



## ムーンショット目標 6

2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる  
誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現

# 実施状況報告書

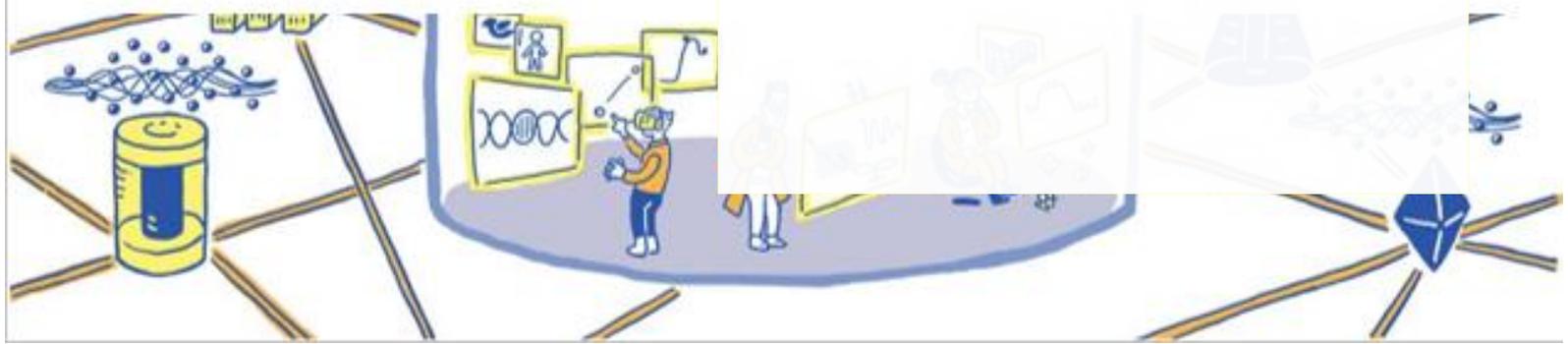
## 2022年度版

イオントラップによる光接続型誤り耐性

量子コンピュータ

**高橋 優樹**

沖縄科学技術大学院大学 量子情報物理実験ユニット



## 研究開発プロジェクト概要

複数のイオントラップを光で連結する新しいアイデアにより、従来技術では達成できない、大規模化が容易なイオントラップデバイスを開発します。それにより、2050年には、大規模な量子コンピュータの実現を目指します。

[https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/63\\_takahashi.html](https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/63_takahashi.html)

## 課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
高橋 優樹	沖縄科学技術大学院大学 量子情報物理実験ユニット	准教授
野口 篤史	東京大学 大学院総合文化研究科	准教授
豊田 健二	大阪大学 量子情報・量子生命研究センター	教授
早坂 和弘	情報通信研究機構 未来 ICT 研究所	副室長
長田 有登	東京大学 総合文化研究科 先進科学研究機構	助教
杉山 和彦	京都大学 大学院工学研究科	准教授
鳴海 一雅	量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 量子機能創製研究センター	プロジェクトリーダー
横山 士吉	九州大学 先導物質化学研究所	教授
長谷川 秀一	東京大学 大学院工学系研究科	教授
土師 慎祐	大阪大学 量子情報・量子生命研究センター	特任准教授

## 1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

### (1) 研究開発プロジェクトの概要

複数のイオントラップを光で連結する新しいアイデアにより、従来技術では達成できない、大規模化が容易なイオントラップデバイスを開発する。それにより、2050年には、大規模な量子コンピュータの実現を目指す。

### (2) 研究開発プロジェクトの実施状況

当該年度からの新規課題推進者においても実験を開始した。研究開発課題毎に実施状況の概要を次に述べる。

研究開発課題 1-1 では、令和3年度に開発したイオントラップ内で実際にカルシウムイオンを捕獲・観察することを目標に実験を進めた。真空装置、レーザー光学系、撮像装置を準備し、装置の不具合に対処しながら最終的に単一イオンを捕獲し、撮像することに成功した。バリウムイオンを用いた実験では、真空チャンバー内に配置した波長 493nm 用の光共振器を長期間にわたって測定し、共振器フィネスが変化しないことを確かめた。また、カルシウムイオン用のトラップを下敷きとしてその改良版の開発を進めた。導電性透明薄膜の研究に関しては、蒸着の際のパラメータを振って、膜質の評価を行った。研究開発課題 1-2 では、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作製のためのプロセス開発を実施した。研究開発課題 2-1 では、昨年度用意された冷凍機を使ったヘリウム温度におけるイオントラップの動作実証を目指した。そのためのレーザー冷却光学系・イメージング系を構築した。また、MW 超伝導回路の研究を前倒しに初め、共振器の最大印加電流を決める要因を解析し、ニオブ膜の質の改善によって電流量が増える可能性があることを示した。研究開発課題 3-1 では、紫外光ビームによる振動モード間のビームスプリッター相互作用の忠実度向上にむけて、振動状態コヒーレンスの評価を行った。熱浴エンジニアリングにより振動状態におけるスクイズド状態の生成実験を行い、スクイズド状態の特徴を反映するブルーサイドバンドラビ振動を観測した。研究開発課題 4-1-1 では、高性能イオントラップ作製・評価技術の確立を目標として(1)イオントラップ作製体制の拡充、(2)平面型イオントラップの性能改善と評価実験、(3)立体型イオントラップの性能検証とトラップ実証実験、(4)イオントラップ評価システムの性能向上、に関する研究開発を実施した。また、立体型イオントラップの光接続型イオントラップ量子コンピュータへの応用を加速するため、(5)立体型イオントラップへの光インタフェースの実装に関する研究開発を当該年度から追加で実施した。研究開発課題 4-1-2 では、NICT 早坂和弘 課題推進者のもとで設計され開発される立体型イオントラップを用いて、 $^{171}\text{Yb}^+$ の時計遷移分光をおこなう。当該年度においては、単一  $\text{Yb}^+$ をラム・ディッケ領域へ再現性よく閉じ込めるための条件を明らかにすることを目標とした。そのために、 $^{174}\text{Yb}^+$ を用いて波長 411 nm  $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$  遷移の単一イオン分光をおこない、到達温度測定を進めた。確立した冷却技術の再現性確認や 2 台のトラップ装置の利用による研究の加速、さらに、同位体シフトの測定を視野に入れて、2 台目の従来型 3 次元 RF トラップ装置を動作させた。また、NICT から導入予定の立体型イオントラップ 01 号機を動作させるため、必要な装置の整備を開始した。研究開発課題 4-1-3 では、線形 Paul トラップによる  $\text{Ba}^+$ のトラップシステムを構築した。さらに、高性能汎用イオントラップを

搭載する真空パッケージの仕様検討を進めた。研究開発課題 4-2 では、イオントラップ量子コンピュータのクラウド化のために、前年度行なった設計および調達した物品をもとに、レーザー冷却に用いるイオントラップ装置のインストール、真空装置のセットアップ・ベーク、冷却用光学系の設置、誘導ラマン励起用光学系の設置、誘導ラマン励起用ピコ秒パルスレーザーの繰り返し周波数安定化、冷却用半導体レーザー光源の周波数ロックを行った。平面型トラップにおけるイオンの直線輸送のための印加電圧を導出した。ジャンクション構造をもつ平面型トラップの構造を検討した。多数個2次元配列のためのシミュレーションを行った。研究開発課題 5-1 では、イオントラップデバイス内にイオン励起用レーザー光を導入するため多チャンネル光導波と光ファイバーと接合させる光インターコネクト技術の研究を開始した。SiN 導波路と光回折素子を作製し、パッシブ・コントローラ部として適応可能であるか評価した。また、アクティブ・コントローラ部に相当する位相変調器を開発するため、薄膜ニオブ酸リチウム導波路を用いた光変調器の作製および特性の解析を実施した。研究開発課題 5-2 では、イオントラップに向けた光回路素子の検討と電磁界シミュレーションを用いた設計・試作および光学評価を行った。また九州大学横山教授(5-1)と連携し多波長対応の光導波路の設計を行い、デバイステストを開始した。研究開発課題 6-1 では、イオントラップ装置の微細電極設計にあたり、数値計算を行うことができる電場解析ソフトを精査し選定した。そのソフトを用いて、製作可能な微細電極技術を踏まえて、ジャンクション電極の具体的な形状を検討した。捕獲イオンは、Ca と Sr イオンを対象とし、捕獲・操作を行うための実験装置の立ち上げに向け、真空系、電場駆動系、観測系、光学系、レーザー光源系などの準備を行った。研究開発課題 7-1 では、単一 Sr<sup>+</sup>イオンを安定的に三次元リニアトラップに捕獲するための装置デザインおよび開発を実施した。加えて中性原子トラップ装置の設計も行い、必要となる真空装置を概ね準備することが出来た。

### (3) プロジェクトマネジメントの実施状況

代表機関の沖縄科学技術大学院大学(OIST)に設置された PM 支援チームでは、事務全般の統括管理、データマネジメント、ウェブサイト構築と管理、知財戦略、最新研究動向の調査、プロジェクトに係る報告書などの取りまとめ支援、プロジェクト間連携の窓口などを実施している。当該年度の実施状況としては、研究開発プロジェクトの進捗状況を把握するために、課題推進者および一部の研究参加者を含めた課題推進者会議を OIST で開催した。またアウトリーチ活動では、目標 6 の人材育成の一環として、Q-LEAP 量子技術教育プログラムとの共同でサマースクールを OIST と近隣のホテル会場で開催した(令和 4 年 9 月 23~30 日)。データマネジメントに関する取組では、GakuNin RDM を利用し、研究データを各課題推進者と共有することから始めた。当該年度のプロジェクトマネジメントの実施状況は、概ね計画書に沿って進めることができた。

## 2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

### (1) 研究開発項目1:イオントラップの量子光接続に関する研究開発

#### 研究開発課題1:微小光共振器一体型線形イオントラップの開発

当該年度実施内容:

### (1) 微小光共振器一体型イオントラップの開発

今年度は令和3年度に選択的レーザーエッチングの手法を用いて作製したイオントラップを真空槽内に導入して、イオンの捕獲・撮像を目指した。当初は、真空装置の複数個所で真空漏れが発生し、その対応と解消に追われた。同時に、イオン化およびレーザー冷却用のレーザービームの分配、音響光学素子を使った各ビームのスイッチング・変調機構の整備を行った。加えて、波長計を用いたレーザー波長安定化のためのシステムも構築した。イオンを撮像するための光学系に関しては、使用予定だったリエントラント型の真空窓が真空漏れを起こし、通常の真空窓を使わざるを得なかったため、イオンと対物レンズの距離が大きくなり、達成できる集光効率が大幅に低下した。撮像光学系を一から見直し、組み合わせレンズを自前で設計することにより、市販の対物レンズを使った場合に比べて集光効率を約一桁向上させることに成功した。以上のような準備の結果、カルシウムイオンを捕獲、観測することに成功した。個別のイオンを一個、二個、三個とトラップし、CMOSカメラ上で分離して撮像することができた。rf電極上にdc電圧を重畳し、イオンのマイクロ運動をおおむね補正した。これに関しては、イオンの蛍光とrf周期の相関信号を用いる手法により正確に補正を行う必要がある。これを行うためのFPGAベースのデバイスを作製した。以上のような研究の進捗により微小光共振器一体型イオントラップでのイオンの安定なトラップは達成されたと言える。

