

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20356

研究課題名（和文）量子シミュレータの実用化に向けた、高波長安定・長寿命・小型可視光光源

研究課題名（英文）Compact visible light sources with stable wavelengths and long lifetime towards implementation of quantum simulators

研究代表者

高野 哲至（Takano, Tetsushi）

京都大学・理学研究科・特定准教授

研究者番号：80773530

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、高波長安定・長寿命・小型の399nmレーザの開発である。このレーザは、イッテルビウム（Yb）原子の量子シミュレータ・光格子時計の小型化のボトルネックの1つとなっており、本研究が達成されれば、量子シミュレータ・光格子時計の可搬化・実用化が大幅に促進される。本研究では、窒化ガリウム半導体を用いた干渉フィルタ型外部共振器レーザ、あるいは、Yb原子気体を用いたファラデーレーザの2つの方法で上記の目的を達成しようと試みた。結果、前者のレーザの作成に成功し、スペクトル純度を評価したのちに、冷却Yb原子の観測に成功した。後者についても、Yb原子のオープンの作成に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、直接接合された結合ミラーを用いて、可視光の干渉フィルタ型外部共振器半導体レーザを作ることができることを示した。そして、このレーザが冷却Yb原子の観測に使用することができることを示した。従来、可視光半導体レーザを用いて干渉フィルタ型外部共振器レーザを構成すると、寿命が短くなることが知られていた。本研究は、この原因が結合ミラーに光を集光することによって光集塵がおき、ミラーが劣化することにあると考えた。そして、直接接合された結合ミラーの接合面で光を集光して反射させることにより、これを回避できることを示した。この結果は、量子シミュレータ・光格子時計の可搬化・実用化を大きく促進する意義がある。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop a compact 399 nm laser with a stable wavelength and long lifetime. Since this laser is one of the bottlenecks for the miniaturization of ytterbium (Yb) atom quantum simulators and optical lattice clocks, the achievement of this research will significantly facilitate the portability and practical application of quantum simulators and optical lattice clocks. In this study, we attempted to achieve the above goal using two methods: an interference-filter external cavity laser using a gallium nitride semiconductor or a Faraday laser using a Yb atomic gas. As a result, we succeeded in fabricating the former laser, and after evaluating its spectral purity, we succeeded in observing cooled Yb atoms. For the latter, we also created an oven for Yb atoms.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：外部共振器レーザ 可視光半導体レーザ レーザ冷却 量子シミュレーション

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

レーザ冷却されたアルカリ土類原子は、日本の研究グループが世界で初めてボーズアインシュタイン凝縮に成功するなど、世界に先駆けて注目し、固体物理学の量子シミュレータや光格子時計の測地応用など、実用化が期待される物理系である。これは、最外殻電子が2つあることから、スピン禁制かつ  $J=0$  から  $J'=0$  の2重に禁止された非常に細い遷移（時計遷移）を持つことなどの、アルカリ土類原子のユニークな性質によるものである。

しかし、アルカリ土類原子は双極子許容遷移が可視域にあるため、レーザ冷却するためには可視光の光源が必要不可欠であった。可視光発生法には大雑把に2種類あり、ヒ化ガリウム (GaAs) 系の半導体レーザ (LD) の2次高調波を取る方法ではサイズに、窒化ガリウム (GaN) 系の可視光 LD を用いる方法には寿命や波長安定性に、実用化への課題があった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、高波長安定・長寿命・小型の 399nm レーザの開発であった。このレーザは、イッテルビウム (Yb) 原子の量子シミュレータ・光格子時計の小型化のボトルネックの1つとなっており、本研究が達成されれば、量子シミュレータ・光格子時計の可搬化・実用化が大幅に促進される

### 3. 研究の方法

本研究では、窒化ガリウム半導体を用いた(i)干渉フィルタ型外部共振器半導体レーザ、あるいは、(ii)Yb 原子気体を用いたファラデーレーザの2つの方法で上記の目的を達成しようと試みた。それぞれの方法を下記に示す。

#### (1) 干渉フィルタ型外部共振器半導体レーザ

GaAs 系の ECLD では、近年、0.3nm 程度のきわめて狭帯域のバンドパスフィルタと、機械的に安定なキャッツアイ型反射鏡（光を焦点で同じ方向に反射する鏡）を利用し、稼働部を少なくした干渉フィルタ型 ECLD が注目されている。この方法では、1か月以上にわたる冷却アルカリ原子の駆動ができることがすでに実証されている。一方で、GaN 系の LD を用いてこれを構成すると、短寿命となることが複数の研究機関で確認されている。申請者は、この短寿命化が、キャッツアイミラーの反射面が大気にさらされていることによる光集塵にあると考え、貼り合わせたミラーによってこれを回避する独自のアイデアを考案した。すなわち、2枚のガラス基板を、直接接合などの技術で隙間なく張り合わせることで、反射端面を保護する方法である。本研究では、直接接合で張り合わされたミラーによって、このレーザが構成できるかを明らかにする。

