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

2023年度までの進捗状況

1. 概要

イオントラップを用いた大規模量子コンピュータ実現のため、本テーマでは複数のイオントラップを、光子を介して相互に接続する量子光接続の手法を追及します。核となるのは微小光共振器と線形イオントラップを統合したイオントラップデバイスの開発です。微小光共振器はイオンと光子の結合のために、線形イオントラップは複数のイオンを一直線上に捕獲するために必要です（下図参照）。これらを単一のデバイスで同時に実現して初めて量子光接続が可能となります。

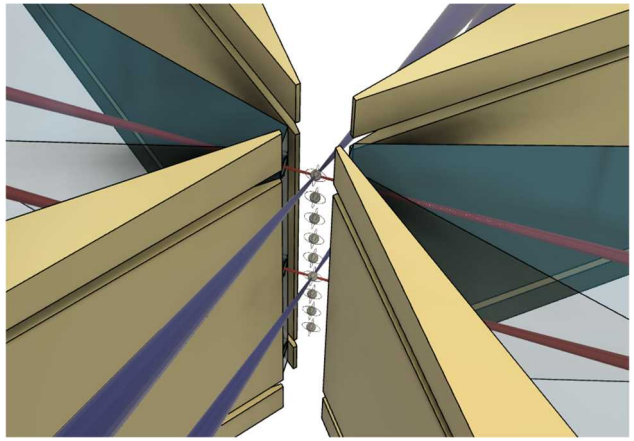

図１．微小共振器一体型線形イオントラップの模式図

その他にも、バリウムイオンを用いたイオン・光子結合の増強、低温環境下での量子光接続、半導体ミラーの開発などのテーマを探求し、量子光接続のさらなる向上に挑んでいきます。

2. これまでの主な成果

2022 年度にはレーザーを用いた 3D 加工で作製したイオントラップを実際に真空槽内に配置し（図３）、カルシウムイオンを捕獲することに成功しました。2023 年度は、この捕獲されたイオンを用いて、イオンのレーザー冷却、レーザー分光、トラップ周波数の測定、マイクロ運動の補正などの種々の実験を行いました。

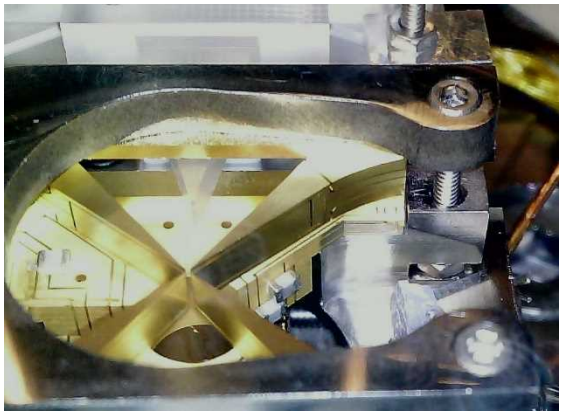

図２．真空槽内に配置されたイオントラップ

これらの測定を通じて、本イオントラップの特性を理解し、捕獲イオンの運動の制御方法を確立することは、微小共振器を統合する次のステップに進むために重要です。

また、我々は半導体ミラーを用いた光共振器のイオントラップ上への集積にも挑戦しています。2023 年度には半導体ミラー基板上にイオントラップのための電極構造を作成することに成功し、電気配線や真空槽への導入を済ませました（図４）。

