

研究終了報告書

「原子イオン集積量子光回路による究極の量子技術基盤の創出」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：長田 有登

1. 研究のねらい

近年脚光を浴びている量子計算、量子通信のために超伝導量子回路や原子イオン、半導体量子ドット、光子といった様々な物理系がそれぞれの長所をもって有力とされ研究されてきた。とくに光子との相性の良い物理系として半導体量子ドットと原子イオンの系を比較すると、前者は光子への量子変換は得意だが情報単位である量子ビットの均一性が課題であり、後者は量子ビットの均一性は原理的に全く問題とならないが光子への量子変換に技術的困難があるといったように相補的である。本研究では、イオントラップ量子技術と半導体フォトニクスとの融合によってこれらの技術群が欠点を補いあい、イオン・光インターフェースや光回路が一体となったイオントラップのような量子技術の新たな技術基盤を創出することを大きな目標とする。その中でもチャレンジングではあるがインパクトの大きな課題として半導体微小ミラーを用いたファブリー・ペロー共振器と原子イオンが結合したイオン・光インターフェースの実現を主たる目標に据え、新たな基盤技術群の創出を行う。

2. 研究成果

1) 概要

研究期間内においては、「1. 研究のねらい」において述べたような目標の実現に向けて実験系のゼロからの立ち上げを行った。具体的には、主たる目標である半導体微小ミラーを用いたファブリー・ペロー共振器と原子イオンが結合したイオン・光インターフェースの実現に向けて、大きく分けて①イオントラップの実現、②半導体微小ミラーを用いたファブリー・ペロー共振器の開発をそれぞれ行い、それらを組み合わせてイオン・光インターフェースとするという手順で進めてきた。まず①イオントラップの実現に関しては研究開始から1年半で迅速にイオントラップ系を立ち上げ、原子イオンの表面電極チップを用いた捕獲に成功した。このときに、真空槽内の汚損や熱負荷の大きな電熱線と金属単体からなるオープンではなく短時間の高強度パルス照射により汚損と熱の問題を回避できるレーザーアブレーションの方法を採用した。その結果、単一パルス当たりにより単一イオンのみを捕獲することに成功し、その確率は82%と決定論的で高速な単一イオンの捕獲の先鞭をつけた [A. Osada and A. Noguchi, J. Phys. Commun. **6**, 015007 (2022)]。これを発展させ、レーザーアブレーションをファイバ導波したナノ秒レーザーにより行うことで実験系の複雑化を避けコンパクトかつ簡便に原子源を実装できる系を考案し、その動作実証を行った (論文投稿準備中)。これはさきがけ領域会議における質疑から着想したものである。②の半導体微小ミラーを用いたファブリー・ペロー共振器の開発については半導体プロセス開発により厚さ $8\ \mu\text{m}$ の半導体多層膜を微細加工する工程をまず開発し、その微小ミラーを転写プリント法により金属電極上に転写することに成功した。この集積された微小ミラーと光ファイバ端を凹面加工しミラー製膜したファイ

バミラーを用いて微小共振器を作製し、フィネスにして 500 程度の性能を持つファブリー・ペロー共振器の作製に成功した。現在は更なる性能向上のための微小ミラー構造や洗浄方法の改善を試みている。

2) 詳細

研究期間内においては、「1. 研究のねらい」において述べたような目標の実現に向けて実験系のゼロからの立ち上げを行った。具体的には、主たる目標である半導体微小ミラーを用いたファブリー・ペロー共振器と原子イオンが結合したイオン・光インターフェースの実現に向けて、大きく分けて①イオントラップの実現、②半導体微小ミラーを用いたファブリー・ペロー共振器の開発をそれぞれ行い、それらを組み合わせてイオン・光インターフェースとするという手順を進めてきた。以下これらについて詳述する。

