

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K13861

研究課題名（和文）表面トラップ上でのイオンと光共振器の強結合系の実現

研究課題名（英文）Toward realization of ion-photon interface on a surface trap

研究代表者

長田 有登 (Osada, Alto)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：90804138

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では表面トラップ上でのイオン-光共振器結合系の実現へ向けて要素技術の開発をお行ってきた。イオントラップ実験系の構築の際に原子イオンの発生手法としてレーザーアブレーションによる原子発生とその光イオン化を採用した結果、表面電極イオントラップとの組み合わせが奏功し単一のイオンのみを決定論的に捕獲できるような条件が存在することを示唆する結果を得た。また、レーザーアブレーションによる原子発生は周囲の汚損が少ない手法であり、光共振器の性能をそこなうりすくが小さいものとしても有望である。さらにこれを推し進め、レーザーアブレーション原子源の系を光ファイバを用いてコンパクトに実現することにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果はイオントラップ量子技術の基礎実験技術に関するものにとどまるが、それだけに今後イオントラップ量子技術において用いられるスタンダードなテクニックとして残り続ける可能性が高い。また、そのファイバーによるコンパクト化はイオントラップ量子技術の工学的側面を推し進めるものであり、かつ光技術を推し進めるものでもあるといえ、今後ますます社会において重要性を増す量子技術の小さくはあるが重要なステップであったと考える。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have developed elemental technologies for realization of ion-optical cavity coupling systems on surface traps. As a result of adopting atom generation by laser ablation and its photoionization as a method of generating atomic ions when constructing the ion trap experimental system, the combination with the surface electrode ion trap worked well, and only single ions were deterministically generated. We obtained results suggesting the existence of conditions that would allow capture in In addition, atom generation by laser ablation is a method that causes little contamination of the surroundings, and is promising as a method that impairs the performance of the optical resonator with little damage. Furthermore, we succeeded in realizing a compact laser ablation atomic source system using optical fibers.

研究分野：量子技術

キーワード：イオントラップ

1. 研究開始当初の背景

イオントラップ量子技術はその量子操作精度の高さから量子計算・量子通信などの次世代の科学技術・社会基盤を担うものとして注目されている。イオントラップ量子技術の抱える課題としてひとつの量子ノードに集約できるイオンのかずに限りがある点が挙げられ、これを量子光接続によって解決するための有望な方法が光共振器とイオンの結合系を利用することである。しかしながら光共振器材料の絶縁体の荷電状態の揺らぎが問題となり技術的困難がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は上記の技術的困難を半導体材料を用いることにより克服し、高安定なイオンと光のインターフェースを表面トラップというイオントラップ量子技術の機能性を大きく向上させるプラットフォーム上で実現することを目標とし、その要素技術の開発を行う。

3. 研究の方法

本研究では光共振器材料として半導体に着目する。導電性の付与といった物性制御や微細加工が成熟している半導体により光共振器材料を構成することで上記の荷電状態の揺らぎの問題の解決を目指し、そのための要素技術の開発を行う。より具体的には以下のとおりである。まず捕獲・量子制御する原子イオンとしてストロンチウム原子を用いる。ストロンチウム原子の双極子許容遷移のひとつに波長 1092nm のものがあるが、この波長においてガリウムヒ素とアルミニウムヒ素の多層膜ミラーが超高反射率のミラーとして働くことが先行研究により示されている。本研究ではさらにこの多層膜ミラーを微細加工しチップ電極上に集積することで表面電極トラップ上の平面ミラーを構成し、直上に凹面ミラーを配置することで微小光共振器を構築する。この微小共振器の領域中に捕獲されたイオンが光共振器と結合する様子を調べるといように研究を進めていく。また、このためのイオントラップ系の開発の途上において光共振器のお損による性能低下を防ぐ手法についても開発する必要がある。

4. 研究成果

まずイオントラップ系の開発について、2021 年度にイオンの捕獲に成功した。このとき原子イオンの発生手法として、周囲の環境の汚損の少ないレーザーアブレーションによる原子発生と原子の光イオン化という手法をとった (図 1)。これにより実際に真空度が著しく低下することなく超極高真空を保ったまま原子イオンを捕獲することが可能であったほか、想定外の成果として単一のイオンのみを 82%という高確率で捕獲できた。このような高い確率での単一イオンの捕獲はランダムかつ独立に原子イオンが捕獲ポテンシャルに入り込むような物理的描写では説明ができない現象であり、トラップ内部でのイオン同士の衝突と RF による捕獲の特性が反映された複雑な過程が寄与する物理的にも興味深いものと思われる。これは数々の先行研究とは異なり、比較的トラップポテンシャルの浅い表面電極トラップの利用と中世原子の光イオン化による原子イオン生成の組み合わせにより可能になったと考察でき、この成果は国際学術論文誌に掲載された [A. Osada and A. Noguchi, Journal of Physics communications 6, 015007 (2022).]。

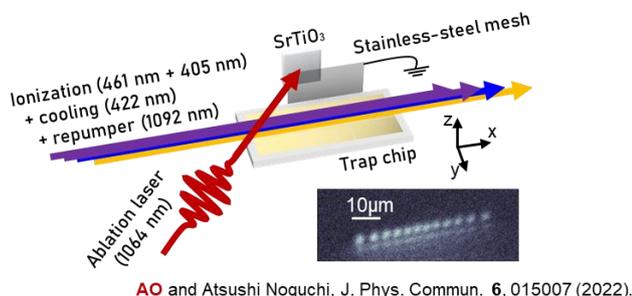


図 1. レーザーアブレーションによるイオントラップ

これをさらに推し進め、レーザーアブレーションによる原子発生を光ファイバを用いて極高真空中でコンパクトなセットアップにより実現する成果をあげた (図 2)。本手法により発生した原子集団の速度分布に関する知見の獲得や光ファイバ端面の損耗や原子源としての持続性に

関して実験に耐えうる性能を有することが立証され、こちらも国際学術論文誌に掲載された[A. Osada et al., Applied Physics Letters 122, 184002 (2023).].

