

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 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560050

研究課題名（和文）高安定原子時計のための冷却原子とイオンの相互作用の研究

研究課題名（英文）Research on ion-atom cold collisions for ultra-stable atomic clocks

研究代表者

渡部 謙一（WATABE KENICHI）

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：50358389

研究成果の概要（和文）：冷却原子とイオンの相互作用によるイオン冷却と状態選択・状態検出を採用した、従来の水素メーザーなどに置き換わる全く新しい実用原子時計の開発を行うため、冷却原子ビーム装置及びイオントラップ装置の設計製作、Rb 冷却原子ビームの光ポンピング用レーザーの開発を行った。レーザーに関しては、1590 nm DFB レーザーよりファイバー結合導波路型の非線形光学結晶を用いて第2高調波の795 nm (Rb D1 線) を発生する方式を採用した。

研究成果の概要（英文）：Toward novel practical atomic clocks using ion-cooling, state selection, and state detection by ion-atom cold collisions, replacing conventional atomic clocks such as hydrogen masers, we have developed devices for cold atom beam and ion trap, and laser systems for optical pumping of cold Rb beam. As for laser, we have adopted a second-harmonic-generation (SHG) of 795 nm (Rb D1 line) using periodically-poled-lithium-niobate (PPLN) waveguide (WG) device from a 1590 nm DFB laser.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：量子エレクトロニクス、原子時計

1. 研究開始当初の背景

情報通信、放送、計測、音響・映像などの機器の高度化に伴い、従来の実用原子時計より高安定な基準周波数源の開発が産業界や基礎・実用科学の分野から期待されている。また、1秒の長さを決定する際には、各標準研究所に設置された時系維持のための実用原子時計に原子泉などの一次周波数標準器を用いて値づけを行うため、高安定な実用原子時計が必要不可欠である。次世代の一次周波数標準器として期待される光原子時計の

場合には、実用原子時計の安定度に対する要求もますます厳しくなる。現在最も安定な実用標準器の水素メーザーは、 $\sim 1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ (τ : 平均時間) の短期周波数安定度であるが、1日の周波数ドリフトが $\sim 10^{-15}$ である。これは、水素原子と蓄積球の壁との衝突、壁の皮膜の経時変化などに起因する。水素メーザーの短期及び長期安定度を上回る連続運転可能な実用マイクロ波標準器として、真空中の一点に捕獲されたイオンを周波数の基準として用いるイオントラップ方式による

ものが有望である。

しかしながら、イオントラップ方式でのイオンの冷却や光ポンピングのためには紫外域のレーザーが必要となる。特に、質量が大きいためドップラーシフトが小さく、基底状態間の共鳴周波数が約 40 GHz と高いために高性能なマイクロ波標準の実現が期待できる $^{199}\text{Hg}^+$ イオンの場合、冷却光が波長 194 nm (真空紫外) となるため、高出力の可視光レーザーや第 2 高調波発生用の非線形光学結晶などの高価な光学システムが必要であり、技術的難易度も高い。これに対し、紫外域のレーザーを使わずに、冷却原子とイオンの衝突を利用するアイデアがアメリカの Jet Propulsion Laboratory により提案された。これまで、熱原子ビームとイオンとのスピン交換、荷電交換は研究されたが、より長い相互作用時間を得られる冷却原子とイオンの相互作用は、まだ実現されていない。

2. 研究の目的

冷却 Rb 原子ビームとイオンの相互作用によるイオンの冷却、状態選択、Rb とイオンの荷電交換、イオンのマイクロ波の時計遷移の検出を行い、これらの技術原理の実証を行う。そして時計遷移の信号の共鳴線幅、S/N 比の測定から、周波数安定度が $\sim 1 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ の原子時計を開発する。

冷却原子ビーム源では、互いに垂直な 6 方向から Rb 原子の共鳴周波数に対して負離調の冷却用レーザーを照射し、反ヘルムホルツコイルを用いて四重極磁場を印加する。ここで、0.5 mm 程度の穴のあいたミラーを介して冷却用レーザーの一本を照射すると、光による輻射圧のバランスが崩れ、ミラーの穴からフラックス $5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 、平均速度 14 m/s の冷却原子ビームが取り出される (Low Velocity Intense Source: LVIS と呼ばれる)。