3．今後の展開

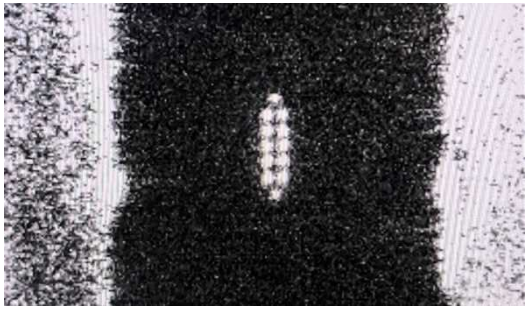

図３．トラップされたカルシウムイオンのクーロン結晶

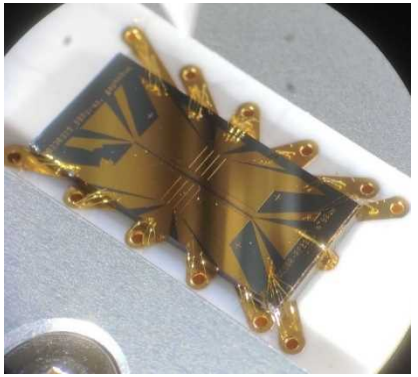

図４．半導体ミラー上に作製されたイオントラップ

今後はおのおののイオントラップで微小光共振器を集積化し、イオンと光共振器の結合の観測を目指します。

国立研究開発法人 科学技術振興機構 Japan Science and Technology Agency

研究開発項目

2．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

2023年度までの進捗状況

1. 概要

イオントラップ量子コンピュータは、均一な量子ビットを環境から孤立して準備し、世界で最も高い精度で制御された量子コンピュータです。しかしながら、少ないイオン数で効率的に誤り耐性操作を実現するには、さらなる高精度制御を実現しなければなりません。そのため、本テーマでは、クライオイオントラップ技術とさらにその応用として超伝導マイクロ波回路を用いた超伝導回路イオントラップの開発を行います。極低温下でのイオントラップは、電気ノイズや真空度の改善により高性能イオントラップの舞台として研究がなされてきました。さらに超伝導マイクロ波回路技術を取り入れることで、低消費電力・高精度動作を両立する高性能イオントラップシステムを構築します。

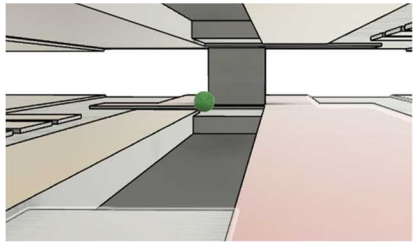

図１．微細加工超伝導回路を使ったイオントラップ図

2. これまでの主な成果

①クライオイオントラップの開発

低振動型冷凍機を用いて、クライオイオントラップを開発しました。イオントラップのための電極を極低温環境下に置くことで、イオンに対する電場雑音を低減することができます。さらに超伝導技術を導入し、捕獲のための大振幅 RF を超伝導共振器によって実現しました。高い Q 値を持つ超伝導共振器を使って増幅することで、小さな RF 入力でイオンを捕獲することができます。これは、低温環境への熱負荷を減らすことや、大規模なイオントラップ系を低温環境下で実現するための重要な技術となります。この技術により、これまでにくらべて１桁から２桁程度小さな RF 強度でイオンを捕獲することができました。図２にこの技術によって捕獲されたイオンの蛍光画像を示します。

