールドによって小型化に大きく制約を受けており、原子時計の「真のチップ化」のためには今後、磁気シールドの薄膜化、軽装化の技術が必須となると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、CSAC の堅牢な磁気シールドを軽装化することを目的とし、報告者が発明した位相変調法を改良した 2 位相変調法によって、磁場に鈍感な量子遷移(時計遷移)と磁場に敏感な遷移(ゼーマン遷移)の同時計測し、磁場に対する影響を低減する方法を提案する。本方法は、変調方式を変更(現実装では検波回路のデジタル信号処理を変更する)するのみであり、追加の光学素子が必要なく、体積、消費電力、コストが制限される CSAC に最適な方法である。

3. 研究の方法

CSAC では、アルカリ原子が有する Λ 型 3 準位で生じる Coherent Population Trapping(以下、CPT)共鳴が周波数基準として利用される。本研究では、 Λ 型 3 準位系に対し、基底準位間の遷移周波数を検出するために 2 つの異なる変調周波数で位相変調を行ったときの共鳴スペクトル特性の解析及び実験を行った。位相変調法では従来の周波数変調による CPT 共鳴取得と異なり、より高い変調周波数($>$ 数 kHz)を利用できることが特徴であり、より広い帯域を利用できることから 2 つの周波数の同時計測が可能であると考えられる。CPT 共鳴の時間応答解析には、密度行列に基づいた解析を実施した。密度行列解析にはガラーキンスペクトル法を利用して計算時間を短縮させ効率的かつ高精度な数値計算を行い、共鳴スペクトル特性の評価を実施した。提案法による効果を検証するため、セシウム原子およびセシウム D1 線の面発光半導体レーザを用いた CPT 共鳴の実験を行った。2 つの独立した周波数での位相変調のロックイン検波信号を取得し、数値計算結果との整合性を検討した。

4. 研究成果

2 つの遷移周波数を独立して検出するためには、周波数の異なる 2 つの共鳴のエラー信号が互いに分離されて検出されなければならない。本研究では、2 つの共鳴のエラー信号が互いに分離されて検出される条件を検討するために、密度行列の時間応答特性をガラーキンスペクトル法に基づいて求め CPT 共鳴のエラー信号の検討を行った。

Λ 型 3 準位系に対して異なる 2 つの変調周波数で位相変調を行った場合における共鳴スペクトルのエラー(誤差)信号特性を図 2 に示す。横軸に CPT 共鳴の周波数からの離調周波数、縦軸にエラー信号の強度を示している。それぞれの変調周波数は 6.25kHz 、 11.25kHz であり、同じ変調深さに設定している。(a)は 6.25kHz 、(b)は 11.25kHz でロックイン検波したエラー信号特性を示している。通常の変調周波数が 1 周波数の場合、離調周波数が変調周波数の整数倍で大きく変化するのに対し、2 周波数の場合ではそれぞれの離調周波数が変調周波数の整数倍だけでなく、それぞれの和周波数、差周波数においてもエラー信号が変化することがわかる。

2 位相変調におけるエラー信号の特性で特徴的なのは、離調周波数が 0 (中央部分)における In-phase (同相) のエラー信号は信号強度と傾きが一致しているのに対して、離調周波数が変調

周波数の整数倍においては In-phase のエラー信号の符号が互いに逆になることである。例えば、図 2(a)の離調周波数が 6.25kHz の時に In-phase の正の傾きとなるが、図 2(b)における同一周波数の In-phase の負の傾きとなる。以上のことから、これらエラー信号の和をとれば、離調周波数が変調周波数の整数倍におけるエラー信号の変化が打ち消しあい、離調周波数が 0 におけるエラー信号の変化が強調され、信号の差をとれば離調周波数が変調周波数の整数倍におけるエラー信号の変化が強調されることが予想される。なお、同期検波によるエラー信号はデジタル回路で処理され取得されるため、和や差の処理はデジタル処理として扱うことができる。

以上の予想に基づいて、図 2(a)(b)のエラー信号の和と差を計算した結果を図 3(a)(b)に示す。本図より、それぞれのエラー信号の和と差を計算することで、周波数の異なる 2 つの離調周波数でエラー信号の変化が互いに独立して生じることがわかる。具体的には、2 つの信号の和をとった場合では、離調周波数が 0 の中央部分のエラー信号の変化が最も大きくなり、2 つの信号の差をとった場合では、離調周波数が変調周波数の整数倍においてエラー信号の変化が大きくなることわかる。図 3(b)では中央部分のエラー信号の変化は完全に打ち消しあう一方で、図 3(a)の中心周波数から変調周波数の整数倍の点では、打ち消しあわずにエラー信号の変化が生じる。この点においては、適切な重み付きをつけて和を計算することで、エラー信号の変化を抑圧できる。