#### (2) ファラデーレーザ

根本的にモードホップを抑制する1つの方法として、①のバンドパスフィルタよりもさらに細いバンドパスフィルタを用いることが考えられる。近年注目されているのは、原子の近共鳴で偏光が回転する、ファラデー回転による超狭線幅フィルタを、ECLD に組み込むファラデーレーザと呼ばれる手法で、この方法を用いると、原子の近共鳴でしかレーザ発振しなくなるため、原理的にモードホップが起こらなくなる。本研究では、このレーザのために原子ビームオープンを用いる予定であった。

### 4. 研究成果

本研究では、(1)によって、所望の性能を有するレーザの開発に成功した。まず、共振器ミラーを SABOC (Surface-Activated-Bonded Output Coupler) に置換して干渉フィルタ型外部共振器半導体レーザを構築した。SABOC は、2枚の石英基板を表面活性化接合で貼り合わせたもので、接合面で光を反射することで集塵を防ぐ。この結果、図1に示すように波長安定でイッテルビウム原子に共鳴な 20mW 弱の出力が得られた。次に周波数純度を計測した。まず、光共振器の共振器長を掃引しながら、透過光強度を観測した結果、共振器長が光の波長の整数倍になったところで、周期的に透過光強度が高まるのが観測され、

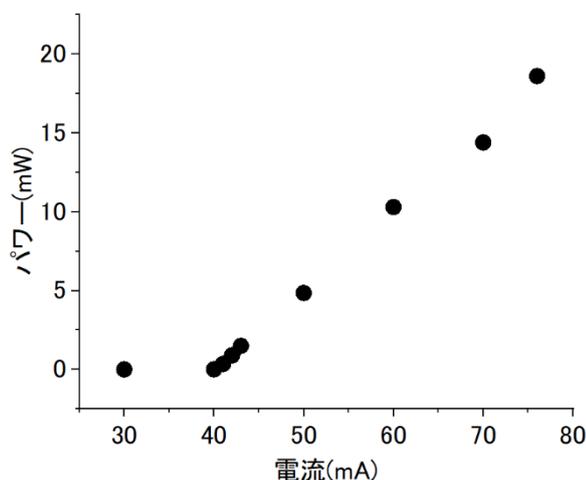


図1 作成したレーザのパワー

単一縦モードで発振しているのが観測された。さらに、この光を Yb 原子のオプトガルバノセルに透過して、透過光強度を観測したのが図 2 である。原子の共鳴において光が吸収されて、光強度が下がっているのが観測された。横軸は光周波数を掃引しており、約 1 GHz のモードホップフリー掃引が達成された。この結果、レーザ冷却された Yb 原子の観測に十分なスペクトル純度が得られたことが分かった。その後、フィゾー干渉計型波計による周波数安定化を行い、レーザ冷却装置へと投入した。ここでは、光ピンセットアレーに捕獲された Yb 原子に対して本レーザによる観測が可能かを検出した。格子状に捕獲された Yb 原子に対して、レーザ光を照射してその発光を EMCCD カメラで観測することを繰り返した結果を図 3 に示す。十分な S/N で原子を観測することができ、本レーザの性能が十分であることが分かった。さらに、更なる高性能化のため、最新の接合法である原子拡散接合をもちいた結合ミラーを製作し、同等の性能を持つことを確認した。また、(2)を行うための原子ビームオープンの設計・製作を行い、原子ビームの発生に成功した。



