

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月25日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14697

研究課題名（和文）直交偏光子法に基づいたチップスケール原子時計の低消費電力化

研究課題名（英文）Reducing power consumption of chip-scale atomic clock based on crossed polarizers method

研究代表者

矢野 雄一郎 (Yano, Yuichiro)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所時空標準研究室・研究員

研究者番号：80781765

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：原子時計は電磁波と原子との相互作用を利用した超精密な周波数標準器である。近年、CPT方式の開発により、光学系のみでマイクロ波帯の原子遷移が検出できるようになり、原子時計の小型化・低消費電力化が加速している。しかし、従来のCPT方式ではSN比が低く、共鳴の検出にロックインアンプなどの高度な回路技術が不可欠であり、更なる低消費電力に向けて大きな障害となっている。本研究では、申請者が新規に提案した直交偏光子法を利用し、マイクロ波帯のCPT共鳴を高コントラストに直接出力することを検討した。また、新しいCPT共鳴の時間応答解析法を提案し、短時間で精度の高い計算ができることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、チップスケール原子時計の実現を目指して、直交偏光子配置による高コントラスト化を行い、その光ビート信号の位相を取得することで、回路の簡略化と省電力化を目指した。実験結果からは、共鳴下において光ビート信号の位相回転が確認され、回路簡略化の実現可能性が示された。一方で、高コントラスト化なビート信号の取得については、受光強度不足が原因で、未だ高いSNは得られておらず更なる実験的検討が必要であることが明らかとなった。また、原子共鳴の時間応答解析において、カラーキンスペクトル法を用いた計算方法を提案し、高い計算精度を保ちつつ計算時間を大幅に短縮することに成功した。

研究成果の概要（英文）：Atomic clocks are ultra-precision frequency standards employing the interaction between electromagnetic waves and atoms. In recent years, microwave transitions in atoms can be detected with the optical system using CPT resonance, and miniaturization and reduction in power consumption of atomic clocks were achieved. In this study, we investigated the direct output of CPT resonance in the microwave transition at high contrast using the crossed polarizer method. In addition, we proposed a new algorithm for time response analysis of CPT resonance and showed that precise calculation can be performed in a short time.

研究分野：量子光学

キーワード：チップスケール原子時計

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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、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、消費電力120mWの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。

CSAC実現化の最大の障害は消費電力とコストであり、それらは原子共鳴を取得する量子部ではなく、周辺回路に大きく依存している。例えば、GHz帯域で動作するRFシンセサイザとその制御ICは全電力の半分以上を占める。また、デジタルロックインアンプなどの高度な回路技術を搭載していることも、消費電力とコストを上げる要因となっている。

2. 研究の目的

本研究では、直交偏光子法で検出される透過光のスペクトルに着目し、原子時計と相互作用した波長成分の光ビート信号を取得する方法を提案する。従来法では、原子との相互作用の有無に関わらず高次のサイドバンドが光検出器に入るため、所望のビート信号を取得することは困難であった。これに対して、直交偏光子法では、所望の波長成分のみの光ビート信号を取得できるため、光強度だけでなく位相情報も得られると考えられる。そこで、本研究では、直交偏光子法による透過光の光ビート信号を利用した新しい方式のCSACを展開するための基礎となる研究を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1)直交偏光子法による透過光のスペクトル評価

直交偏光子法による透過光の光ビート信号を検出する実験装置を開発した(図1)。装置開発は、ガスセル評価用の光学定盤サイズの実験装置をベースに行った。そのため、レーザ、ガスセルホルダ、磁気シールドは現有のものを利用した。本研究では、これらに2つの偏光子と高速光検出器を追加した。また、信号強度特性、通過帯域、位相特性を評価するためにネットワークアナライザを導入した。

当初計画では、面発光半導体レーザ(VCSEL)を Rb^{87} の遷移周波数6.834GHzで電流変調して生じた1次と0次サイドバンド光を共鳴検出に利用する計画であった。しかし、半導体レーザの変調特性を評価したところ、レーザの遮断周波数が3GHzと低く、直接6.8GHzでの測定ができないことが明らかとなった。そのため、本実験ではプリスケアラを導入して6.834GHzを1/2分周して測定を行うように改良した。