解析による知見に基づいて、アルカリ原子として Cs、レーザとして 895nm VCSEL を用いた実験を実施した。なお、本実験は COVID-19 の影響および、研究計画当初では想定していなかった他プロジェクトの参画により、実験装置構成が大きく変更され、また、実験のための占有時間がなくなったため、実験を都立大学で実施した。図 4 に、エラー信号に適切な重み付きを行った結果を示す。共鳴線幅の特性から、それぞれの変調周波数は 70 kHz、100 kHz と設定している。重み付き和を青、差を赤で示している。この結果から、図 3 による解析と同様に、和においては、中央部分でエラー信号変化が大きく変化するのに対して、差では変化が低減されていることがわかる。また、周波数離調 100 kHz においては、差信号が大きく変化するのに対して和信号の変化量は大きく抑圧されていることがわかり、計算結果と実験結果は定性的に一致した傾向を示している。本実験では、CPT 共鳴の線幅に比べてそれぞれの変調周波数の差周波数が小さいため、計算結果のように大きく分離できなかったが、より狭い線幅の CPT 共鳴を利用することで、計算結果と同様の互いに分離された信号を取得することが可能であると考えられる。以上のことから、提案手法により、周波数の異なる 2 つの共鳴のエラー信号が互いに分離されて検出されるといえる。

磁場に鈍感な時計遷移と磁場に敏感な遷移(ゼーマンサブレベル)の同時観測する 2 位相変調法に関する研究開発を実施した。アルカリ原子が有する 型 3 準位で生じる CPT 共鳴に対し、基底準位間の遷移周波数を検出するために 2 つの異なる変調周波数で位相変調を行った場合の共鳴スペクトル特性の解析及び実験を行い、解析結果と実験結果は定性的に一致することを確認し、提案法の実現性を示した。

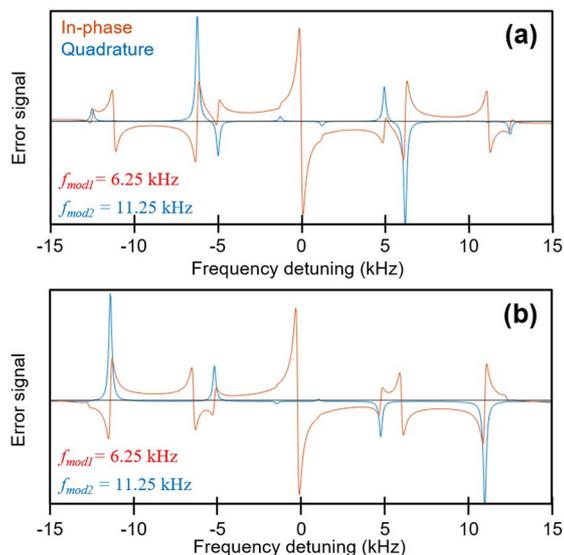


図 2: 2 位相変調によるエラー信号特性

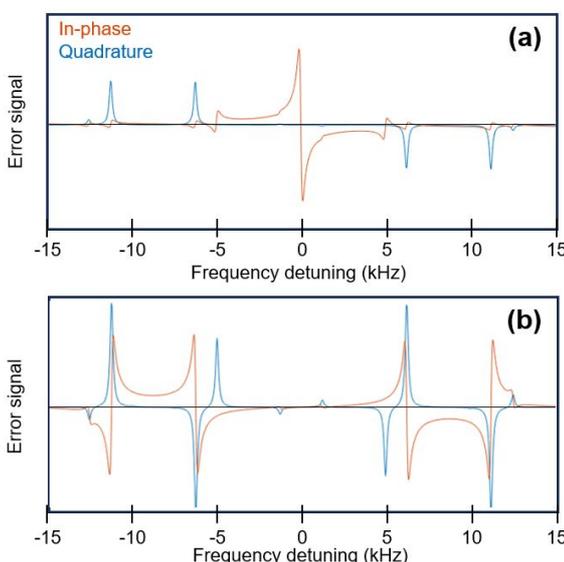


図 3: 2 位相変調で取得されたエラー信号の和信号と差信号の特性

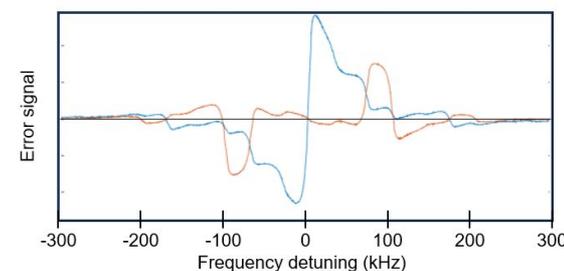


図 4: 実験により得られた エラー信号の和信号と差信号の特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuichiro Yano, Masatoshi Kajita, Tetsuya Ido, Motoaki Hara
2. 発表標題 Investigations on simultaneous detection of CPT resonances by two-phase detection
3. 学会等名 USE2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------