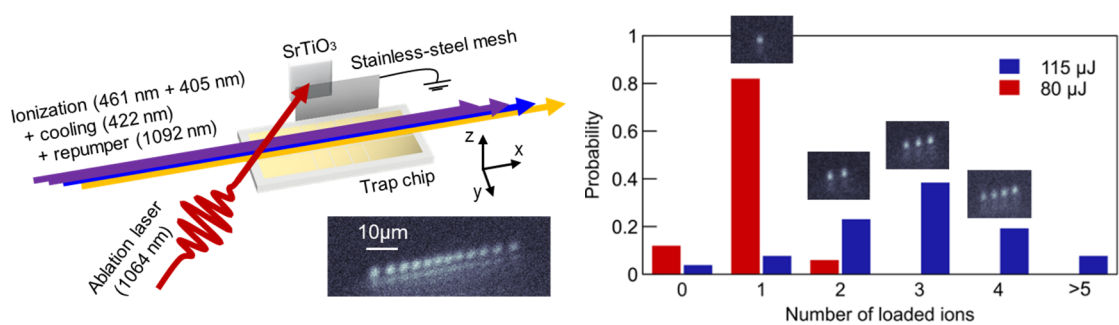
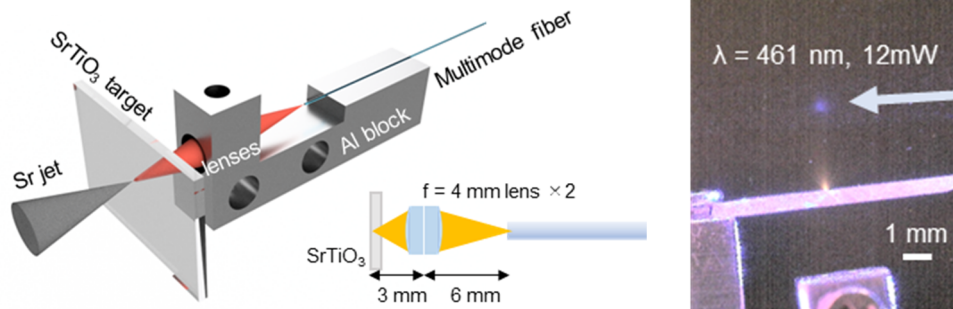


図 1. 表面電極チップによるイオントラップの実現 (左) とレーザーアブレーションによる決定論的単一イオン捕獲の実証 (右)

まず①イオントラップの実現に関しては研究開始から 1 年半で迅速に実験室及びイオントラップ系を立ち上げ、原子イオンの表面電極チップを用いた捕獲に成功した (図 1 左)。用いた原子イオンとしてはストロンチウムイオンを選定したが、これはストロンチウムイオンの波長 1092 nm の光学遷移を有し、ガリウムヒ素ベースの半導体多層膜が高性能なミラーとして利用できるほか、イオン・光インターフェースから取り出した光子をそのまま量子情報科学実験に用いることができる程度にはファイバによる光学ロスが小さいという利点を鑑みてのことある。イオントラップ実現の際に、真空槽内の汚損や熱負荷の大きな電熱線と金属単体からなるオープンではなく短時間の高強度パルス照射により汚損と熱の問題を回避できるレーザーアブレーションの方法を採用した。その結果、単一パルス当たり単一イオンのみを捕獲することに成功し、その確率は 82% と決定論的で高速な単一イオンの捕獲の先鞭をつけた [A. Osada and A. Noguchi, *J. Phys. Commun.* **6**, 015007 (2022)] (図 1 右)。これを発展させ、レーザーアブレーションをファイバ導波したナノ秒レーザーにより行うことで実験系の複雑化を避けコンパクトかつ簡便に原子源を実装できる系を考案し、その動作実証を行った (図 2)。これはさきがけ領域会議における質疑から着想したものであるが、ファイバは 100000 回以上のパルスレーザー照射に耐える、レーザー照射した基板の出射側でアブレーションが引き起こせる、さらに発生した原子の蛍光を詳細に調査することで発生した原子の温度や平均速度などがわかるなど工学的にも科学的にも興味深く、

Appl. Phys. Lett.誌に論文が掲載された。



②の半導体微小ミラーを用いたファブリー・ペロー共振器の開発についてはまず半導体
図2. ファイバ導波パルスレーザを用いた原子源（左）とその動作実証（右）

プロセス開発により厚さ $8 \mu\text{m}$ の半導体多層膜を微細加工する工程を開発する必要がある。これを紫外光リソグラフィ、ドライエッチング、位置合わせ紫外光リソグラフィおよびウェ

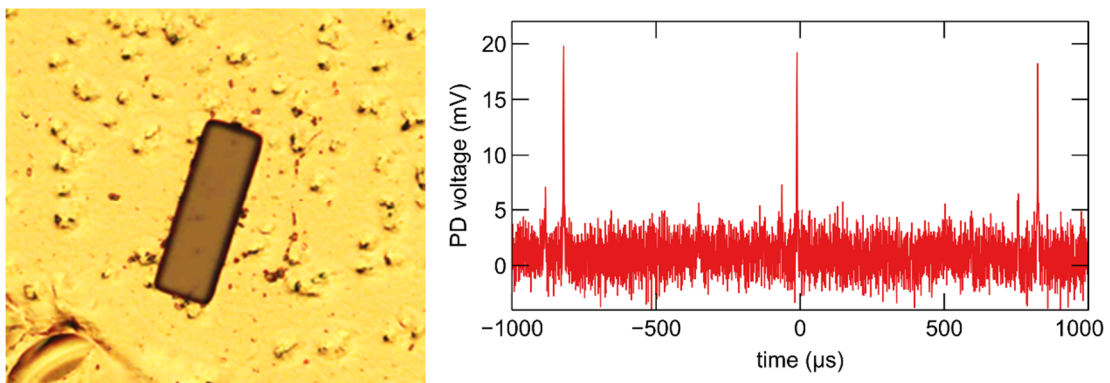


図3. 金電極上に転写された半導体微小ミラーの光学顕微鏡像（左）、およびその半導体ミラーとファイバミラーを用いて作製した微小共振器のスペクトル（右）。周波数を掃引しているため横軸は時間になっているが共振を示すピークの間隔は 1 THz 程度。