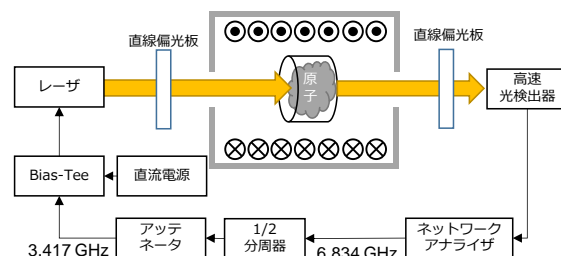


図1 実験装置構成

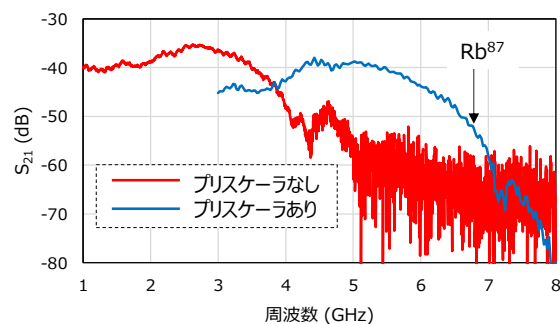


図2 半導体レーザの変調特性

これによって、3.417 GHz によって半導体レーザを電流変調し、変調により生じた±1 次のサイドバンドを利用して測定を行うことが可能となった(図 2 青線)。なお、ネットワークアナライザの出力電力をプリスケアラの入力電力に合わせているため、図 2 ではプリスケアラの導入後の挿入損失が大きく表示されている。

(2) ガラーキン・スペクトル法に基づいた原子共鳴の時間応答特性解析アルゴリズム

上述の背景の通り、量子部と周辺回路の協調設計のためには、原子共鳴やその周辺回路をモデル化し効率的に解析できるシミュレータが必要である。しかし、これまでの原子共鳴の時間応答解析アルゴリズムにおいては、計算精度と計算時間はトレードオフの関係が成り立っており、精度の高い近似解を得るために長い計算時間がかかることが課題であった。そこで、本研究では、水晶振動子などの解析にも用いられるガラーキン・スペクトル法に着目し、短時間で高精度な数値解が得られるアルゴリズム開発を行った。

4. 研究成果

(1) 直交偏光子法による透過光のスペクトル評価

直交偏光子法で Rb^{87} の原子共鳴(CPT 共鳴)を測定した結果を図 1 に示す。ガスセルは円筒形で、直径 25mm、長さ 25mm のパイレックス性のものを利用した。同位体選別された Rb^{87} とバッファガスとして N_2 が 4 kPa 封入されている。ガスセルは 60.0 °C で温度を一定に保っている。バイアス磁場は光軸方向に印加しており、共鳴のコントラストが最大になるように調節している。なお、本実験では、GHz の高速フォトディテクタではなく、従来のディテクタ(カットオフ周波数 500kHz)のフォトディテクタを用いている。本図より、共鳴の半値全幅は約 200Hz、共鳴の SN 比の指標として使われるコントラストが 70%であり良好な共鳴特性が得られた。従来法のコントラストは大きくても 10%程度であることから、提案法により背景光強度が大きく下がることを確認された。すなわち、直交偏光子法によって原子と相互していない不要な波長成分(サイドバンド成分)の検出が抑えられ、相互作用した所望の波長成分のみがフォトディテクタで検出されることが示された。

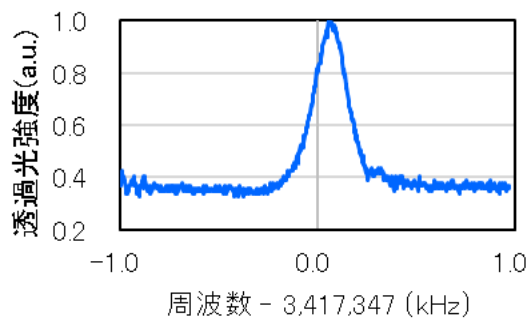


図 3 直交偏光子法による CPT 共鳴の透過光強度スペクトル

(2) 光ビート信号の位相特性の評価

まず、実験装置の動作を確認するために、レーザ偏光を円偏光に設定し、従来法の光学構成で光ビート信号の位相特性を測定した。結果を図 4 に示す。同図より、共鳴近傍で大きく位相が変化していること、位相が大きく変化している周波数は 3 カ所あることが分かる。これらの周波数間隔は磁場に依存していることから、こ

