

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05238

研究課題名(和文)可搬型光格子時計のための光制御型低速原子線源の開発

研究課題名(英文)Development of a light-controlled cold atomic beam source for a transportable optical lattice clock

研究代表者

安田 正美 (Yasuda, Masami)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長

研究者番号：50322045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：光格子時計によるSI(国際単位系)秒の再定義や、本格的な社会実装のためには、時計の可搬化が必須となる。本研究では、可搬型光格子時計の実現を目指して、光制御型低速イットルビウム(Yb)原子線源の開発を行ってきた。当初は、光誘起原子脱離現象を利用した原子線源を想定していたが、X線光電子分光法等による詳細な調査の結果、超高真空環境下でもYbが速やかに酸化されることを見出した。そこで、酸化Ybに比較的強い紫外線レーザー光を照射することで還元反応を生起し、その結果発生した低速Yb原子を磁気光学トラップにて捕獲することに世界で初めて成功した。

研究成果の概要(英文)：Transportability of the clock is indispensable for the redefinition of the SI (Système International) second and a full-fledged social implementation of optical lattice clocks. In this research, we have developed a light-controlled cold ytterbium (Yb) atomic beam source aiming for a transportable optical lattice clock. At first, we tried to utilize light-induced atom desorption for generating slow Yb atomic beam. But after detailed investigation using techniques such as X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), we discovered that the deposited Yb metals were quickly oxidized even under the ultra-high vacuum condition. Therefore, we irradiated a relatively high-powered ultraviolet laser beam onto the ytterbium oxide sample to induce reduction process. As a result, we succeeded in trapping generated slow Yb atomic vapors by a magneto-optical trap for the first time.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：光格子時計 酸化イットルビウム 光還元反応 低速原子線 磁気光学トラップ 可搬型光格子時計

1. 研究開始当初の背景

東京大学の香取教授により 2001 年に提案された光格子時計については、次世代光周波数標準の有力な候補として、世界中の標準研究所や大学で、熾烈な研究開発競争が繰り広げられている。近年、光格子時計によって達成される世界トップレベルの安定度は、 $10^{(-18)}$ のオーダーにまで到達しており、秒の再定義候補としての重要性が確かなものとなりつつある。

このような状況を背景に、国際度量衡委員会傘下の時間周波数諮問委員会では、秒の再定義を行うために達成すべき条件として、5 つのマイルストーンを設定した。その中の重要なものとして、光時計同士の高精度比較（同種、または、異種原子の比較、並びに、周波数比測定）がある。そのために重要となる課題は、時計本体よりも小さな不確かさでの周波数比較技術の確立である（時計は、その情報を正確に他者に配信して初めて意味を持つ）。現在、国際的な時系を維持するために用いられている、GPS 衛星を利用した周波数比較の不確かさは、 $10^{(-15)}$ のオーダーであり、光格子時計の周波数比較には十分な性能ではない。そこで、目下、盛んに研究されているのが、光ファイバによる周波数比較技術である。但し、この手法の欠点として、比較する 2 地点間の距離が 1,000 km を超えると、光速度の有限性に伴う制御帯域幅制限により、所望の不確かさを達成できないということが挙げられており、GPS 衛星の場合で実現されているような、大陸間周波数比較は現実的なものではない。とりわけ、我が国のようにまわりを海で囲まれている国の場合、光ファイバのような有線による周波数比較は困難なものとなる。

以上の困難を克服するために、可搬型光格子時計の開発が望まれている。このコンセプト自体は、よう素安定化 He-Ne レーザーや Nd:YAG レーザー等の長さ標準器として用いられたものについては、なじみ深いものである。（実際に、長さ標準器の国際比較の場合には、持ち込み比較を行っている。）可搬型の高性能原子時計としては、既にフランス SYRTE の開発した、可搬型セシウム原子泉時計があるが、これは、絶対周波数基準の利用が困難な大学などの機関における周波数測定で威力を発揮してきた。また、ドイツ PTB でも可搬型 Sr 光格子時計の開発が積極的に進められている。（但し、両者ともに、トレーラーでの運搬を前提としており、可搬型という言葉からイメージされる小型・軽量とは言い難い。）

さて、光格子時計は、狭線幅レーザー、光周波数コム、原子冷却・捕獲装置、の 3 つの要素部分からなる。そのうち前 2 者については、すでに可搬化・小型化を目指した研究が盛んに行われている。一方、最後の原子冷却・捕獲装置については、特に原子線源が可搬化への障壁となっており、あまり研究が進