ットエッチングにより遂行し、実際に半導体微小ミラーの作製及びその微小ミラーを転写プリント法により金属電極上に転写することに成功した（図3左）。この集積された微小ミラーと光ファイバ端を凹面加工しミラー製膜したファイバミラー（当初予定していた OIST 高橋研からの供給が遅れたため、既存のものを使用）を用いて微小共振器を作製し、フィネスにして 500 程度の性能を持つファブリー・ペロー共振器の作製に成功した。これは目的であるイオン・光インターフェースによる高効率な量子変換には不十分な性能であるが、別途行った実験からフィネスの向上のためには半導体ミラーの構造をより大きなものにする事、および半導体ミラーからフォトリソグラフィを除去する際のレジスト残滓をなるべくきれいに取り除くことが重要であることが示唆されている。現在は更なる性能向上のための微小ミラー構造や洗浄方法の改善を試みている。

また、副次的に進めていた光回路一体型イオントラップ、即ち光学定盤上のレーザー配送・照射系をすべて光ファイバとそれに接続された光回路に置き換えるというテーマに関して少々興味深い展開が始まりつつある。このテーマにおいては通常イオントラップに用いる電極チップ内にフォトニクスを集積するのが常であったが、トラップに用いる RF 電場が少なく見積もっても 10 Vpp 程度あり、かつその RF がすべてチップ内で消費されることによる熱生成があるためアクティブ光素子や単一光子検出器の集積に困難をもたらしていた。私は本研究のテーマの一つとしてこれを解決する方策を考えており、折しもフリップチップ集積

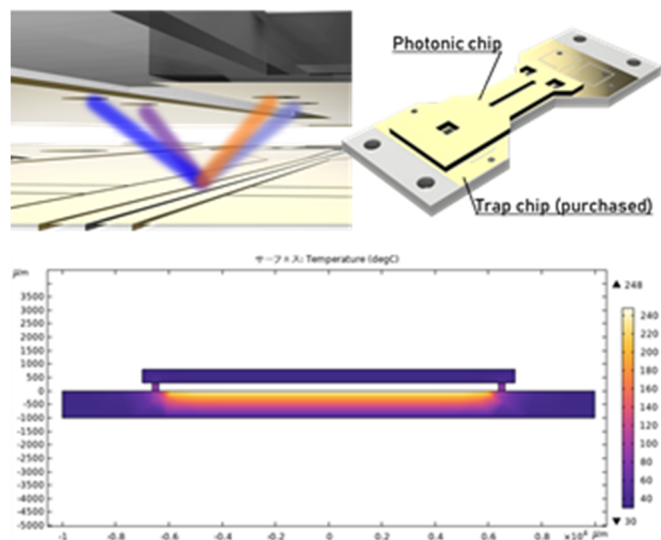


図4. フリップチップ型光回路一体イオントラップの概念図(上)とフリップチップ基板上面と下面が熱アンカーされた際の温度分布(下)

によりイオントラップの電極とフォトニクスを異なる二枚のチップに配置するという方法を着想した(図4上)。これによれば単純な $1\ \mu\text{m}$ の金薄膜でフォトニクスを保護するだけでも RF 電場の遮蔽効果が振幅にして 40 dB 程度期待できるほか、適切な熱アンカーにより RF の消費による熱生成の問題にも対処できるという利点がある(図4下)。これを実証するために九州大学横山研究室と密に連携し、電気光学位相変調器を我々のトラップチップにフリップチップ集積し、実際に大きな RF 電圧が存在する状況下で電気光学位相変調器の性能を評価する方向に発展している。現在実際に横山研究室製の電気光学位相変調器チップが送られてきたところであり、これからその実証に取り組んでいく。上手くいった暁にはこのフリップチップ方式の有用性の訴求のために論文としてまとめ、アクティブ素子のイオントラップへの組み込みへの先鞭をつけたい。

3. 今後の展開

さきがけ研究機関内において、イオントラップ量子技術における最重要課題であるイオン・光インターフェースの実現には残念ながら至らなかったが、①イオントラップの実現は完遂し、②半導体微小ミラーを用いたファブリー・ペロー共振器の開発については基本的なプロセスは開発を完了しあとはその最適化による性能向上を残すのみとなった。