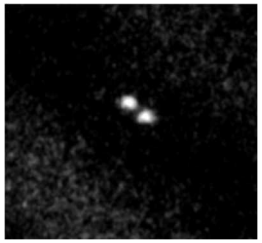

図２．捕獲されたストロンチウムイオン２個の写真

②イオン制御用超伝導回路の開発

トラップイオンの量子ビットをマイクロ波で制御するための小型超伝導回路を開発しました。低消費電力で大きなマイクロ波磁場を実現するため、

・大きな静電容量を持つ低インピーダンス共振器
・トラップ電極に集積化できる低フットプリント
・４－６K での高い Q 値

を合わせ持つニオブ製櫛型超伝導回路を図３に示します。

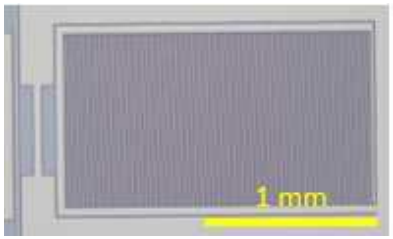

図３．低インピーダンス小型超伝導マイクロ波回路

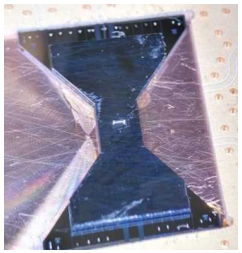

図４．フリップチップ実装された超伝導イオントラップチップ

この回路の高強度特性と数値シミュレーションにより、既存の方法に比べて数倍高速な量子ゲートを 500 分の 1 の MW 強度で可能であることがわかりました。

③超伝導イオントラップ実装技術の開発

超伝導回路はシリコン基板上に 2 次元に集積化されています。2 次元回路でイオンへの強い閉じ込めと強いマイクロ波磁場を実現するため、フリップチップと呼ばれる方法による 3 次元実装を用います。そのため、シリコンの深堀技術を利用することで、これまでよりもさらに高精度な組み立て技術を開発しました。図４ではフリップチップ実装された超伝導イオントラップチップを示します。

3．今後の展開

今後は、実際に超伝導回路で生成した磁場でイオンを制御し、超伝導イオントラップ技術の実現を目指して研究を進めます。超伝導回路で大きな磁場勾配をイオンに印加することで、レーザーを用いない超高精度な量子状態制御が実現します。さらに、他テーマで開発されているイオントラップ光接続技術との融合をはかり、その実装上の課題を洗い出し、克服していきます。

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

2023年度までの進捗状況

1. 概要

量子コンピュータを用いて有用な計算を行うためには、誤り訂正された論理量子ビットおよびその間の演算を実現することが鍵となります。多準位を擁するイオンの振動モードは、論理量子ビット実現のための有力な候補です。誘導ラマン散乱を用いて、集団振動フォノンモード間ビームスプリッター相互作用を実現し、それによりフォノンモード間量子もつれを実現することは、論理量子ビット間演算実現のための重要なステップであると考えられます。このような複数モードに対する量子もつれ操作とスクイーズド状態を用いれば連続量クラスター状態を生成することが可能になります。さらにボソニック符号をイオンの振動状態として準備し、上記のビームスプリッター相互作用を活用すれば複数モードにまたがる符号状態のゲート操作が実装できます。

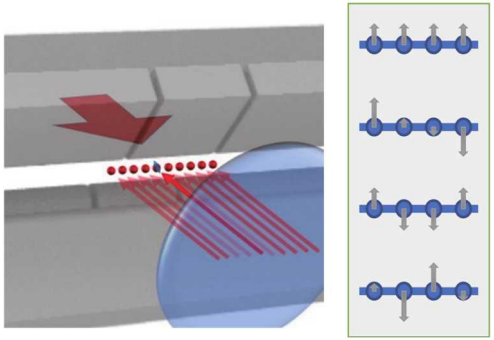

図1（左）対向するレーザービームによる動径振動モードの励起、（右）イオン配列の動径方向の集団振動モード。

2. これまでの主な成果

誤り訂正に用いることのできる状態を振動モードにおいて生成することにむけて、熱浴エンジニアリングによる振動スクイーズド状態生成実験を行いました。図2(a)はスクイージングパラメーターr=0.70 に対するブルーサイドバンドラビ振動の結果です。図2(b)は、図2(a)の結果に対するフィッティングにより得られたフォノン数分布です。これは、真空スクイーズド状態に対応する偶数性を反映している可能性がありますが、さらに精度・再現性を高める必要があると考えており、研究開発を継続中です。

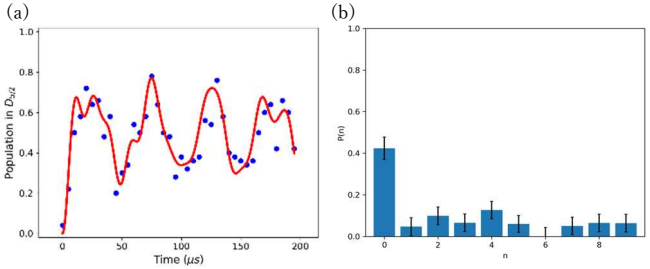

図2 スクイーズド状態生成実験の結果。(a)スクイージングパラメーターr=0.70 の場合のブルーサイドバンドラビ振動測定結果。(b)フィッティングにより推定されたフォノン数分布。