### (2) バリウムイオンを用いた共振器 QED 実験

バリウムイオンの共振器 QED には、バリウムイオンの波長で動作する高性能な光共振器が欠かせない。我々は令和3年度からこれを検証するための実験に取り組んできた。波長493nmで共振する光共振器を $10^{-8}$ Torr 台の真空度の真空槽の中に入れ、共振器フィネス(=25,000)がどう経時変化するかを測定した。その結果、数か月にわたりフィネスは劣化せず変化しないという結果を得た。次にバリウムイオンのためのイオントラップの設計を行った。これは、すでに作製したカルシウムのためのイオントラップを下敷きにしており、カルシウム用トラップを開発する上で露見した種々の問題点を解消する変更が取り込まれている。具体的には、dc および rf 電圧の導線のためのワイヤーボンディングの採用、電気信号の取り回しのための真空内 PCB の利用、マイクロ運動補正用 dc 電極の増設などである。バリウムイオン用のイオントラップの作製に関しては、以上のような指針のもと、試作と設計改良のプロセスを開始した。したがって、バリウムイオン用の共振器一体型イオントラップの作製は部分的に達成されたといえる。

課題推進者: 高橋優樹(沖縄科学技術大学院大学)

## 研究開発課題2: 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

当該年度実施内容:

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図1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 基板上的 AlAs の 3 $\mu$ m 厚の犠牲層の上に成長した基板を調達し

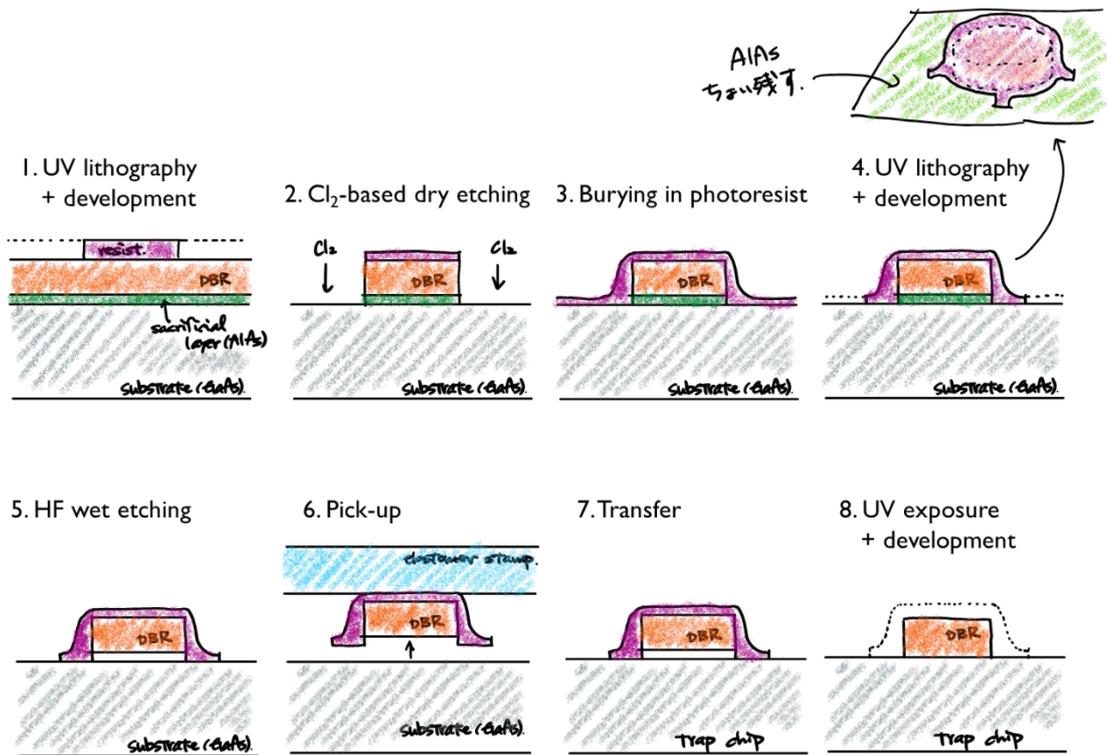


図1 半導体微小ミラーの作製プロセス

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(1)、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(2)。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(3)、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(4)。次にフッ酸により AlAs 犠牲層を除去する(5)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。実際に作製したものが図2左の光学顕微鏡写真である。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(図2右)ため、半導体ミラーを転写プリント可能な宙吊り構造に微細加工するためのプロセス開発については達成したといえる。

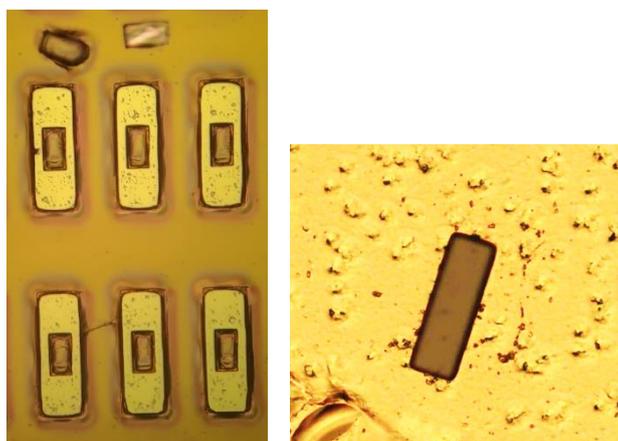


図2 宙吊りになった半導体微小ミラー(左)とトラップチップ上に転写された半導体微小ミラー(右)

課題推進者:長田有登(東京大学)

## (2) 研究開発項目2:超伝導マイクロ波回路を用いたイオントラップの開発

### 研究開発課題1:超低振動クライオシステムおよび超伝導回路イオントラップの開発

当該年度実施内容:

#### (1)クライオイオントラップシステムの開発

当該年度中のクライオイオントラップを目指し、常伝導ヘリカル共振器と常伝導電極の表面トラップを用い、冷凍機中でイオンのトラップを目指した。そのためのレーザー冷却光学系・イメージング系を構築した。マイクロ波制御に特化したベリリウムイオンと、協働冷却や光インターフェースへの相性の良いストロンチウムイオンそれぞれの光源を用意し、イメージング系はベリリウムイオンのための 234nm/313nm とストロンチウムイオン 422nm, 461nm すべてで動作できるような設計となっている。ストロンチウムイオンの超微細量子ビットを制御するためのレーザーについて調査し、電気光学変調器を用いてリポンプとクエンチ光を準備できることが分かった。残念ながらいまだ捕獲には至っていないが、考えられる問題点として1. 光源の光強度不足、2. 光子検出の S/N 不足、3. 極低温のローパスフィルター応答の3つを上げ、現在その対策を行っているところである。できるだけ早いイオントラップを目指して開発を続けている。また、ベリリウムイオンの毒性のため、排気設備を導入中であり、まずはストロンチウムイオンを用いてトラップを目指している。現状、約 10 K の環境において、アブレーションによって発生したイオンの蛍光をトラップ箇所において観測することには成功しているが、検出系の S/N のために、多数のイオンによるものしか観測できていない。

#### (2)トラップ電極に 10V 以上の振幅を印加可能なオンチップ超伝導 RF 共振器の実現

上記のように、当該年度はストロンチウムイオンに集中して研究を進めている。ストロンチウムイオンはベリリウムイオンに比べて質量が重いいため、捕獲にはより大きな電圧が必要になる。集積化された超伝導回路では超伝導薄膜の臨界電流のために十分な電圧が確保

できないため、超伝導体からなるヘリカル共振器を用いて代替とすることにした。トラップ用の RF はトラップ電極全体に共通に印加するため、フットプリントの大きい共振器で代替可能である。当該年度は、ヘリカル共振器のヘリカル部分の材質を銅・ニオブ・鉛メッキ銅と3種類変えたヘリカル共振器を作製し、その性能を比較した。銅で Q 値 500, ニオブと鉛メッキ銅では Q 値 3,000 程度が実現した。CERN などで行われている加速器実験の検出器研究により、超伝導体だけからなるヘリカルは熱伝導が悪いため、性能がでないことが知られている。そこで、銅を内側に持ち効率的に冷える鉛メッキ銅を採用した。なお、ニオブは加工性が低く、筐体を用意できなかったため、今回はヘリカル材質のみで調べた。この研究で、鉛メッキ銅でも超伝導転移で大きく Q 値が上昇することが確かめられたため、現在、筐体ごと鉛メッキ銅に変えた共振器の作製をしているところである。

また、本内容に関連して、当該年度ではイオン制御用の 2 次元超伝導 MW 共振器の開発を前倒しに進めた。シリコン上のニオブを用いてマイクロ波共振器を作製し、超伝導回路に流せる電流の限界を実験的に調査した。使用した膜は NICT で製膜された 200 nm・1.2 um 厚の 2 種類のニオブ膜と産総研 Qufab で製膜された 200nm 厚 のニオブ膜である。ともに基板は 20 k $\Omega$  cm 以上の高抵抗シリコンである。これらの基板を用いて、コプラナー共振器・並行平板共振器・IDT コンデンサ共振器を作製し、その配線太さなどを変えて性能を比較した。結果として、IDT コンデンサ共振器がフットプリントと印加電流の観点で最適であると評価できた。1.2 GHz(ベリリウムイオン)で 0.5 mm x 1 mm 程度、5 GHz(ストロンチウムイオン)で 0.1 mm x 0.2 mm ほどに集積化でき、表面イオントラップの DC 電極内に集積化できるサイズである。また、Q 値は 10,000 を超え、0.4 A 程度の MW 電流が印加可能であることがわかった。さらに電極の太さやパターンを変え、共振器に印加できる最大電流を測定した。この結果と、測定された電流印加時の超伝導表面の磁束密度の大きさをシミュレーションによって評価した。この結果を解析することで、どのパターンにおいても、ニオブ周囲の最大磁束密度がある一定値になると超伝導回路が壊れていることが分かった。この最大磁束密度はニオブの物性値よりも低い値であるため、ニオブ膜の質の改善が回路の大電流化につながることを予想される。

### (3) イオントラップへの超伝導光検出器の集積化

当該年度は、イオントラップへの超伝導光検出器の集積化のため、トラップ電極・マイクロ波回路と光検出器とを共存させるプロセスを検討した。リフトオフプロセスによる光検出器作製方法を用いることで、容易に集積化できることがわかった。また、イオンの近傍で検出可能であるため、検出器には非常に高い検出効率を要求しない。ただ、RF 電極の直近に配置されることと、4K 付近という通常の超伝導光検出器より高温での動作が要求されることから、加熱によって増える暗計数の大きさが重要な課題になることがわかった。

課題推進者:野口篤史(東京大学)