冷却原子ビームは光ポンピングされ、その後イオン数 $\sim 10^7$ 個のイオントラップ領域に入る。原子-イオン間の衝突によって、イオンは数秒間のうちに 1 K 程度まで冷却されると期待される。また、原子はイオンの状態選択や状態検出にも寄与する。まず、スピン偏極した Rb(\uparrow) と Hg^+ イオンの間で (i): Rb(\uparrow) + $\text{Hg}^+(\downarrow) \rightarrow \text{Rb}(\downarrow) + \text{Hg}^+(\uparrow)$ 、及び (ii): Rb(\uparrow) + $\text{Hg}^+(\uparrow) \rightarrow \text{Rb}(\uparrow) + \text{Hg}^+(\uparrow)$ の電子スピン交換が行われ、 $\text{Hg}^+(\uparrow)$ に状態選択される。それから、 Hg^+ イオンにはマイクロ波が照射され、その周波数が遷移周波数と一致すると電子スピン反転により $\text{Hg}^+(\downarrow)$ となる。ここで、Rb(\uparrow) + $\text{Hg}^+(\downarrow)$ の方が Rb(\uparrow) + $\text{Hg}^+(\uparrow)$ より相互作用エネルギーが低く両者が接近できるので、 $\text{Hg}^+(\downarrow)$ のみが荷電交換に寄与し、Rb をイオン化する。Rb $^+$ は、質量が大きく違う Hg^+ イオンの場合のトラップ条件と異なるため、トラップ外へ飛び出し二次電

子増倍器で検出される。検出される Rb $^+$ イオンの数を最大化するマイクロ波の周波数を得ることにより、 Hg^+ イオンの遷移周波数を精密に測定できる。

ここで、荷電交換の反応速度は、およそ $T^{5/2}$ (T: 温度) に比例するため、低温になる程イオンと原子の混合状態は長く続き、より効率的にイオンを冷却できる。また、スピン交換の反応速度は $T^{-1/2}$ に比例するので、低温であるほど状態選択の割合は高くなる。

3. 研究の方法

(1) 冷却原子ビームの生成

Rb 原子の LVIS を実現し、高フラックスかつ低速度の冷却ビームを生成する。内部に穴あきミラーを配置した真空チャンバの設計・製作から始まる。そして、100 kHz オーダーの精度で周波数制御された円偏光のレーザーが 6 方向から照射されるように光学系を構成するとともに、四重極磁場用のコイルを配置し、冷却原子ビームを生成する。

(2) イオントラップの開発

本研究では、イオントラップとしてリニアトラップを採用する。伝統的なポルトラップに比べて、冷却された中性原子と相互作用する領域を軸方向に長く取ることができる。また、イオン化された Rb $^+$ を検出するために、イオントラップの周辺に二次電子増倍器などの検出器を配置する必要があるが、リニアトラップはこれらの検出器に対する立体角も大きい。 Hg 原子は温度調整されたオープンより原子線としてトラップ領域に向けて放出され、その一部が電子銃より発せられた電子によってイオン化される。また、時計遷移を観測するために、真空チャンバ内にホーンアンテナにより約 40 GHz のマイクロ波を照射できるような構造にする。

(3) 冷却原子ビームの評価

レーザーの周波数やパワー、及び四重極磁場の勾配などのパラメータに対するフラックス、速度及び速度分布といった冷却原子ビームの性能を定量的に測定する。原子の検出には感度の高い蛍光の観測か、絶対数を評価しやすい共鳴光の吸収測定かを目的に応じて選択する。フラックスの計測は吸収測定法でキャリブレーションしながら蛍光観測によって行う。横方向の速度分布は、共鳴光の吸収量を Charge Coupled Device (CCD) など 2 次元的な画像としてキャプチャーして原子の空間分布を得るイメージング法を用いて測定する。

LVIS は、一点に原子を捕獲して蛍光観測をするために、四重極磁場の中心をミラーの穴の延長線上から故意に外して MOT を行う。それから四重極磁場の中心を所定の位置に戻

してLVISを行う。

(4) イオントラップの評価

冷却 Rb 原子との相互作用を用いずに、 Hg^+ イオンが確実にトラップされているかを定量的に評価するためには、イオンをトラップから引き出して二次電子増倍器などの検出器を用いて測定する方法が有効である。この方法を用いて、Hg オープンの温度、電子銃の条件などを最適化する。