折しも 2022 年 5 月より私が課題推進者として進めるムーンショット型研究開発プロジェクトが開始し、高橋優樹プロジェクトマネージャー (OIST 准教授) のもとでさきがけで開始した半導体ミラーを用いたイオン・光インターフェースの開発と光回路一体型イオントラップの開発のどちらも進めていくことができる運びとなった。さらに、さきがけでイオントラップの研究者として実質独り立ちさせていただいた結果、2022 年 10 月より新たに始まった永山翔太プロジェクトマネージャー (慶應大学特任准教授) のもとでも私を課題推進者としてプロジェクトが立ち上がり、イオントラップ量子ノード (数量子ビットの量子コンピュータ) を光接続しテストベッドにおいて利用するプロジェクトがスタートした。博士研究員をそれぞれのプ

プロジェクトで雇用しつつ、今後数年間でこれらのプロジェクトについて成果をあげていきたいと考えているが、とくに今後 10 年スパンで永山プロジェクトの推進課題において構築したプリミティブなイオントラップ量子ノードを高橋プロジェクトで開発する光インターフェースや光回路一体型イオントラップで順次アップグレードしていくことを想定しており、かつ開発されたイオントラップ量子ネットワークデバイスの社会実装実験・教育利用などを量子インターネットタスクフォース (QITF、長田も 2022 年に参加) を基軸に展開していきたいと考えている。30 年後には実用的な量子インターネットが初期的な形であっても社会実装されるよう、今後もこれらの研究に邁進したい。

4. 自己評価

研究目的の達成状況を鑑みると、字義通りの達成はかなわなかった。しかしながら、イオントラップ実現の過程で行ったレーザーアブレーションによる高確率での単一イオン捕獲ならびにこの系のファイバーモジュール化については今後の冷却原子量子技術分野のスタンダードな手法となりうるものであり、基盤技術の全身に寄与することはできたのではないかと考える。研究執行状況としては上記の予定外の成果を得るための経費も込みで全額執行済みであり、研究目的の完遂には至らなかったものの着実に地盤固めを行い、研究目的達成へと邁進することができた。また、さきがけ研究者としての活動成果を通してイオントラップ量子技術の担い手の一人として量子技術分野に認知され、さきがけ研究終了後もさきがけ研究のテーマ・成果・研究体制をより発展させることのできるプロジェクトに抜擢していただいた。それらいくつかのプロジェクトの発展は量子インターネットタスクフォースを基軸とする社会実装実験にも発展させることを視野に入れており、長期的な目で見て私のさきがけ研究は将来社会に現れる量子技術の基盤を多少なりとも構築する、あるいはそのための素地を作ることができたものと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:3件

[1] **A. Osada** and A. Noguchi, "Deterministic loading of a single strontium ion into a surface electrode trap using pulsed laser ablation" *Journal of Physics Communications* 6, 015007 (2022).

レーザーアブレーションによるストロンチウム原子発生とその光イオン化、そして表面電極イオントラップにおけるレーザー冷却と捕獲を行う際に、ある条件下では単一の原子イオンのみが捕獲される確率が82%と非常に高くなることを示した論文。イオントラップの基礎技術の高度化によるより発展した実験の自動化、効率化につながると考えている。

[2] **A. Osada**, K. Taniguchi, M. Shigefuji and A. Noguchi, "Feasibility study on ground-state cooling and single-phonon readout of trapped electrons using hybrid quantum systems" *Phys. Rev. Research* 4, 033245 (2022).

原子イオンにかわる新規量子ビットとして注目される真空中に捕獲された電子について

て、その運動状態を原子イオンにより量子レベルで読み出しかつ基底状態まで冷却することができることを示した論文。イオントラップ量子技術が孤高のものではなく、真空中の電子やひいては超伝導量子回路ともハイブリッド化できることを示した。

[3] **A. Osada**, R. Tamaki, W. Lin, I. Nakamura, and A. Noguchi, "Compact strontium atom source using fiber-based pulsed laser ablation" *Appl. Phys. Lett.* 122, 184002 (2023).

[1]で実証したレーザーアブレーションによる原子発生をファイバ導波したパルスレーザーで行い、コンパクトかつ超高真空対応のデバイスとして作製、動作実証したもの。イオントラップ量子技術の光学系を全光回路化・モジュール化するにあたり高強度パルスレーザーは小型の集積化が難しかったが、本成果はそれを極力小型化したものである。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数:0 件(特許公開前のもも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

(招待講演) 長田 有登, "光回路技術との融合によるイオントラップ量子技術の発展と展望," 第3回超高速光エレクトロニクス研究会 (2022).

2019.12 井上科学振興財団 井上研究奨励賞受賞

2019.11 日本物理学会若手奨励賞受賞

2022.12 Springer 社より"Introduction to quantum technologies", Alto Osada, Rekishu Yamazaki, & Atsushi Noguchi 刊行

2023.4 東京大学出版会より長田・やまざき・野口著「量子技術入門」刊行