## (3) 研究開発項目3:振動自由度を用いた量子誤り訂正符号実装のための研究開発

研究開発課題1:振動状態の多モード量子制御と符号化への応用に関する研究開発

当該年度実施内容：

振動モード間のビームスプリッター相互作用誘起については、令和3年度末の実験によって達成することができた。その忠実度を改善するためには、レーザー強度を増加させ誘導ラマンラビ振動数を改善すること、振動状態コヒーレンスの改善が必要と考えられるが、後者にむけて、振動状態コヒーレンスの評価を行った。振動状態ラムゼイ干渉のウェイト時間を掃引することにより減衰時間（横緩和時間）を評価した結果、1.5 ms という値が得られた。これを改善する方法（トラップ用交流電圧振幅安定化の精度改善等）について検討を引き続き行っている。

スクイズド状態実現に関して、令和3年度の熱浴エンジニアリングによるコヒーレント状態生成実験を発展させ、2色光によるスクイズド状態生成実験を行った。図1はその実験結果であり、スクイズド状態の特徴を反映するブルーサイドバンドラビ振動を観測することができたと考えられる。いっぽう、この結果について、チューリッヒ工科大学の先行研究で得られているほどの忠実度は得られていないと考えられる。原因としては、上にも記した振動コヒーレンスが十分ではないことが考えられる。チューリッヒ工科大学の実験では、軸方向振動モードを利用していることもあり、32 ms という振動状態コヒーレンス時間が得られているのに対し、我々の系では1.5 ms であった。これについて、上述したように振動状態コヒーレンス時間を改善すること、また軸方向モードを使用することなどを計画している。当該年度の達成度としては、部分的に達成できたとともに、課題が明らかになったと考えている。

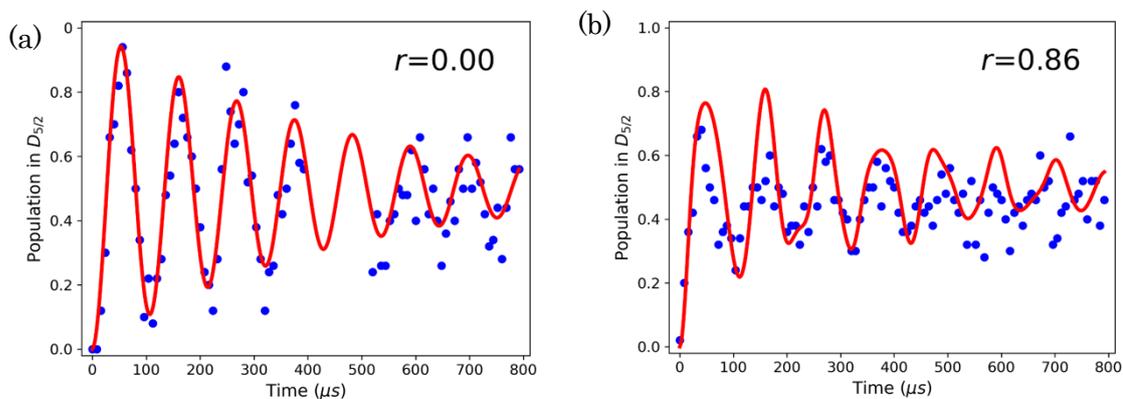


図1 スクイズド状態生成実験の結果。(a) スクイーミングパラメータ $r=0$ 、つまり基底状態生成の場合のブルーサイドバンドラビ振動測定結果。(b)  $r=0.86$  の場合のブルーサイドバンドラビ振動測定結果。

課題推進者：豊田健二（大阪大学）

#### (4) 研究開発項目4:高性能イオントラップ作製・評価技術およびクラウド化基盤技術の確立

##### 研究開発課題1-1:高性能イオントラップ作製・評価技術の確立

当該年度実施内容：

### (1)イオントラップ作製体制の拡充

令和3年度に導入開始して令和4年5月に納入が完了したトラップ作製用3次元加工設備の稼働率を向上させるために、技術員1名増員を計画したが適任者が見つからなかった。そのため、技術派遣を含めて調査・検討を行った結果、レーザープリンター等の3次元加工装置に経験を有する派遣技術者1名を令和5年1月に採用し、イオントラップ作製体制を拡充することができた。当該派遣技術者は、前出のトラップ作製3次元加工設備(フェムト秒レーザ加工装置)を活用した3次元加工技術の開発に取り組んでいる。これにより、イオントラップ作製体制は研究職員に加えて、ムーンショット専任技術員1名+ムーンショット専任派遣技術者1名の体制となった。

### (2)平面型イオントラップの性能改善と評価実験

平面型イオントラップではローディング、レーザー冷却、クーロン結晶生成等の基本性能がこれまでに確認できたため、ムーンショット内外の研究グループでの導入を容易にするためのパッケージ化に関する研究開発を実施した。平面型イオントラップパッケージ試作を国内企業に依頼する体制を構築し、大阪大学大学院基礎工学研究科 田中歌子氏の技術支援を得て、真空チャンバー内での配線作業が一切不要となる試作品第一号を完成させた。この試作品は、LGA(Land Grid Array)に平面型イオントラップとrf遮断フィルターを実装した後、ソケットを介して真空フランジに装着して真空内に設置する実装が容易なイオントラップパッケージとなっている(図1)。性能評価実験では国内企業が製造するNEG(Non-Evaporative Getter)ポンプを補助排気に用いる構成で $6 \times 10^{-9}$  Torrの真空度を観測し、イオントラップが可能な真空特性が確認できた。今後 $^{40}\text{Ca}^+$ を用いた評価実験を実施する。

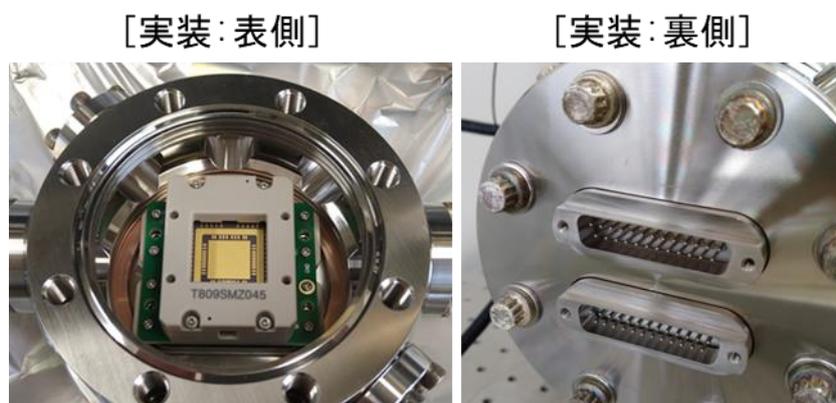


図1 平面型イオントラップパッケージ

### (3)立体型イオントラップの性能検証とトラップ実証実験

本プロジェクトでは、立体型イオントラップの作製手法として

- I. AlN 基板形状加工
- II. フォトリソグラフィとメッキによる電極配置
- III. 基板貼り合わせ

という手順に沿って作製を行っている。このうち、II.のフォトリソグラフィにおいては、一般的なシリコンウェハプロセスと異なり、レーザー加工側面への電極形成が必要である。また、これらの電極は捕獲イオンに正対するため、その形状・品質は平面上と同等であることが求められる。令和3年度に試作に成功したトラップの側壁電極を精査したところ、短絡してい

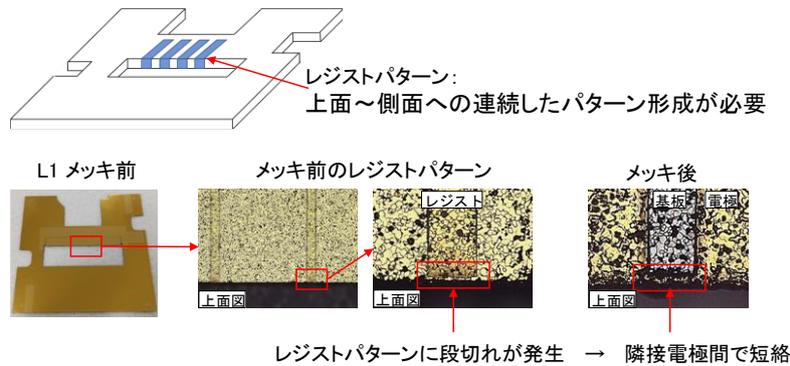


図2 側壁パターンの短絡

る部分が一定頻度で発生していることがわかった(図2)。これはメッキ用レジストパターン形成が特に側壁部分において不完全であることに起因していると考えられる。そこで側壁部分のレジストパターンの品質を改善すべく、下記のプロセス改善を行った。

トレー基板の再検討

基板厚み程度の高アスペクト比パターンを実現可能なレジストの選定

貫通部のレジストの埋め込み

マスクパターンの改良

斜め露光による側壁密着性の改善

結果として、図3に示すように、高い信頼性で短絡が発生しない電極パターンの形成が可能となった。一方で貼り合わせ部に用いるスペーサー、接着材の材質選定、チップ部品などを含めた実装手法の検討は完了しており、試作をルーティン化する環境は整った。しかし、当該年度内に試作したサンプルを真空チャンバーに導入した上でのトラップ評価は未実施のままであることから、立体型トラップの動作実証に関しては約6割(残り4割が真空

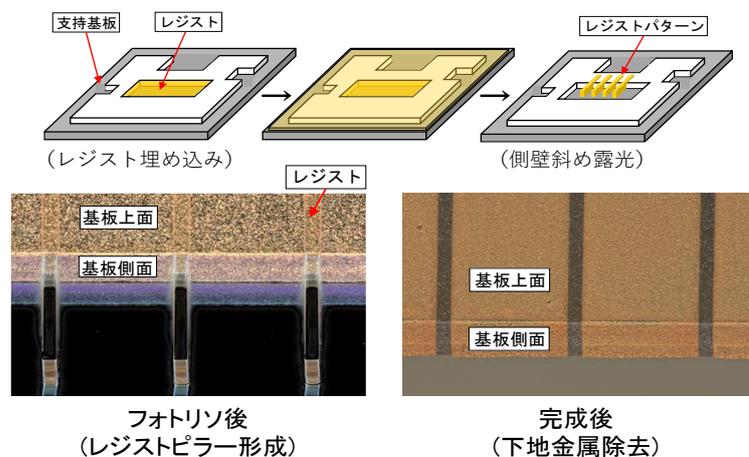


図3 側壁電極パターンの品質改善

チャンバーへの実装と評価)が達成されたと考えている。

(4)イオントラップ評価システムの性能向上

本課題では主に  $^{40}\text{Ca}^+$  を用いてイオントラップの性能を評価する手法の技術開発を実施している。これまでに  $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{P}_{1/2}$  遷移(波長 397nm, 自然幅 20MHz)の蛍光像や時間発展の計測により、より多くの研究グループが導入でき、比較的簡易にヒーティングレート等のトラップ性能を評価するための基盤技術の研究開発を実施した。より精緻なイオントラップ性能評価には  $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$  遷移(波長 729 nm, 自然幅 0.1 Hz)で高分解能分光やサイドバンド計測、量子ゲート動作等を行うのが好ましい。この用途には、線幅が 100Hz 以下、出力が 100mW 以上のレーザーが必要とされる。当該年度はこのようなレーザーの開発と評価実験を実施した。