振動モードにおける状態生成および振動モード間ビームスプリッター相互作用において高い忠実度を得るためには、高い振動状態コヒーレンスを実現することが必要です。それに関連して、今回、単一イオン軸方向振動モードの運動コヒーレンス評価を行ったところ、運動ラムゼイ干渉フリンジの減衰時間として 112±19 ms という値が得られました（図3）。これは、他のグループが論文などに記載している値と比べても、顕著に長いコヒーレンス時間であるといえます。今後、このような軸方向振動モードに対する操作を複数イオンに拡張することで、複数振動モードに対するコヒーレントな操作を実現し、誤り訂正状態の生成およびゲート操作にむけて研究開発を進めていきたいと考えています。

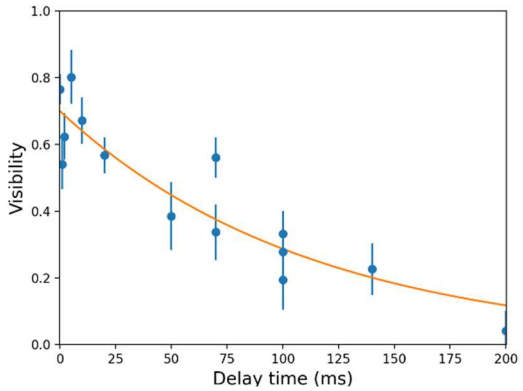

図3 単一イオン軸方向振動モードに対する運動ラムゼイ干渉法によるコヒーレンス時間の測定結果。

3. 今後の展開

複数振動モード間に準備したスクイーズド状態を、ビームスプリッター相互作用によって混合することにより、EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 型量子もつれ状態を実現することを目指します。また、単一の振動モードに対して、ボゾニック符号により、単一量子ビットを符号化するとともに、複数の振動モードに符号状態を準備して、モード間にビームスプリッター相互作用を印加することにより、特に複数モードにまたがるボゾニック符号に対する量子ゲート操作を実現することを目指します。

研究開発項目

4－1. 高性能イオントラップ作製・評価技術の確立

2023年度までの進捗状況

1. 概要

光接続イオントラップ量子コンピュータ用トラップモジュールを実現するには、量子光接続、マイクロ波量子操作、フォノン量子符号化等の新奇技術実装を可能とするイオントラップの開発が必須になります。本研究開発テーマでは、これらの機能を実装可能とするイオントラップを製作し評価する技術を確立します。開発したイオントラップの評価は製作・評価グループが Ca^+(カルシウムイオン)を用いて実施するとともに、Yb^+(イッテルビウムイオン)を用いた評価、Ba^+(バリウムイオン)を用いた評価を二つのグループが並行して行い、それぞれの用途に応じた評価実験で得られた知見を研究開発に反映させる開発体制を確立します。

2. 2023年度までの成果

イオンの束縛に優れ、光接続に用いるミラーの影響を軽減する立体型イオントラップと、ジャンクション等の機能を埋め込むのに適した平面型イオントラップについて、同時に開発を進めています。

立体型イオントラップでは熱伝導に優れた窒化アルミ(AlN)基板を貼り合わせた構造のトラップに、ローパスフィルタ、温度センサ、rf 給電用リボン等のトラップ動作に必要な実装用部品をアセンブルした試作品が完成し(図 1)、プロジェクト内でのトラップ供給を開始することができました。平面型イオントラップではプロジェクト内外への供給に向けたトラップチップの交換が真空内配線無し可能なプラグアンドプレイ対応トラップ真空パッケージの開発を進め、トラップ駆動電気系も含めた試作品を完成しました(図 2)。トラップ動作に必要な真空度や電気的特性の評価実験が完了し、プロジェクト内での供給を開始することができました。また、供給するトラップチップは国内企業による供給が可能となりました。