んでいない。従来型の原子線源は、金属蒸気生成のためにオープン中で金属片を 500 程度まで加熱する熱脱離現象を利用しているため、加熱のための莫大な電力消費、真空装置への負担低減のための冷却水の使用、加熱に数時間を要する、などという欠点がある。この欠点を克服し得るのが、光誘起原子脱離 (Light-Induced Atom Desorption: LIAD) 現象の利用である。これは、主にガラス基板に積層した原子表面に光を照射することで原子を脱離させるという、光電効果に類似の現象である。加熱不要、冷却水不要、高い応答速度（脱離光照射の有無に対して、蒸気圧が速やかに追従する）、という長所があり、原子冷却・捕獲装置の可搬化・小型化にとって望ましい性質を持つ。特に、脱離用光源として、高出力青色・紫外発光ダイオードや、半導体レーザーが安価に入手可能となったことも有利である。

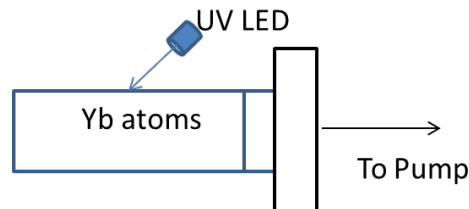


図 1. 光制御型 Yb 原子線源のイメージ

2. 研究の目的

本研究においては、小型・軽量、高速制御性、低発熱等の特長を持つ、光制御可能な低速イットルビウム (Yb) 原子線源の開発を目指して、以下の項目を目的として設定した。

- (1) Yb 原子の光誘起原子脱離 (LIAD) 現象過程の解明
（原子蒸着、脱離光導入、原子蛍光観察装置の開発。）
- (2) 基板の素材の選択、並びに、表面コーティングの最適化。
- (3) 原子脱離速度・脱離量の、照射光強度・波長依存性測定。
- (4) 原子脱離速度の角度分布測定。
- (5) 以上の知見に基づく、光制御型原子線源の設計・開発。

3. 研究の方法

上記の LIAD の詳細な調査のために、まず、石英基板に原子を蒸着した。ここでは、東京農工大学保有の装置に、産総研で開発したイットルビウム原子ビーム装置を導入した。イットルビウム原子が石英基板表面に堆積されたことは、X 線光電子分光 (XPS) によるスペクトル解析から確認できた。そこで得られた重要な知見として、 $10^{(-7)}$ Pa 程度の超高真空環境下における、イットルビウム金属の酸化現象である。イットルビウム蒸着完了から、数時間後という時間スケールで比較的速やかに酸化されるということが、XPS による分析から明らかとなった。これは、純粋なイ

イッテルビウム金属単体を光によって脱離する、という当初の目的には、妨げとなる恐れがある。(酸化膜がイッテルビウムへの光照射の妨げとなる)

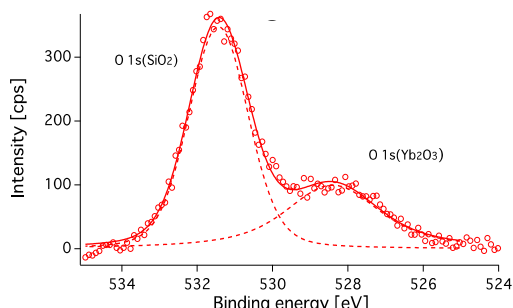


図2 . XPS による酸化イッテルビウム由来のピーク (右側のピーク)

実際にこの状態で、ハロゲンランプからの紫外線を照射してイッテルビウムが脱離されるかどうかを、四重極質量分析器(QMS)を用いて観測を試みたが、期待する信号を得ることはできなかった。このような状況下、英国 Birmingham 大学の研究グループにより、酸化ストロンチウム(SrO)試料に比較的強い紫外レーザー光を照射して誘起される光還元反応により単体の低速 Sr 原子線を発生可能であるとの報告がなされた。これを受けて、多少方針を修正し、酸化イッテルビウム(Yb₂O₃)を光還元させる手法について検討を重ねることとした。まず、このようなことが原理的に可能かどうかを検討するために、酸化還元平衡図(エリンガム図)を利用した。これによれば酸化イッテルビウムの方が、酸化ストロンチウムよりも安定である(酸化物の標準生成自由エネルギーが小さい)ことが判明したが、酸化カルシウム(1942年最初の原子炉のウラン金属製造のため(酸化ウランの還元)に用いられた)ほどではないとのことで、当研究グループの保有するハイパワー紫外半導体レーザーを集光すれば、酸化ストロンチウムと同様に、光還元することが可能であるとの見通しを得た。