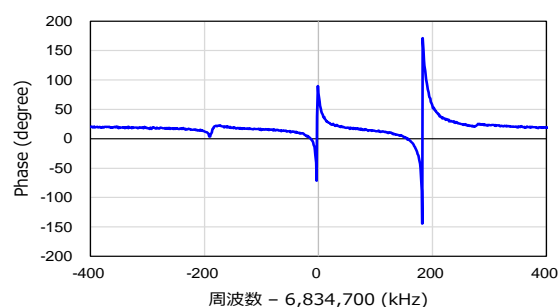


図 4 円偏光励起による CPT 共鳴の位相特性

れらは Rb^{87} が有する 3つのゼーマンサブレベル(磁気副準位)の各遷移に対応している。以上のことから、本実験装置によって、原子共鳴の光ビート信号が検出できることが確認された。

その後、直線偏光配置に光学構成に設定し、高コントラストな光ビート信号検出を行った。しかし、原子共鳴のコントラストは高いもののディテクタ入射強度が低かったため、光ビート信号の強度が小さく良好な位相変化を確認することはできなかった。そこで、1mW以下と光出力が小さい面発光半導体レーザの代わりに、より光出力が大きいDFBレーザとファイバー型のEOMを用いるように実験装置構成を変更した。しかし、ディテクタに集光したこと起因してレーザへの戻り光が大きくなり、レーザが発振不安定となり、安定して原子共鳴が得られなかった。今後、光アイソレータを導入し、戻り光の影響を抑えた条件で再実験を行う計画をしている。

(3)原子共鳴の時間応答特性を解析する効率的なアルゴリズム開発

直交偏光子法の時間応答特性を解析するために、短時間で高精度な数値解が得られるアルゴリズム開発を行った。従来解析アルゴリズムでは、時間を微小区間に分割して解析を行っており、これにより微小区間の境界で位相が不連続になるため、直交偏光子法の時間応答の解を十分な精度かつ現実的な時間で得ることが難しかった。本研究で着目したガラーキンスペクトル法は、時間分割せず、時間応答をなめらかで連続した関数として扱うため、不連続が生じない。そのため、直交偏光子法の時間応答解析に好適なアルゴリズムだと考えられる。

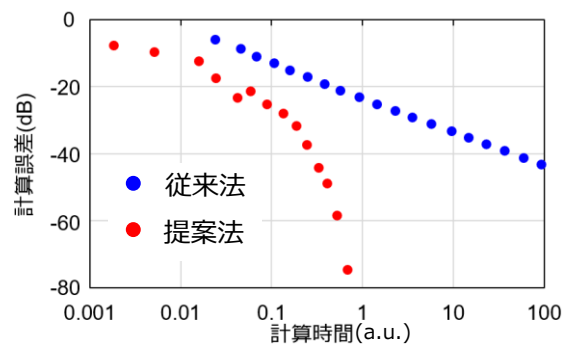


図5 従来法と提案法による計算誤差と計算時間の比較

図5に従来法と提案法を用いた場合の計算誤差と計算時間を示す。従来法(青丸)では、時間の分割数を大きくすればするほど、近似精度が高まるため、計算誤差が線形で減少する。一方で、提案法(赤丸)では、より少ない時間で計算誤差が急激に小さくなることから、これは、提案法がフーリエ級数の重み(係数)を求める方法であることから、フーリエ級数展開の次数が十分な値であれば、次数に応じて急激に近似精度が高まることを意味している。そのため、本解析の条件下では、必要な計算誤差を-60dBとしたとき提案法は提案法の約1万分の1の時間であり、提案法はより少ない計算時間で高い計算精度が得られるアルゴリズムであるといえる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

Y. Yano, M. Kajita, T. Ido, M. Hara, "Fast numerical analysis of the time response in coherent population trapping resonance based on Galerkin spectral method" Japanese Journal of Applied Physics, vol. 58, no. SGG05, pp. 1-5

[学会発表] (計2件)

①Y. Yano, M. Kajita, T. Ido, M. Hara, Numerical Calculation Method of Time Response of Coherent

Population Trapping Resonance Based on Galerkin Spectral Method” Joint conference of the IEEE international Frequency Control Symposium & European Frequency and Time Forum, Orlando, Florida, USA (2019).

②矢野 雄一郎, 梶田 雅稔, 井戸 哲也, 原 基揚, “原子時計チップのための Coherent Population Trapping 共鳴の高速数値解析” 電気学会 電子・情報・システム部門 超精密周波数計測とその比較技術による回路技術調査専門委員会, 情報通信研究機構 3号館 1階, 2019年2月15日.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等(なし)

6. 研究組織

(1) 研究分担者 (なし)

(2) 研究協力者 (なし)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。