(5) 冷却原子とイオンの相互作用の原理実証

冷却原子ビームをイオントラップに適用し、次の相互作用の原理実証を行う。

- ・ イオンの冷却は、照射されるマイクロ波の吸収線幅によって評価する。イオントラップに捕獲された Hg^+ イオンは、冷却された中性 Rb 原子によって直ちに冷却されるが、十分に冷却されないイオンは、ドップラー広がりのためにマイクロ波の吸収線幅が広がる。
- ・ 二次電子増倍器でイオン化された Rb^+ が検出されれば、荷電交換断面積が分かり、Rb 原子と Hg^+ イオンとの荷電交換が行われたことが確認される。
- ・ 冷却 Rb 原子ビームの一部は、 Hg^+ イオンと荷電交換が起こらないでイオントラップ領域を通過すると予想されるため、通過した Rb 原子のスピンの状態を測定し、Rb のスピン状態が入射した状態から変化していれば、Rb 原子と Hg^+ イオンのスピン交換が行われたと結論付けられる。
- ・ $^{199}\text{Hg}^+$ イオンの時計遷移を観測するために、照射する 40 GHz の周波数を掃引し、イオン化された Rb^+ を計数する。共鳴線幅や S/N 比などの測定から、 $(1/\pi) \times (\text{共鳴線幅}/40 \text{ GHz}) \times 1/(\text{S/N 比})$ が $\sim 1 \times 10^{-14}$ であれば、周波数安定度は $\sim 1 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ と結論付けられる。

MOT から生じる磁場やレーザー光、その他の予測できない要因によって、共鳴線幅や S/N 比の低下を引き起こす場合、本方式の原理実証が実現した直後から $\sim 1 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ の安定度を得ることは極めて困難である。解決策としては、磁場が原因の場合、MOT をイオントラップ領域から遠ざけるか、その領域における余分な残留磁場を遮蔽している磁気シールドの改良や補正コイルの使用などの対処を施すことになる。前者の場合にはイオントラップ領域までの距離が変わるので、それとともに変化する可能性のあるフラックスについて十分に考察する必要がある。また、レーザー光による光シフトが生じる場合、相互作用するときにレーザー光を遮断してその影響を除去するパルス励起による方法も検討する。当初は、市販の二次電子増倍器

を使用し、時計遷移の信号レベルが小さい場合には、検出するイオンの効率を上げるために二次電子増倍器を独自の構造にする。

4. 研究成果

(1) 冷却原子ビーム装置及びイオントラップ装置の設計製作に関しては、イオンを軸上にトラップできるリニアトラップ、及びそれを収納するための真空槽について、次の設計・製作を行った。①多数のイオンをトラップするために、電極をステンレス製の 8 重極構造とした。②イオントラップ電極、オープン、電子銃、及びそれらの配線を共通の電流導入端子付フランジに取り付けた構造にして、真空槽への脱着を容易にした。③イオンとの荷電交換によりイオン化された原子の検出に関して、S/N 比を高くするために、二次電子増倍器を、イオントラップ用電極の後方の Rb 原子の蛍光を検出する部分に取り付け、相互作用から検出までの距離を短くした。

(2) 光ポンピング用レーザーの開発に関しては、Rb 冷却原子を光ポンピングするための光源として、1590 nm DFB レーザーよりファイバー結合導波路型の非線形光学結晶を用いて第 2 高調波の 795 nm (Rb D1 線) を発生する方式を採用した。1590 nm DFB レーザーシステム、温度制御システム、非線形光学結晶の設計・製作を行い、1590 nm の入力約 4 mW で 795 nm の出力約 10 μ W を得た。更に、高出力化を図るために、エルビウム添加光ファイバアンプシステムの設計・製作を行い、出力約 2 mW を得た。

レーザーの安定化に関しては、レーザーのパワー制御、及び周波数安定化を行った。PPLN を透過する基本波 SHG のパワー変動が大きいため、音響光学素子 (AOM) の 1 次光を分岐して、Rb セルの吸収線検出用と制御用の光に分け、パワーの制御を行った。制御ループ全体のゲインは 3~4 倍、PID 装置のゲインは 6~8 倍、積分回路の時定数は 1 秒、AOM のドライブには約 0.5 V の電圧を印加した。これよりパワー変動は、約 1/200 に減少した。また、ロックインアンプによる DFB レーザーの周波数変調、ファンクションジェネレーターによる周波数の掃引により、Rb 原子の一次微分信号を検出して、吸収信号への周波数安定化を行った。その結果、周波数変動を 17 MHz 程度に抑制することができた。

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)

[学会発表] (計 1 件)

① 平野 育、渡部 謙一、池上 健、DFB

レーザーの出力と周波数の安定化、応用
物理学関係連合講演会、2012年3月15
日、早稲田大学（東京都）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 謙一 (WATABE KENICHI)
独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準
研究部門・主任研究員
研究者番号：50358389

(2) 研究分担者

高見澤 昭文 (TAKAMIZAWA AKIFUMI)
独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準
研究部門・研究員
研究者番号：50462833

保坂 一元 (HOSAKA KAZUMOTO)
独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準
研究部門・主任研究員
研究者番号：50462859