波長 1458nm の半導体レーザーを小型ファブリペロー型光共振器で周波数安定化し、非線形結晶での第二高調波発生で 729nm 光を生成する小型(300mm×300mm)で簡易なレーザーを構成した(図 4(a),(b))。250Hz@0.1 秒の線幅、10mW の 729nm 出力が得られ、トラップした  $^{40}\text{Ca}^+$  の  $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$  遷移の分光、周波数ロック、位相回転ゲート操作が行えることが確認できた。さらに 1458nm での出力を 4 個の光アンプ(BOA)に分配して増幅後にコヒーレント加算したところ、100mW 以上の 729nm 光が得られた。この出力では Molmer-Sorensen 型のエンタングルゲートが可能になるのみならず、イオントラップとの光回路の共集積に適した 729nm でのレーザー冷却が可能になると期待される。

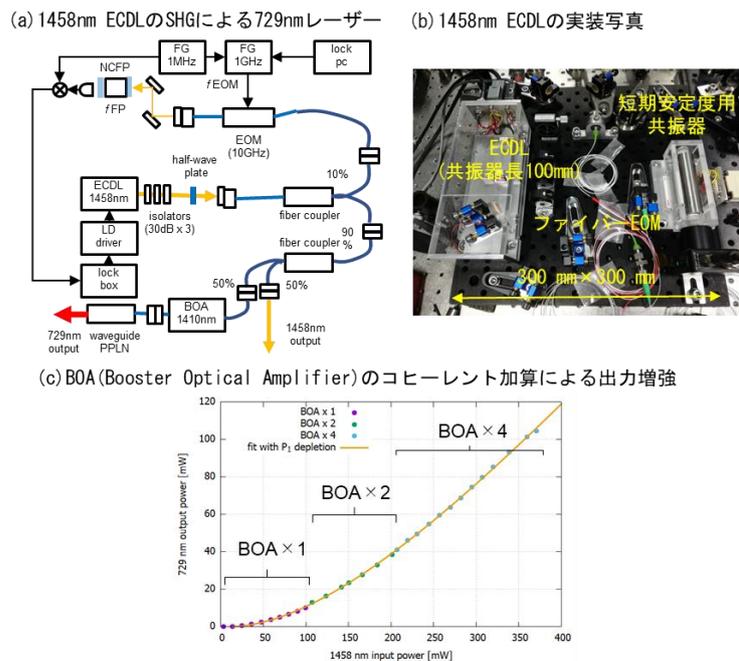


図4  $^{40}\text{Ca}^+$ 用 729nm レーザー

(5)立体型イオントラップへの光インターフェースの実装に関する研究開発

光インタフェースの実装方法として、ガラス基板中のフェムト秒レーザー改質に基づく光導波路の適用を検討している。当該年度は、派遣技術員へのフェムト秒レーザー加工装置のオペレ、及び KOH 溶液を用いた選択的エッチング(SLE: Selective Laser Etching)手法のプロセストレーニングを行った。また、波長 515 nm のフェムト秒レーザーパルスを用いて、改質に必要なレーザーフルエンスやショットピッチ等、照射パラメータの最適化に着手した。改質部において波長 633 nm の光導波を観測し(図 5(a))、エッチング処理することにより、石英基板内部に直径 5  $\mu\text{m}$  以下の細径穴が高アスペクト比( $>1000$ )で実現できることを確認した(図 5(b,c))。今後は、形成した導波路の光学特性の評価、及び SLE による微小部品の試作等を継続していく予定である。

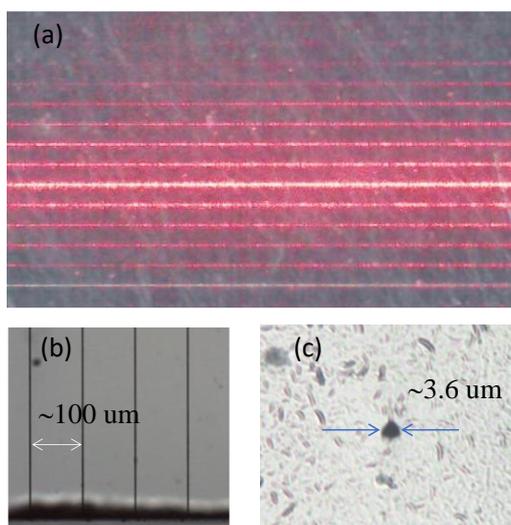


図5 (a) 改質部の光導波の様子。(b) KOH エッチング後の基板内部の高アスペクト比穴構造形成の様子と (c) 穴の断面構造(基板端面の光学顕微鏡像)。

課題推進者: 早坂和弘(情報通信研究機構)

#### 研究開発課題1-2: $^{171}\text{Yb}^+$ 時計遷移を用いた立体型イオントラップ評価

当該年度実施内容:

(1) $^{171}\text{Yb}^+$ 冷却・操作技術の向上、ならびに、(2)NICT 立体型イオントラップの評価、を推進している。それぞれの項目について、当該年度は以下のように研究開発を実施した。

##### (1) $^{171}\text{Yb}^+$ 冷却・操作技術の向上

本研究課題をとおして、 $\text{Yb}^+$ を光領域でラム・ディッケ領域に閉じ込める技術が、大前提として必要である。本研究課題開始以前に、従来型 3 次元 RF トラップに単一  $^{174}\text{Yb}^+$  を閉じ込め、 $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$  時計遷移を用いて、ラム・ディッケ領域閉じ込めを確認していた。しかし、その再現が難しいことも明らかになってきていた。これらを考えて、ラム・ディッケ領域閉じ込めを確実に達成するための条件を突き止めることを、最初のマイルストーンに設定した。冷却レーザー光のパワーを強く飽和しないように下げることで、サイドバンドよりもキャリアが十分大きい、2 mK 程度までの冷却を、着実に実現できるようになった(図 1)。使用しているトラップでのラム・ディッケ領域閉じ込めに必要な到達温度は 1 mK で、ドップラー冷却限界は 0.5 mK である。到達温度がなおいくらか高い理由は、判明していない。それでもキャ

リアとサイドバンドの区別が明確なスペクトルが確実に得られるようになったので、本課題の解決に取り組むつ、実験を先に進める。

並行して、2 台目の従来型 3 次元 RF トラップ装置を動作させた。1 台目で確立した 3 次元冷却技術を導入し、冷却レーザー光を 2 方向から照射することとした。そのために蛍光検出レンズ系をトラップから離さざるをえず、1 イオン当たりの蛍光強度が最大  $4500 \text{ s}^{-1}$  と、冷却レーザー 1 方向照射時と比べて 30 %程度に減少した。冷却レーザー光 2 方向照射後のトラップ確認に長時間かかったが、

蛍光強度が小さく、初めから迷光の低減を十分に行っておく必要があったことによる。2 方向の冷却レーザー光を用いた RF 光子相互相関法に、簡略的ではあるが遅いポテンシャル変調を組み合わせ、3 次元のマイクロ運動最小化もおこなった。迷光強度も小さいので、時計遷移の単一イオン分光は可能な信号対雑音比にある。蛍光強度については改善を試みつつ、今後は 2 台の同時分光による磁場等、環境依存性の測定、さらに同位体シフトの測定も視野に入れつつ、研究の加速と高度化を図る。

同位体シフトの測定を視野に入れて、2 台目の  ${}^2\text{S}_{1/2} - {}^2\text{D}_{5/2}$  遷移励起用レーザーとして、独立したオフセットロックレーザーを開発した。長時間連続運転を実現するために、温度安定化を施した外部共振器型半導体レーザー (ECLD) を作製し、第 2 高調波発生は光共振器を使用せず single-pass とした。線幅狭窄化レーザーへの位相同期によるオフセットロックは、残留位相雑音が積分範囲  $10 \text{ Hz} \sim 10 \text{ MHz}$  で  $0.067 \text{ rad}$  と位相同期の目安である  $\pi/2$  より十分小さいもの

ができた(図 2)。第 2 高調波は長さ  $10 \text{ mm}$  の ppKTP 結晶を用いて発生させた。基本波  $52 \text{ mW}$  から第 2 高調波  $68 \mu\text{W}$  と、分光に必要なパワー  $10 \mu\text{W}$  を十分超える出力を得た。この系を用いて単一イオン分光が可能であることを 1 台目のトラップ装置で確認し、また、12 時間以上の連続動作を達成した。

次年度のマイルストーンである単一  ${}^{171}\text{Yb}^+$  のラム・ディック領域閉じ込め、ならびに単一  ${}^{174}\text{Yb}^+$  サイドバンド冷却の準備を予定通り開始した。どちらも長期間使用していなかったレーザーを使用する必要がある。 ${}^{171}\text{Yb}^+$  のレーザー冷却に必要な超微細構造の脱励起には、紫外 ECLD を使用していた。今回再発振させたところ、出力の大幅な低下と、戻り光の影響の増大が判明した。対策として、新しい半導体レーザーと光アイソレータの手配をおこなった。サイドバンド冷却には、時計遷移の寿命を短くする quenching 遷移を励起するレーザーが必要である。今回再発振に際して、長時間連続運転のために ECLD 全体の温度安定

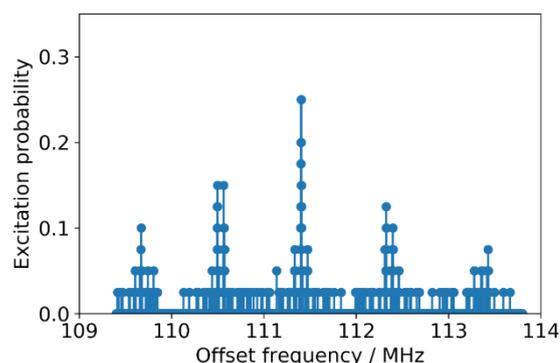


図 1 単一  ${}^{174}\text{Yb}^+ {}^2\text{S}_{1/2} - {}^2\text{D}_{5/2}$  遷移のスペクトル

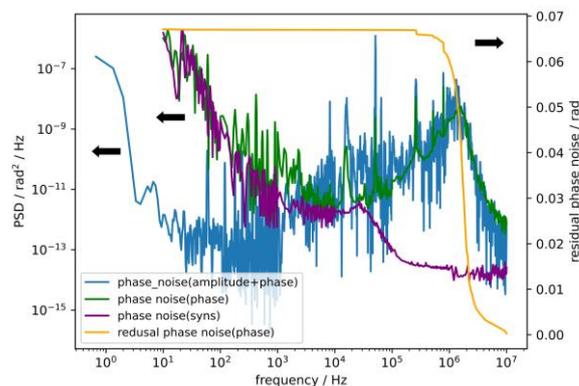


図 2 位相同期中のビート信号の位相雑音 (オレンジ(右の縦軸)が残留位相雑音。他は雑音スペクトル)

化を組み込むことにした。新しい構成で再発振確認まで完了した。

## (2) NICT 立体型イオントラップの評価

当該年度は、導入される立体型イオントラップを動作させるための装置の整備を開始した。トラップそのものは単に導入するだけの計画であったので、実際の導入は使用を始める令和 5 年度とした。装置の整備として、結晶化した複数個イオンを観測する微弱光検出用 CCD カメラ、および、レーザーの波長を設定する光波長計を整備した。また、各種電源や、光路をスイッチする音響光学変調器など、光学系を整備した。

課題推進者: 杉山和彦(京都大学)

## 研究開発課題1-3: Ba イオンによる平面型イオントラップの評価

当該年度実施内容:

### (1) Ba<sup>+</sup>用線形 Paul トラップシステムの構築

既存の Ca<sup>+</sup>用線形 Paul トラップシステムを Ba<sup>+</sup>対応に切り換えることで Ba<sup>+</sup>用線形 Paul トラップシステムを構築した。即ち、冷却用レーザー、リポンプ用レーザーをそれぞれ Ca<sup>+</sup>用の波長 397 nm、866 nm から Ba<sup>+</sup>用の 493 nm、650 nm に置き換え、Ca 原子をトラップ内に供給するオーブンを市販の Ba 蒸発源(ディスペンサー)に置き換えた。さらに、蛍光観測用の EMCCD カメラを新たに購入した。図 1(a)に現状のシステムを示す。次年度のマイルストーンである「<sup>138</sup>Ba<sup>+</sup>によるクーロン結晶形成の実現」にはこのシステムで対応できることから、今年度の目標はほぼ達成したものと考えられる。

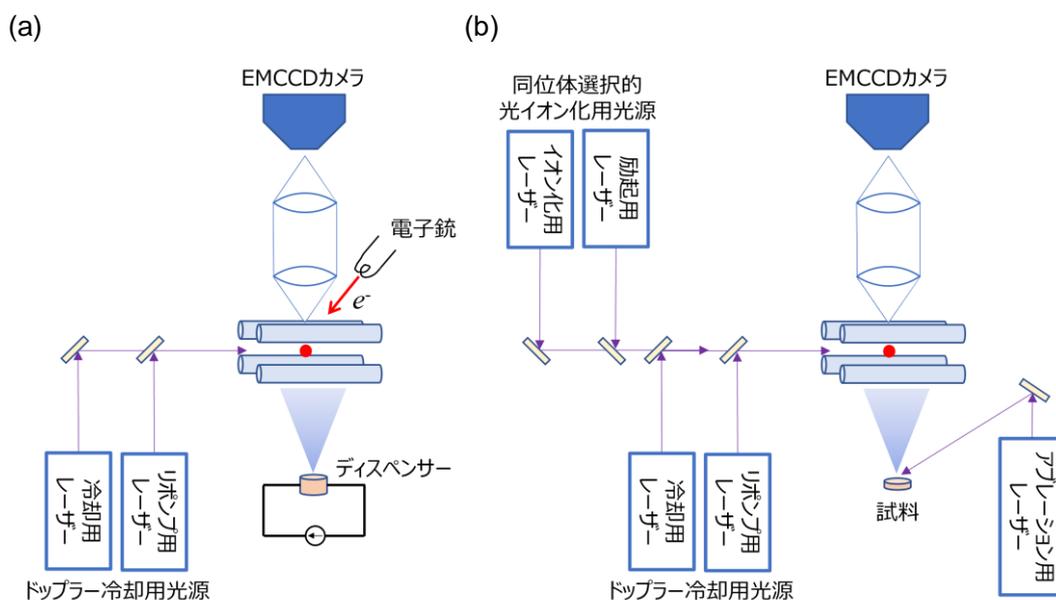


図 1 Ba<sup>+</sup>用線形 Paul トラップシステムの概要図。(a)現状のシステム。(b)開発中のシステム。

一方で、イオントラップによる光接続型誤り耐性量子コンピュータの量子ビットとして <sup>133</sup>Ba<sup>+</sup>を適用するための基盤技術を確立するためには、多様な同位体が存在するバリウムについて同位体選択的にイオンをトラップする技術を確立する必要がある。また、放射性同位元素である <sup>133</sup>Ba を利用する際には、放射能による汚染をできるだけ避けたい、天然

に存在しない  $^{133}\text{Ba}$  が濃縮された試料で入手可能なものは液体である、という課題がある。これらの要請と課題を解決できるバリウムイオンのトラップへの導入方法を検討した結果、レーザーアブレーションによって Ba 原子を生成し、光共鳴イオン化によって同位体選択的にイオン化する方法(図 1(b))を選択するに至った。この方法は、線形 Paul トラップを用いたシステムだけでなく、この後に構築する予定の平面型トラップを用いたシステムにもそのまま適用可能である。そのための要素技術の開発を行った。まず、レーザーアブレーションによる Ba の原子化については、既存の四重極型質量分析装置と組み合わせたテストベンチを構築した。固体ターゲット( $\text{BaTiO}_3$ )及び液体( $\text{BaCl}_2$  水溶液)を金属表面に滴下して蒸発乾固したターゲットの双方でアブレーションを試みたところ、いずれにおいてもバリウムイオンの信号を検出し、特に前者においては  $^{138}\text{Ba}$  を筆頭に  $^{137}\text{Ba}$ 、 $^{136}\text{Ba}$ 、 $^{135}\text{Ba}$  に相当するピークを持つ質量スペクトルが観測できた。次に、光共鳴イオン化については 2 光子による共鳴イオン化スキームから 2 つ( $6s^2\ ^1S_0 \rightarrow 6s6p\ ^3P_1 \rightarrow 6s\ ^2S_{1/2}$ 、 $6s^2\ ^1S_0 \rightarrow 5d6p\ ^3P_1 \rightarrow 6s\ ^2S_{1/2}$ )を選択し、対応する光源の作製・整備を行った。前者のスキームについては励起用の外部共振器型半導体レーザー(波長 791 nm)を作製し、要求される出力(250  $\mu\text{W}$ )を十分上回る出力(70 mW)を確認、さらに線幅が 20 MHz 程度であり、モードホップフリーのチューニング範囲が 18 GHz 程度であることを確認した。また、イオン化用レーザー(波長 337 nm、市販のナノ秒パルス窒素レーザー)を整備した。後者のスキームでは励起・イオン化用外部共振器型半導体レーザー(波長 413 nm)を作製した。いずれのスキームについても同位体選択的励起・イオン化条件を探索するためのテストベンチの設計・構築に取りかかった。

## (2) 小型イオントラップモジュール用真空パッケージの仕様検討

本真空パッケージは、課題 4-1 で情報通信研究機構(NICT)が開発する高性能汎用トラップを搭載することを想定し、将来、プロジェクト内に提供することを目的とする。当該年度は、高性能汎用トラップを開発している NICT、オンチップ・イオントラップ開発の実績がある大阪大学、小型真空パッケージ製作の実績がある企業と連携して仕様を検討した。主な仕様は以下の通りである。

- 超高真空
  - ベーキング温度: $\leq 120^\circ\text{C}$
  - 排気用パイプは 1 つ
  - シーム封止を想定
  - 窓の数:4~6 個
  - 波長:375~866 nm ( $\text{Ca}^+$ )  
337, 413~791, 1762 nm ( $\text{Ba}^+$ )  
532, 1064 nm (レーザーアブレーション用)
  - レーザー用窓有効径:3~3.5 mm
  - パッシング部品等、真空内に置かなくていい部品は、外出しを検討
  - イオンはレーザーアブレーションによって供給する
- 以上より、今年度の目標は達成できたものと考えられる。

課題推進者:鳴海一雅(量子科学技術研究開発機構)

## 研究開発課題2:イオントラップ量子コンピュータのクラウド化基盤技術

当該年度実施内容:

### (1) イオントラップ量子コンピュータのクラウド化にむけた実験系構築

イオン自動ロードシステムのセットアップにむけて、イオントラップ装置の立ち上げを行った。レーザー冷却に用いるイオントラップ装置については、図 1(b)のように、機械加工 3 次元リニアトラップ、イッテルビウムオープン等を真空チェンバーにインストールしたうえで、真空装置全体のベークを行った。また、図 1(a),(b)のように冷却用光学系、光学部品の調達・配置を行った。

また、冷却用半導体レーザー光源の周波数安定化を行った。周波数安定化の基準として、光周波数コム発生器 (MenloSystems FC1500-250-ULN)、光波長計 (HighFinesse WS8-2) を用いた。冷却に用いる 370 nm, 935 nm のうち、光周波数コム発生器が直接対応可能なのは 935 nm のみであったため、今回は 935 nm の安定化を行った。光周波数コム発生器および光波長計の 935 nm 帯域での周波数不確かさはおよそ 30 kHz, 2 MHz と見積もられる。図 2 に周波数安定化実験の結果を示す。図 2 (a)には 935 nm 半導体レーザーを波長計に安定化し、光周波数コムでドリフトを計測した結果を示した。7 時間で 0.5 MHz 程度のドリフトが観測されている。これは、通常のイオン実験には十分なものと考えられる。また、図 2 (b)は、実験計を包む恒温ブース(温度安定度  $\pm 0.1$  度)の温度安定化を作動させたうえで、935 nm 半導体レーザーを光周波数コムに安定化し、安定化 HeNe レーザーで校正した波長計で周波数ドリフトを計測した結果である。これも、基本的には相対的に不安定な波長計の安定度を見ていることになると考えられるが、40 h の運転で peak-to-peak が 1.6 MHz に収まっており、これは 935 nm 遷移の上準位の自然幅 4.2 MHz を下回っている。したがって、24 h を超えるようなクラウドコンピューティングにおける運用にも耐える連続運用時間・安定度が確認できたといえる。370 nm を波長計にロックした場合についても、これに準ずる安定度が得られると考えている。

当該年度の達成状況としては、イオンローディングが達成できていないため、自動ローディングの実装には至っていない。イオンローディングについては近く達成できると考えており、それが達成でき次第、自動ローディングのテスト実験に移ることができると考えている。

量子ビット励起レーザーによる誘導ラマン遷移誘起の実現にむけて、誘導ラマン励起用光学系の設計・設置を行った。

また、誘導ラマン励起用ピコ秒パルスレーザーの繰り返し周波数安定化を行った。 $^{171}\text{Yb}^+$  基底状態超微細構造準位間誘導ラマン遷移については、Hayes らにより提唱された方法 [Phys. Rev. Lett. **104**, 140501 (2010)] に基づき、ピコ秒パルスレーザーを用いて励起する計画である。この方法を用いて誘導ラマン遷移を安定に励起するためには、パルスレーザーの繰り返し周波数が安定化されていることが条件となる。実際には、機械的振動、温度ドリフトなどの要因によって共振器長が変動するために、パルスレーザーの繰り返し周波数は変化しうる。したがって、そのような変動の影響を補償する必要がある。我々が調達したピコ秒パルスレーザー (Paladin Compact 355-4000, 繰り返し周波数 120 MHz) には、繰り返し周波数を安定化するための調節機構が備わっていないため、繰り返し周波数を計測した上で、外部の音響光学変調器でフィードフォワード制御を行うことにより変動分を