また、転写プリント法による半導体ミラーの集積に向けて、半導体ミラーの微細加工による宙吊り構造の作製を行うことを目標として開発を進めてきた。まず、考案したプロセスフローは次のようになる。まず80nmのGaAs層と92nmのAlAs層を交互に50ペア積層した多層膜が波長1092nmにおいて反射率99.9999%を達成可能であることを電磁界計

算により確かめ、多層膜構造をGaAs基板上のAlAsの3 μ m厚の犠牲層の上に成長した基板を調達した。紫外線リソグラフィーによりマスクパターンを形成し、反応性プラズマエッチングにより半導体多層膜層をパターニングする。この時点で短冊状となった半導体ミラーをもう一度フォトリソで埋め込み、再度の紫外線リソグラフィーにより短冊部分だけを覆うような保護膜を形成する。次にフッ酸によりAlAs犠牲層を除去することで短冊状の半導体ミラーが宙吊りとなった構造体を作製する。レジストによる埋め込みの歩留まりが悪いものの、実際に作製した宙吊りの半導体ミラーをシリコンゴムで拾い上げ、トラップチップに張り付けることもできた。しかしながらレジストの残滓と思われる有機残留物の除去が非常に困難であった。これに起因してか、転写した半導体微小ミラーによって光共振器を構築してもその性能はフィネスにして500と不満足なものであった。この有機物残滓の除去方法として有機溶剤による除去、ピラニア溶液による除去、紫外線を利用したオゾンプラズマクリーニングによる除去などを試したが、溶液ベースの手法は除去しきれないあるいは気泡発生による微小ミラーの損壊といった理由で、ガスベースの手法は除去レートが非常に遅く多層膜ミラーの橋が酸化してしまい、ミラーの帯域に著しい変化が生じるなどして有効打にはならなかった。また、微小共振器作製のためにファイバ端を凹面加工したファイバミラーと呼ばれるものをOIST高橋研究室から提供していただく予定であったが、高橋研究室での提供開始が遅延した結果として既存の曲率半径の大きなファイバミラーを利用して性能テストを行っていた。これにより微小共振器の阪大耐ミラー側でのビームサイズは微小ミラーの幅よりも十分に小さい状況にすることが難しく、また、サイズが大きめの微小ミラーの作製も試みたが、歩留まりの悪さ・有機物残滓のデバイス面積に比例した増加から微小共振器としてテストするにいたらなかった。

今後は次善の策として半導体の多層膜基板の微細加工および転写ではなく多層膜基板自体に電極を形成することで半導体製の多層膜ミラーを表面電極トラップに一体にして構成する手法を試す。この手法であれば微小ミラーを用いる際のトラップポテンシャルの並進対称性の担保についての懸念が解消されるほか、不純物ドーピングによる導電性の調節も微小ミラーと同様に可能である。さらにミラー端面の酸化による性能劣化を懸念する必要のない手法である。現在はトラップ用の電極構造を半導体多層膜基板上に形成するためのプロセスフローを確立し(図3)、このチップへの電圧印可や真空環境への導入、微小共振器の構築によるミラーとしての性能評価、そしてイオントラップと微小光共振器の結合系の実現を目指して開発を進めている。本研究開発期間に転写プリント法による半導体微小ミラーの集積が容易でないことや代替案としての上記の手法を見出し、さらにそれと並行してイオントラップ系の構築、光共振器が共存しやすいような汚損の少ない原子発生・イオン捕獲手法の開発を行うことができ、研究基盤の確立に関して大きく前進できた。

✓ Fiber-pigtailed atom source

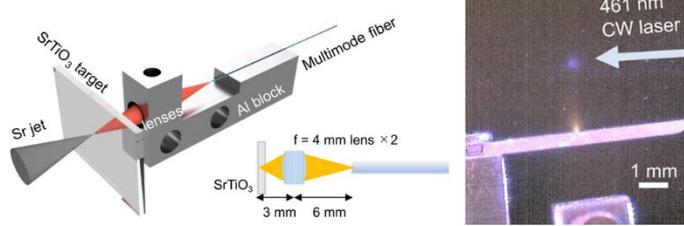


図2. 光ファイバ射出レーザーアブレーションによる原子源



図3. 半導体ミラー上に作製されたイオントラップ用電極パターン

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Osada Alto, Noguchi Atsushi	4. 巻 6
2. 論文標題 Deterministic loading of a single strontium ion into a surface electrode trap using pulsed laser ablation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics Communications	6. 最初と最後の頁 15007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2399-6528/ac4b4a	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 -

1. 著者名 Osada A., Tamaki R., Lin W., Nakamura I., Noguchi A.	4. 巻 122
2. 論文標題 Compact strontium atom source using fiber-based pulsed laser ablation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 184002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0146658	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 長田有登, 野口篤史
2. 発表標題 レーザーアブレーションによる表面電極トラップへのイオン導入
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長田有登, 野口篤史
2. 発表標題 表面電極トラップ上のcavity QED系の実現に向けた微小ミラーの作製
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉木隆太, 野口篤史, 長田有登
2. 発表標題 ファイバ導波パルスレーザを用いた小型原子源の開発
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Alto Osada, Rekishu Yamazaki, Atsushi Noguchi	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 298
3. 書名 Introduction to quantum technologies	

1. 著者名 長田有登, やまざきれきしゅう, 野口篤史	4. 発行年 2023年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 250
3. 書名 量子技術入門	

〔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
---------	---------