図 2 オプトガルバノセルによる原子の吸収。

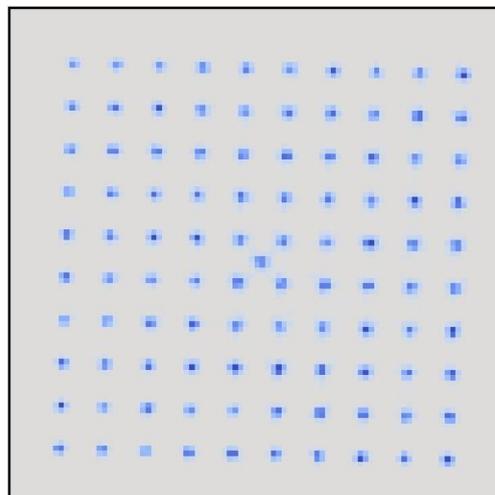


図 3 Yb 原子の発光イメージング

本研究で得られた知見の一部を用いた研究成果が、国際学会誌『Physical Review Letters』に採択され、さらにもう一件の成果を投稿準備中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ishiyama Taiki, Ono Koki, Takano Tetsushi, Sunaga Ayaki, Takahashi Yoshiro	4. 巻 130
2. 論文標題 Observation of an Inner-Shell Orbital Clock Transition in Neutral Ytterbium Atoms	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 153402-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.130.153402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計34件（うち招待講演 2件/うち国際学会 16件）