マン遷移誘起の実現には至っていない。イオンローディングを実現し次第、誘導ラマン遷移誘起の実験に移り、単一量子ビット演算等に発展させることができると考えている。

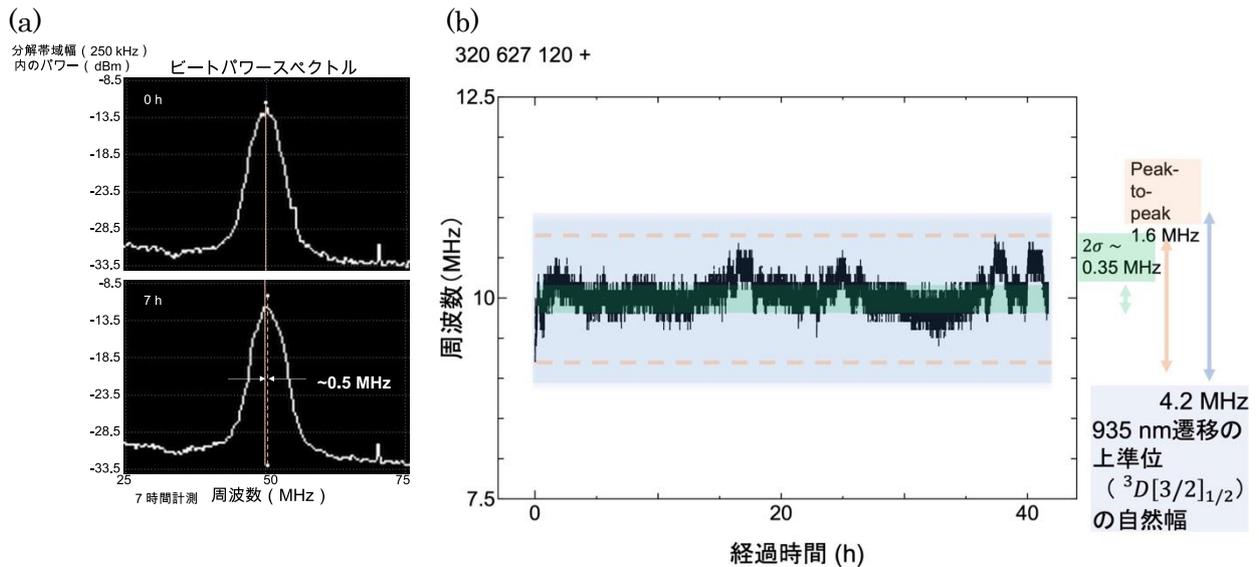


図2 イッテルビウムイオン冷却用光源の周波数安定化実験結果。(a) 935 nm 半導体レーザーを波長計に安定化し、光周波数コムでドリフトを計測した結果。(b) 恒温ブースを動作させたうえで、935 nm 半導体レーザーを光周波数コムに安定化し、安定化 HeNe レーザーで校正した波長計で周波数ドリフトを計測した結果。

## (2) 平面型トラップを用いたイオン輸送技術の開発

平面型トラップにおけるイオンの直線輸送について、図3のような多数の DC 電極(図1の end 電極と middle 電極で合わせて 12 対)をもつトラップで、イオンを center 電極の上方で矢印の方向に移動させるための印加電圧を求めた。所望のポテンシャルを生成するための印加電圧の求め方は自明ではないが、我々は精度よく所望のポテンシャルが求まる最適化の手法を確立した。またこうして求めた印加電圧(図4)でのイオン運動のシミュレーションを、レーザー冷却のある場合とない場合それぞれについて行った。さらにイオン輸送実験に向けて、高速輸送のための多チャンネルの電圧生成に必要な Digital to Analog Converter (DAC) や、ノイズ低減のた

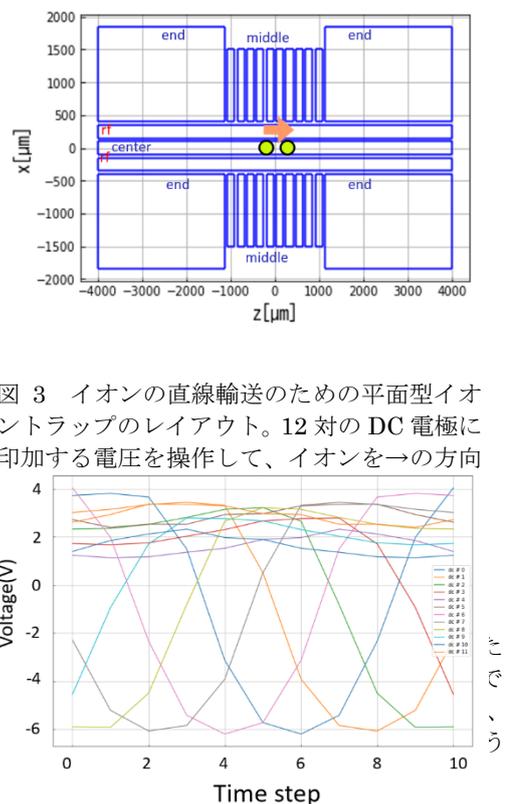


図3 イオンの直線輸送のための平面型イオントラップのレイアウト。12 対の DC 電極に印加する電圧を操作して、イオンを→の方向

めのフィルターの性能を検討した。またソフトウェアによって制御速度が大きく影響を受けることを確認し、現存する DAC の性能を最大限に引き出すソフトウェアを実装した。

ジャンクション構造を持つトラップについては、動径方向にシングルウェルとダブルウェルが可変なトラップ電極を、Y 型ジャンクション構造に取り込むことを検討した。

### (3) 平面型トラップによるイオンの2次元的な配列制御

多数個2次元配列では、3列配列にする場合についてシミュレーションを行った。これまでに実現している2列配列の電極に RF 電極を追加し、合計4本の RF 電極で3列配列のポテンシャルが生成できる条件を求めた。また外側2本と内側2本の RF 電圧の振幅を変化させた場合に、トラップ位置がどのように変化するかを求めた。

課題推進者: 豊田健二(大阪大学)

## (5) 研究開発項目5:イオントラップのための集積化光回路に関する研究開発

### 研究開発課題1:イオントラップのための集積化光導波路回路の作製技術

当該年度実施内容:

#### (1) 多チャンネル光導波路のオンチップ集積化の実施

可視から近赤外域で透明性が高く、また屈折率が比較的高く光導波路の集積性が期待できる光学部材として窒化ケイ素(SiN)に着眼し、その成膜と光導波路の応用について検討を行った。SiN は CVD 法によって成膜できるが、特に PE-CVD 法を用いて比較的低温(400°C)でプロセスすることで、物質間応力による欠陥形成が少ないことが期待され、導波路応用が可能な基板作製を行った。作製した基板は、SiN(300nm)/SiO<sub>2</sub>(2.0 μm)/Si(550 μm)である。研究開始当初、LC-CVD 法による SiN 成膜についても検討を行ったが面内の膜厚ムラが確認されたため、当該年度は PE-CVD 法で作製した基板を使用することとした。光導波路と回折格子の作製は、電子線描画と ICPドライエッチングを用いて行った。詳細の実験条件は、課題推進者がすでに蓄積を有している。作製した光導波路と光学素子への光結合は、すべて光ファイバーを用いて行った。

SiN は屈折率が 1.98 程度と比較的高く、光モードの導波路内への閉じ込め効果が高いため、光伝搬計算から求めたシングルモード条件から導波路幅(w)を 0.8mm として。一方、光ファイバーのフィールドサイズは 2~3mm (High-NA) となるため、光ファイバー結合部では結合損失を考慮したテーパ状導波路(w=2mm)による簡易なスポットサイズコンバータを作製した。作製した導波路の光伝搬損失(l=830nm)は 0.60dB/mm であった。課題推進者のグループで以前に検討した導波路損失が 0.3dB/mm(w=2.0mm, t=0.9mm, l=1.55mm)であったことと比較すると、薄膜化した SiN 導波路の損失と波長依存性の影響が考えられる。また、スポットサイズコンバータとして作製したテーパ状導波路部の損失は 0.84dB/mm であった。一部の高次モードに変換された伝搬光が損失するためテーパ部の長さは不用に長くならないよう 100mm とした。その際、光ファイバー結合損失は 6.7dB であった。簡易スポットサイズコンバータで 1.6dB 改善されるが、SiN 膜厚が 300nm と薄いことから効果は十分ではない。導波路法線方向のモード整合性を考慮した変換構造が必要と

なるが、今回はそのまま実験に用いることとした。なお、これら結合損失等の課題は継続的に検討していく予定である。

作製した SiN 導波路に回折格子を作製し、イオントラップデバイス内への光導入を目指して、SiN 導波路端に光回折素子を作製し、その回折評価と光路評価を行った。入力レーザの波長は、830nm と 780nm とした。回折格子の設計は、文献(Nature, 586, 533 (2020))の方法を参考に行ったが、今後、可視域から近赤外域の広波長領域での素子作製が必要となることから、回折構造の周期(L)が 400nm~680nm の範囲で作製精度を確認した。回折素子の分光は、遠視野顕微鏡を用いてビームプロファイル、出射角度、焦点距離、出射強度(密度)などの解析を行った。なお、回折格子は円弧周期とすることで焦点を結び、集光効果を持たせることとした。その結果、出射光は  $9^{\circ}$  ~  $12^{\circ}$  の範囲で円弧によって調整可能であり、基板上 100mm 程度の焦点位置で 14 mm×24 mm のスポットサイズを形成した(回折構造による)。

## (2) イオントラップデバイスの光入力制御技術の実施

強誘電体導波路を用いた位相変調デバイスの開発を行った。当該年度は、光損失が低く信頼性が高い LN 導波路の応用に着眼して、目的とする多チャンネル光導波路に集積可能なフェーズシフタとしての機能探索と簡易なデバイス作製を進めた。本研究で用いた基板は、SiO<sub>2</sub>/Si 上に薄膜成形された LNOI である。(1)項で検討したとおり、位相変調機能の光回路への実装を考えると SiN 系光導波路とのハイブリッド化が必要となる。本研究では、ハイブリッド化のため LNOI と Si 系導波路を組み合わせた光導波路作製を行った。LNOI は、厚さ 700nm の LN 結晶薄膜が SiO<sub>2</sub>/Si 基板に張り合わせてある。LNOI に光を入力したときには、光モードは LN 活性層に閉じこもるが、一部は表面に染み出す。この伝搬特性を利用して、LN と比較的屈折率が近い SiN 薄膜細線(導波路)を LNOI 上に形成させることで光導波路構造を作製した。SiN の成膜と導波路作製は(1)項と同様の方法で行った。

本研究では、近赤外域波長での変調を LN 位相シフタで制御することを目的とするが、当該年度は、まず位相シフタとしての動作確認の目的のため、すでに研究室で実験設備が整っている通信帯波長( $\lambda=1550\text{nm}$ )での光学特性評価を行った。作製した位相シフタの長さは 6mm であり、バルク結晶から作製される LN 変調器の 1/10 以下の長さを実現した。一方、 $\pi$ シフトを示す動作電圧は 3.2V であり低い動作電圧利得を得ることができた。動作電圧は波長に逆比例することから、近赤外域での位相シフト電圧は、さらに低減できることが見込まれる。また、測定した周波数応答性も LN 変調器(35GHz)と比べて高く、60GHz の帯域特性を得た。高周波信号の誘電損失が低い SiO<sub>2</sub> 上に薄膜 LN が形成されていることから、バルク LN 結晶より優れた高周波応答性が得られている。以上の結果、通信帯波長での変調特性が良好であることから、近赤外波長への対応について光伝搬計算法を用いて光導波路( $\lambda=780\text{nm}$ )と変調器の設計に着手し、同波長におけるシングルモード条件を決定した。

課題推進者:横山士吉(九州大学)