酸化イッテルビウム試料としては、バルクイッテルビウム金属試料を大気中に放置して表面を酸化させたもの、また、前出のイッテルビウム蒸着石英基板を大気中に放置して表面を酸化させたものを用意した。それらの試料を、イッテルビウム原子のレーザー冷却・捕獲用超高真空装置内に設置し、光還元反応を試みたが、思わしい結果は得られなかった。ただし、ある特定の条件下では、真空度の上昇や、酸化イッテルビウム試料が白く輝く、といった兆候が得られた。次に、市販の酸化イッテルビウム粉末をアルコールに溶いた試料を、アルミ製治具の上に塗布し、乾燥させて固着させた試料を用いることとした。

4 . 研究成果

上記の酸化イッテルビウム試料に、波長405nmの紫外半導体レーザー光(emission laser)を集光して照射したところ(72mW, ~0.3 mm beam waist)、試料表面が白色に明るく輝くとともに、真空度(圧力)が10倍に増大することが観測された。これは光還元反応が生じ、その結果として、純粋なイッテルビウム蒸気、ならびに、酸素分子が発生したことを示唆している。そこで、Yb原子のレーザー冷却・捕獲を行うために、レーザー光(波長399nm)の導入と、四重極磁場生成(50G/cm)を行った。その結果、上記の光還元反応によって生成されたYbのスピンスピン遷移(波長399nm)を用いた磁気光学トラップへの捕獲に成功した。これは、十分な個数のYb原子が生成されたことを意味すると同時に、その原子線の運動エネルギーが小さい(低速・低温である)ということの意味する。

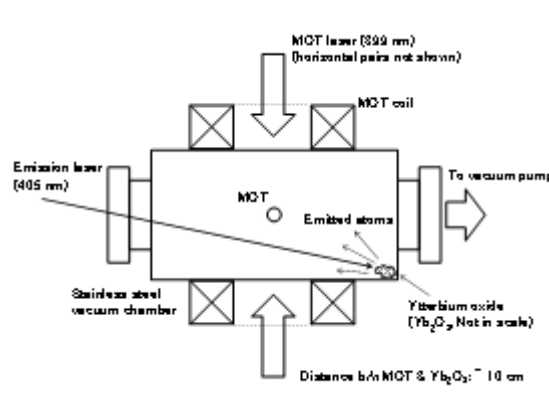


図3 . 酸化Ybの光還元による、低速Yb原子線源の発生と、磁気光学トラップへの捕獲実験配置図

光還元用レーザーを遮蔽すると、Yb原子生成は速やかに停止し、捕獲原子数が減少することが観測された。これはヒーターによる加熱とは異なり、高速応答性を持つ原子線源であることを意味している。

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3件)

- 1) D. Akamatsu, T. Kobayashi, Y. Hisai, T. Tanabe, K. Hosaka, M. Yasuda, and F.-L. Hong, "Dual-Mode Operation of an Optical Lattice Clock Using Strontium and Ytterbium Atoms", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. (査読有) Vol. **65**, No. 6, 1069-1075 (2018).
- 2) T. Tanabe, D. Akamatsu, H. Inaba, S. Okubo, T. Kobayashi, M. Yasuda, K. Hosaka, and F.-L. H

ong, " A frequency-stabilized light source at 399 nm using an Yb hollow-cathode lamp ", Jpn. J. Appl. Phys. (査読有) **57**, 062501-1~6 (2018).

3) M. Yasuda, T. Tanabe, T. Kobayashi, D. Akamatsu, T. Sato, and A. Hatakeyama, " Laser-Controlled Cold Ytterbium Atom Source for Transportable Optical Clocks ", J. Phys. Soc. Jpn.(査読有) **86**, 125001-1~2 (2017).

〔学会発表〕(計 3 件)

1) 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 25 日、東京理科大野田キャンパス)

2) 電気学会・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 (2017 年 10 月 11 日、富山大学)

3) 日本応用物理学会第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (2017 年 3 月 17 日、パシフィコ横浜)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況 (計 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
<https://unit.aist.go.jp/ripm/time-stdg/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安田 正美 (YASUDA, Masami)
産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・研究グループ長
研究者番号 : 50322045

(2) 研究分担者

赤松 大輔 (AKAMATSU, Daisuke)
産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員
研究者番号 : 90549883

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

畠山 温 (HATAKEYAMA Atsushi)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授