1. 発表者名 T. Takano; H. Kawase; T. Ishiyama; K. Ono; Y. Takahashi
2. 発表標題 Laser linewidth transfer using an optical frequency comb towards precision spectroscopy of ytterbium atoms
3. 学会等名 Aoki Moonshot PJ Workshop on Frontier of two-electron atoms and cavity QED（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Kusano; Y. Nakamura; I. Okamoto; R. Yokoyama; N. Ozawa; T. Takano; Y. Takasu; Y. Takahashi
2. 発表標題 Development of a 3D Optical Tweezers System Toward Large-Scale Quantum Computing
3. 学会等名 Aoki Moonshot PJ Workshop on Frontier of two-electron atoms and cavity QED（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 N. Ozawa; Y. Nakamura; T. Kusano; R. Yokoyama; I. Okamoto; T. Takano; Y. Takasu; Y. Takahashi
2. 発表標題 Development of a high-power laser source for Rydberg excitation of Yb atoms
3. 学会等名 Aoki Moonshot PJ Workshop on Frontier of two-electron atoms and cavity QED（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Nakamura; T. Kusano; R. Yokoyama; K. Saito; K. Higashi; N. Ozawa; T. Takano; Y. takasu; Y. Takahashi
2. 発表標題 A dual-isotope ytterbium atom array
3. 学会等名 Aoki Moonshot PJ Workshop on Frontier of two-electron atoms and cavity QED (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 石山泰樹; 川瀬北斗; 小野滉貴; 高野哲至; 砂賀彩光; 高橋義朗
2. 発表標題 中性イッテルビウム原子の内殻励起時計遷移の精密分光
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 N. Ozawa; T. Takano; Y. Nakamura; T. Kusano; R. Yokoyama; Y. Takasu; Y. Takahashi
2. 発表標題 Development of a high-power Rydberg excitation laser source for Yb atoms
3. 学会等名 "Rydberg-atom quantum simulators/computers", a DE-JP workshop (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 N. Ozawa; T. Takano; Y. Nakamura; T. Kusano; R. Yokoyama; Y. Takasu; Y. Takahashi
2. 発表標題 Probing Beyond-Standard-Model Physics using microwave transitions in Rydberg atoms
3. 学会等名 "Rydberg-atom quantum simulators/computers", a DE-JP workshop (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Toshi Kusano; Yuma Nakamura; Issei Okamoto; Naoya Ozawa; Tetsushi Takano; Yosuke Takasu; Yoshiro Takahashi
2. 発表標題 Review of Studies on the Rydberg States of Ytterbium Atoms
3. 学会等名 “Rydberg-atom quantum simulators/computers”, a DE-JP workshop (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuma Nakamura; Toshi Kusano; Issei Okamoto; Naoya Ozawa; Tetsushi Takano; Yosuke Takasu; Yoshiro Takahashi
2. 発表標題 Recent progress in the development of ytterbium quantum computer in Takahashi-group
3. 学会等名 “Rydberg-atom quantum simulators/computers”, a DE-JP workshop (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Ishiyama; H. Kawase; K. Ono; T. Takano; A. Sunaga; Y. Takahashi
2. 発表標題 Precision Spectroscopy of an Inner-Shell Orbital Clock Transition in Neutral Ytterbium Atoms
3. 学会等名 International Symposium on Creation of Advanced Photonic and Electronic Devices 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Kusano; Y. Nakamura; I. Okamoto; R. Yokoyama; N. Ozawa; T. Takano; Y. Takasu; Y. Takahashi
2. 発表標題 Development of a 3D Optical Tweezers System Toward Large-Scale Quantum Computing
3. 学会等名 International Symposium on Advanced Quantum Technology for Future 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Nakamura; T. Kusano; I. Okamoto; R. Yokoyama; N. Ozawa; T. Takano; Y. takasu; Y. Takahashi
2. 発表標題 State-Selective Qubit Readout by Shelving to the Metastable State in a Ytterbium Atom Array
3. 学会等名 International Symposium on Creation of Advanced Photonic and Electronic Devices 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小野 滉貴; 石山 泰樹; 高野 哲至; 高須 洋介; 山本 康裕; 田中 実; 砂賀 彩光; 高橋 義朗
2. 発表標題 イッテルビウム原子の精密分光による新物理探索
3. 学会等名 第5回 新方式精密計測による物理・工学的変革を目指す回路技術調査専門委員会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuma Nakamura; Toshi Kusano; Issei Okamoto; Naoya Ozawa; Tetsushi Takano; Yosuke Takasu; Yoshiro Takahashi
2. 発表標題 Controlling nuclear spin qubit of Ytterbium atoms in an optical tweezer array
3. 学会等名 2023 KPS Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshi Kusano; Yuma Nakamura; Issei Okamoto; Naoya Ozawa; Tetsushi Takano; Yosuke Takasu; Yoshiro Takahashi
2. 発表標題 Development of a Parallel Rearrangement System for Large-Scale Quantum Computing
3. 学会等名 Workshop for Advanced Quantum Technology for Future 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Taiki Ishiyama; Koki Ono; Tetsushi Takano; Ayaki Sunaga; Yoshiro Takahashi
2. 発表標題 Observation of an Inner-Shell Orbital Clock Transition in Neutral Ytterbium Atoms toward New Physics search
3. 学会等名 International Seminar Dojo 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuma Nakamura; Toshi Kusano; Issei Okamoto; Naoya Ozawa; Tetsushi Takano; Yosuke Takasu; Yoshiro Takahashi
2. 発表標題 Controlling nuclear spin qubit in an optical tweezer array
3. 学会等名 International Seminar Dojo 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村勇真; 草野透志; 岡本一生; Till Person; Christian Gnad; 小澤直也; 高野哲至; 高須洋介; 高橋義朗
2. 発表標題 ラマン遷移による171イッテルビウム原子の核スピン操作
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会 (2023年)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高野 哲至
2. 発表標題 イッテルビウム原子の精密分光による新物理の探索
3. 学会等名 第二回 冷却分子・精密分光シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 草野透志; 中村勇真; 岡本一生; 小澤直也; 高野哲至; 高須洋介; 高橋義朗
2. 発表標題 中性原子型量子コンピュータの開発状況
3. 学会等名 京都大学研究連携基盤 未踏科学研究ユニット報告会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tetsushi Takano; Koki Ono; Taiki Ishiyama; Ayaki Sunaga; Yosuke Takasu; Yasuhiro Yamamoto; Minoru Tanaka; Yoshiro Takahashi
2. 発表標題 Isotope Shift Measurement of Ytterbium Atoms Towards a Search for New Physics
3. 学会等名 The 2023 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & European Frequency and Time Forum (IEEE IFCS-EFTF 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tetsushi Takano, Hisashi Ogawa, Weiyong Liu, Chiaki Ohae, Masayuki Katsuragawa, and Yoshiro Takahashi
2. 発表標題 Novel tunable light sources for quantum sensors and simulator
3. 学会等名 The international conference on Quantum sensors and tests of new physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koki Ono, Taiki Ishiyama, Tetsushi Takano, Ayaki Sunaga, Yosuke Takasu, Yasuhiro Yamamoto, Minoru Tanaka, and Yoshiro Takahashi,
2. 発表標題 Observation of Nonlinearity of Generalized King Plot in the Search for New Boson
3. 学会等名 The international conference on Quantum sensors and tests of new physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taiki Ishiyama, Koki Ono, Tetsushi Takano, Ayaki Sunaga, Yosuke Takasu, Yasuhiro Yamamoto, Minoru Tanaka, and Yoshiro Takahashi
2. 発表標題 Precise isotope shift measurements and implications for beyond-standard-model and nuclear physics
3. 学会等名 International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taiki Ishiyama, Koki Ono, Tetsushi Takano, Ayaki Sunaga, Yosuke Takasu, Yasuhiro Yamamoto, Minoru Tanaka, and Yoshiro Takahashi
2. 発表標題 Insights into new physics and nuclear physics from precise isotope shift measurements
3. 学会等名 量子クラスターで読み解く物質の階層構造 第8回 クラスター階層領域研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石山泰樹, 小野滉貴, 高野哲至, 砂賀彩光, 高橋義朗
2. 発表標題 イッテルビウム原子の新時計遷移の実験的観測に向けた検討
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023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
---------	---------