研究開発課題2:光導波路回路一体型イオントラップの開発

当該年度実施内容：

イオントラップに向けた光回路素子の設計・作製と集積方法の開発を行った。具体的には各波長におけるシングルモード光導波路、グレーティング光出射素子、スポットサイズコンバータの設計を横山研究室とノウハウを共有しつつ進めた。基本的には横山研究室製の光素子を搭載した光回路チップをフリップチップ集積によりイオントラップに実装する手法(図1)を考案し開発を進めているが、東京大学でも作製できるようなプロセスフローは確立しており、個別イオンにアクセス可能な、イオンの位置で小さなビーム径を実現するグレーティング光出射素子の設計にも着手した。こういった出射光を実空間で評価するためのナイフエッジビームプロファイラも構築し、横山研究室から提供された光素子の出射光プロファイルの測定も行った(図2)。

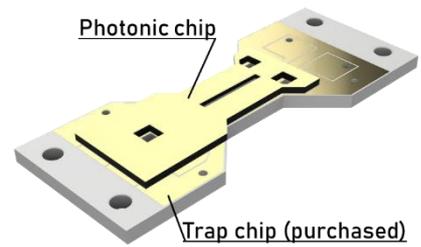


図1 フリップチップ集積による光回路一体型イオントラップ

さらに、光導波路回路一体型イオントラップにおけるすべての入力光をファイバー化する

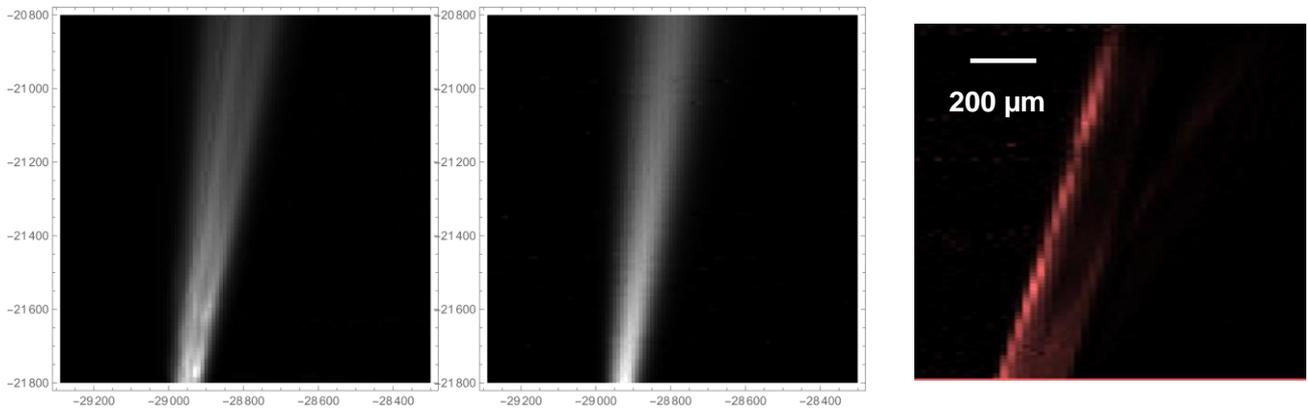


図2 (左)横山研提供の光出射素子の波長 660nm におけるプロファイル  
(中央)同素子の波長 1092nm におけるプロファイル  
(右) 作製した光導波路の波長 660nm における出射プロファイル

るという方針にのっとり、原子発生のためのパルスレーザーも光ファイバーにより導波し、実際に原子発生が可能であることを確かめ(図3)、この成果は Applied Physics Letters 誌に掲載された。

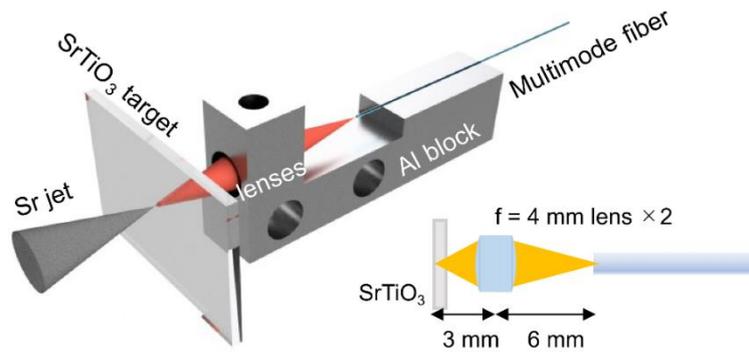


図3 光ファイバーを導波したパルスレーザーによる原子発生の概略図

イオントラップに向けた光回路素子の設計・作製と集積方法の開発は、おおむね達成できた。

課題推進者:長田有登(東京大学)

## (6) 研究開発項目6:イオントラップ多重化のためのイオン輸送・配列技術

### 研究開発課題1:ジャンクショントラップを用いた捕獲イオンの配列技術

当該年度実施内容:

#### (1) 捕獲可能な微細電極の設計にむけた数値解析

量子情報処理で利用されている2次元、3次元の微細加工イオントラップについて、世界の状況を概観した。多数のイオンを取り扱うためには2次元イオントラップが優れているが、量子状態の伝送に光を用いる場合には、トラップごとのイオン数を少なくすることができ、大がかりな輸送も必要ないことから、3次元トラップが望ましいと考えられるため、電場数値解析に必要なソフトウェアの精査を行った。具体的には、交流電場においてイオン軌道を計算可能なA、B、Cの3つのソフトウェアにおいて、3次元イオントラップを作成し、その使い勝手を確認した。

Cは有限要素法をベースとした汎用の統合シミュレーションソフトウェアである。高周波RFに対応しており、微細な構造を持つ部分とそうでない部分とで異なるメッシュサイズを設定することができるため、微細加工電極の計算にも適している。またCを用いて微細加工イオントラップシミュレーションは先行研究などで見られるため、様々な例を参考に計算モデルを構築できることも期待できる。以上、高周波RFに対応しており、微細構造を持つモデルでも計算時間が長くないことに注目し、表1にあるように比較した結果、本研究ではCを使用した。

表1. 電場数値解析のソフトウェア比較

	C	B	A
微細加工	○	○	×
高周波	○	×	×

また数値解析を行うためのコンピュータ等を選定し、それを用いて試作のトラップ電極の微細電極の設計・数値解析を実際に行った。

本研究では接合角度が  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  の 3 次元イオンジャンクションをモデル化し、イオンシャトリングシミュレーションを実行した。電極の幅、動径方向の距離、軸方向の距離は三次元トラップの先行研究を参考にそれぞれ  $150\ \mu\text{m}$ 、 $254\ \mu\text{m}$ 、 $400\ \mu\text{m}$  と設定した。イオンを空間中に捕獲するためには動径方向のトラップでは RF 電極、軸方向のトラップでは DC 電極が必要である。当該年度は図 1 のような Y ジャンクションの電極をソフトウェア上で作成し、高周波 RF は先行研究を参考に以下のように設定した。

$$V_{RF} : \text{振幅 } 200 \text{ [V]} \quad \text{周波数 } 35 \text{ [MHz]}$$

DC 電極によって軸方向の閉じ込めを行っており、トラップしたい位置の DC 電極電圧を下げると、調和ポテンシャルの極小点が移動しイオンシャトリングを実現できる。

RF 電圧の擬ポテンシャルを書き出すと、意図しない四重極ポテンシャルが発生し、Y ジャンクションにイオンが吸い込まれてしまうことがシミュレーションにより明らかになった。

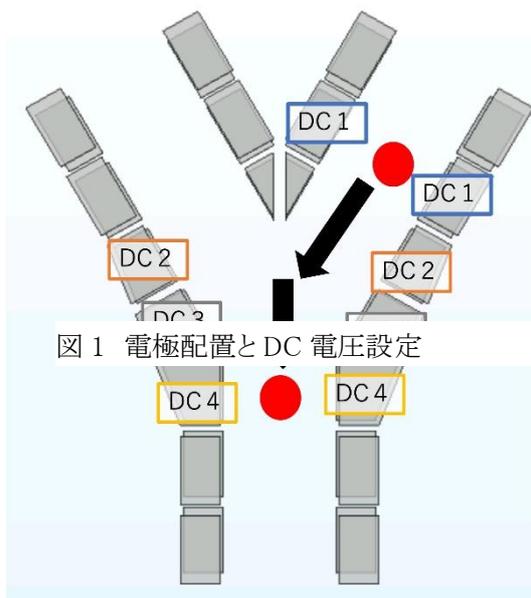


図1 電極配置とDC電圧設定

そこで印加する DC は意図しない四重極にイオンが近づかないように図 1 のように設定した。また、印加する DC 電圧の時間変化は図 3 のように設定した。トラップポイントである DC1 と DC4 は  $-6\text{V}$  を印加したが、DC2 と DC3 はジャンクション中にありトラップが不安定になりやすいため無理にトラップせず輸送を補助する目的で DC1、DC4 より高い  $-4\text{V}$  を印加した。今回の電極設定で  $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $55^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $100^\circ$  のジャンクションでのシャトリングを達成した。

RF 加熱に対する接合角度の影響を評価するためにジャンクションにおけるシャトリング後のイオンの総エネルギーの平均、接合角ごとで比較した。ジャンクションの角度が大きくなるに従って、シャトリング後の総エネルギーが大きくなることわかる。この結果を踏まえて設計を進めており、製作可能な電極加工技術の調査を行っている。

## (2) 微細電極での実験に向けた装置の準備

微細電極での実験に必要な真空系、電場駆動系、観測系、光学系、レーザー光源系の準備を進めた。新型コロナウイルスやウクライナ情勢の影響により、納期が大幅に伸びたレーザー光源系以外の物品はおおむね調達した。

課題推進者: 長谷川秀一 (東京大学)

## (7) 研究開発項目7: 単一イオンと単一原子の量子インターフェース開発

## 研究開発課題1:リドベルグ励起によるイオン・原子間の量子インターフェース開発

当該年度実施内容:

当該年度の研究開発では「単一イオンの 1mK 以下での安定な冷却・トラッピング技術の確立」をマイルストーンとして掲げ、研究の基盤となる実験装置の立ち上げを行った。そのためにまず、研究遂行に必要な実験室環境の整備に取り組んだ。冷却イオンや冷却原子のトラッピング実験では多数のレーザーシステムや真空装置を用いる必要があるため、それらを安定的に設置するための光学除振動台を選定し、調達した。さらに、制御機器を設置するためのラック、真空排気ポンプおよびコイル冷却のための冷却水循環装置などの物品も準備した。

続いて、量子ビットとして使用する  $\text{Sr}^+$  イオンを安定的に捕獲できるようなイオントラップ装置の設計を行なった。トラップ設計においては、イオンの強い閉じ込めを可能にする条件 (1MHz 以上の閉じ込め周波数) を満たすようなトラップ電極のサイズおよび形状を数値計算により算出した。また将来的に中性原子をイオントラップ中に輸送することを念頭に置き、それに必要となる光双極子トラップ光の光路との干渉を避けるなどの条件も加味し設計を行なった。そのようにして得られた設計を基に、トラップ電極やそれを保持するためのマコール材さらには原子オープンを作製し、それらを組み上げることで主たるトラップ装置を実装するに至った。付随して必要となる真空部品も概ね調達できており、現在はそれらを組み立てている段階である。

これと並行して、イオンや原子の冷却に必要なレーザー光源システムの選定も行い、その一部を調達するに至った。また、使用するレーザー光源の波長を測定するための高精度波長計も準備し、それを用いたレーザー周波数安定化が行えるシステムも構築された。また、波長計校正のための原子線安定化光源の作製も行なった。原子オープンからの中性原子ビームをイオン化するための光源に関しては、ストロンチウムのホローカソードランプを用いてドップラーフリー分光法により共鳴線を観測することができ、イオン化遷移周波数の基準として使用できることが分かった。

当該年度の研究では、イオンの冷却に必要なレーザー光源の一部に納期遅延が生じたため、マイルストーンとして掲げる単一イオンのトラッピングには至らなかったが、ひとたびレーザー光源が入手されればトラップ実験に取り組むことができる段階まで到達することができた。

ストロンチウム中性原子のトラップ装置に関しては、原子オープン、ゼーマン減速機および原子の捕獲、冷却が行われるメインチャンバーの設計が既に完了し、必要な真空物品が概ね調達できている。装置設計に際しては、量子操作に使用するリドベルグ状態の電場への感度を考慮して、原子位置での電場を高精度に補正できるような電極構造も作製した。さらにリドベルグ状態励起の検知のためのイオン検出器(マイクロチャンネルプレート)も備え付けられる設計とした。また、原子を高効率に減速、トラッピングするための磁場を生成するためのコイルの数値シミュレーションも行い、ストロンチウム原子の磁気光学トラップ実験に向けた準備が概ね整った。

課題推進者: 土師慎祐(大阪大学)

### 3. 当該年度のプロジェクトマネジメント実施内容

#### (1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

##### 進捗状況の把握

代表機関である沖縄科学技術大学院大学(OIST)に設置された PM 支援チームの体制は、アシスタント PM (Administration)、外部研究資金セクションマネージャー、事務職員、アシスタント PM (Research) で構成されており、担当内容は次の通りになっている。

- アシスタント PM (Administration)：事務的全般を統括管理
- 外部研究資金セクションマネージャー：データマネジメント、知財戦略などを統括する。
- 事務職員：JST との調整、課題推進者との会議日程調整など事務的補佐(雇用・労務・経理、計画書、報告書、成果公表申請、広報・アウトリーチ、ウェブサイト管理)に携わる。
- アシスタント PM (Research)：プロジェクト計画・進捗管理に必要な最新研究動向の調査、プロジェクトに係る報告書などの取りまとめ支援、知財調査の補佐、プロジェクト間連携の窓口などを担当する。

代表機関(OIST)において、PM および PM 支援チームでの予算運営会議、知財戦略のための打合せ、データマネジメントに関する情報共有・今後の展開の会議などを実施した。効率的な各課題の進捗状況の把握や情報交換などは Slack 等を活用し実施している。また、新規課題推進者および研究参加者を含めた課題推進者会議を OIST で開催した。一部オンラインでの参加もあったが、各課題の研究内容、目標/マイルストーン、プロジェクト全体における位置づけ、進捗/準備状況、年次計画および人員体制などを発表し、プロジェクト全体の進捗状況を把握した。九州大学、NICT へのサイトビジットも開始し、研究環境及び進捗を確認した。

##### 研究開発プロジェクトの展開

研究開発プロジェクトの更なる体制強化のために当該年度から新規課題推進者を 6 名追加した。当該年度からスタートした課題においても策定した研究計画に沿って研究活動を行い、必要な機器を購入し、実験系を立ち上げるなど研究体制の構築を実施している。研究機関間では連携を密にとり、情報共有を徹底することで研究開発計画の柔軟な変更を可能とするよう努めている。国際連携としては、交流がある研究室などから、連携に取り組むことを検討しており、例えば、現時点での候補先として、Mainz(Schimidt-Kaler)、Oxford(Lucas/Goodwin)、PTB/Hannover(Ospelkaus/Mehlstäubler)などを考えている。令和 5 年度には大阪大学(4-2 豊田 PI)の研究参加者を Oxford 大学 Lucas グループに派遣する予定。

#### (2) 研究成果の展開

当該年度の研究開発プロジェクトにおいて知財に関する活動は生じなかった。令和 3 年度に引き続いて、知財担当部署間の交流の仕組みを整備する。PM 支援チーム、OIST 広報担当部署およびアウトソーシングの協力により、既存のホームページを一新し一般公開した。

ホームページは本研究開発プロジェクトの新規参加者を含めた各課題推進者へのホームページへリンクしている。

### (3) 広報、アウトリーチ

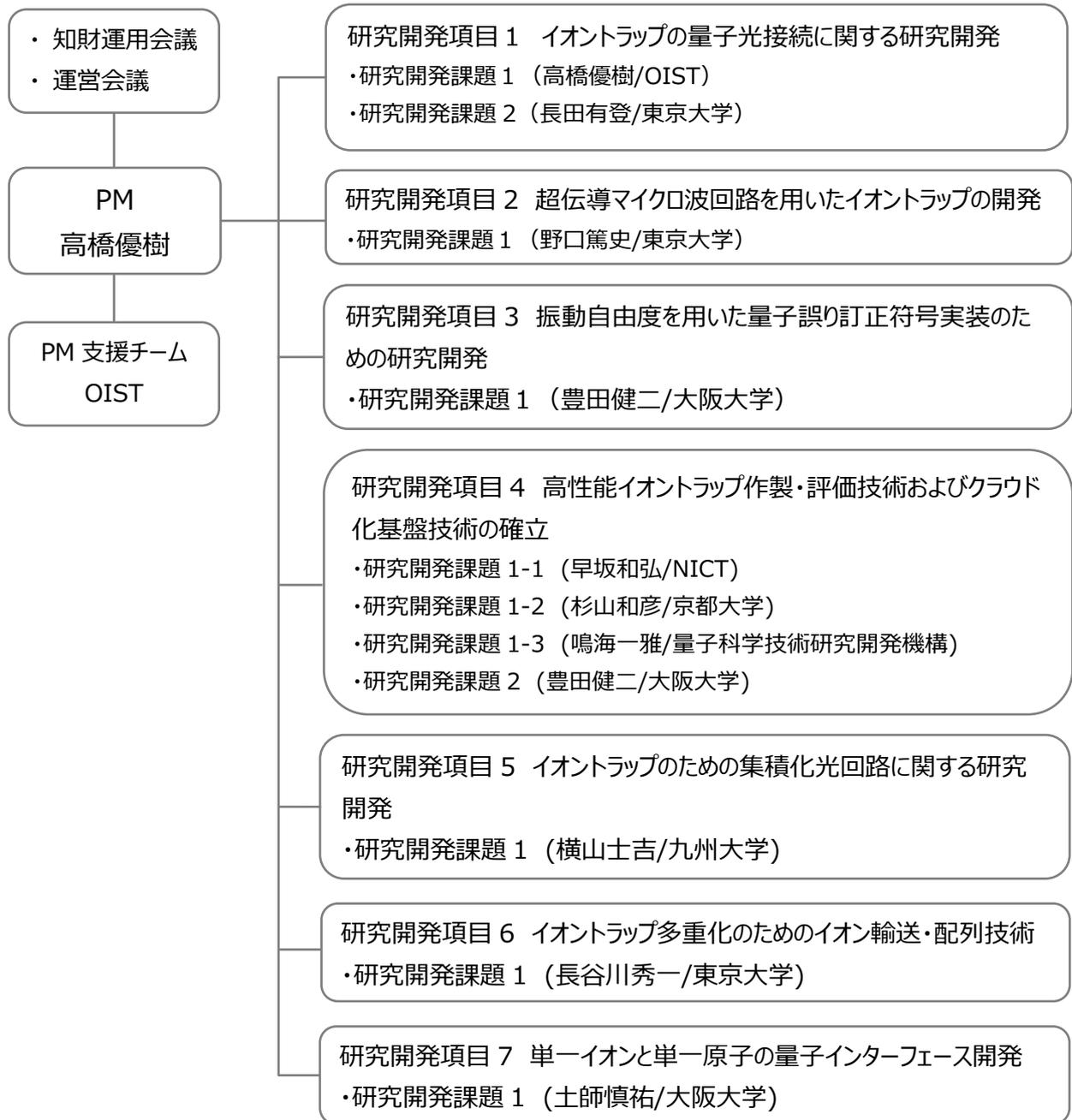
広報活動としては新規課題推進者の追加に伴い、令和3年6月から一般公開しているホームページをリニューアルした(<https://www.oistmoonshot.jp/>)。ホームページでは、プロジェクトの概要、研究開発プロジェクトが貢献する未来像、参加研究機関、課題推進者、PMへのインタビュー形式の動画を配置し、本プロジェクトを紹介している。また、このホームページから各課題推進者のホームページにリンクしており、公表できる研究成果、最新活動状況などの情報を得ることができる。

アウトリーチ活動においては、目標6の人材育成の一環として、Q-LEAP 量子技術教育プログラムとの共同でサマースクールをOIST 講義室と近隣のホテル会場で開催した(令和4年9月23～30日)。参加人数は講師24名、受講生49名およびオンライン受講登録者164名であり、オンサイトの参加者にはグループワーク、ポスターセッションなど、参加者同士での議論の場も設けた。オンラインでの受講者には、SNSを用いて質問に対応した。また全ての講義は録画しており、参加者限定で共有できるようにした。

### (4) データマネジメントに関する取り組み

研究データ基盤システム(NII Research Data Cloud: NII-RDC)の研究データ管理基盤(NIIストレージ)を活用するために、GakuNin RDM を利用し、研究データを各課題推進者と共有することから始めた。今後は、管理対象データにメタデータを付与し、メタデータを集約、PDに提出・承認いただき、NII-RDCを用いて公開することを目標としている。

#### 4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



##### 知財運用会議 構成機関と実施内容

参画する研究開発機関のうち、知財運用会議にて協議すべき案件に関わる機関、ならびに PM、JST が参加することを基本とする。本プロジェクトにおける研究の一部の知財権利化について、代表機関の知財担当部門と会議を実施した。

##### 運営会議 実施内容

令和 4 年度から：ジャンクション&シャトリング研究に関する定例会議を実施(計 6 回)。  
令和 4 年 8 月 9-10 日：令和 4 年度から新規に参加した課題推進者(6 名)および関連する研究者/学生を含めた高橋プロジェクト全体会議(ハイブリッド会議)を OIST で実施した。各課題推進者による研究発表を行い、各自担当課題のプロジェクト全体における立ち位置、目標、マイルストーン、進捗状況、年次計画、人員体制を共有、研究開発に有効な情報交換をし、今後の展開・方針を検討した。

## 5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT含む)	国内	国際
未登録件数	0	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	0	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	3	1	4
口頭発表	5	2	7
ポスター発表	0	1	1
合計	8	4	12

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	5	5
(うち、査読有)	0	3	3

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	0	0	0
書籍	0	1	1
その他	0	0	0
合計	0	1	1

受賞件数		
国内	国際	総数
0	0	0

プレスリリース件数
0

報道件数
1

ワークショップ等、アウトリーチ件数
1