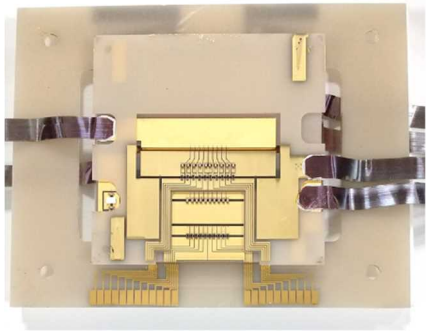

図 1. ローパスフィルタ、温度センサ等のトラップ駆動用部品のアセンブルが完了した立体型イオントラップ

立体型トラップ Yb^+評価チームでは、昨年までに冷却に成功した $^{174}Yb^+$に加え、量子計算に用いられる $^{171}Yb^+$を冷却し、$^2S_{1/2}$ – $^2D_{3/2}$時計遷移の単一イオン分光に成功しました。(図 3)。

Ba^+平面型トラップ評価チームでは、既存の線形トラップを用いたシステムでの予備実験を進め、Ba^+がほぼ確実に捕獲されていることを確認しました。ここではトラップに捕獲されたイオンをトラップの軸方向に射出し、イオン検出器で検出されるまでの飛行時間を測定、この飛行時間とトラップの各種パラメータ(幾何学的形状および寸法、RF 周波数および振幅、DC 電圧)に対する依存性からイオン種の特定を行いました(図 4)。一方で、評価する予定の平面型イオントラップの実装を完了しました。今後、評価のための準備の一環として真空系及び電気系のテストを行います。

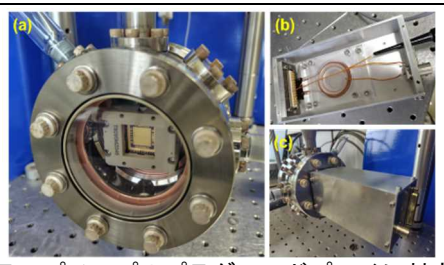

図 2 トラップチップのプラグアンドプレイに対応した真空パッケージ。 右上:rf 共鳴回路、左下:電気回路 box

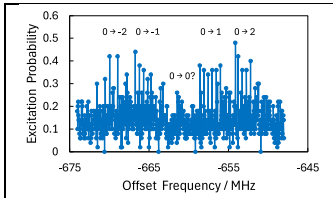

図 3 単一 $^{171}Yb^+$ 時計遷移のゼーマン成分

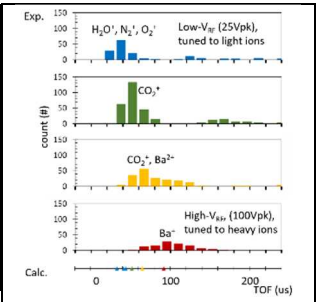

図 4 トラップパラメータに対する依存性

3. 今後の展開

作製・評価グループが Ca^+を用いて立体型、平面型イオントラップの評価、性能改善を行い、プロジェクト内に供給するとともに、国内企業との協力により、プロジェクト内外への供給に適した真空パッケージの開発を進めます。Yb^+立体型トラップ評価システム構築では、量子ビット実現に必要なサイドバンド冷却法を実装するとともに、立体型トラップ装置を動作させ評価を進めていきます。Ba^+平面型トラップ評価システム構築では、トラップ寿命、加熱レート等の平面型トラップ特性評価を実施する予定です。プロジェクト内グループ、国内企業の協力により、光接続イオントラップ量子コンピュータ用モジュールを実現するトラップの製作・評価技術の確立を目指します。

研究開発項目

４－２．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

2023年度までの進捗状況

1. 概要

イオントラップ量子コンピュータのクラウド化に必須となる自動化技術、遠隔操作技術の実装を行い、小規模な量子計算機を教育機関等で遠隔的に利用できる環境を構築します。そのために、イオンの基本的な制御技術の信頼性を大幅に高め、実験における一連の操作（イオンのロード、レーザー冷却、ゲート操作等）をすべて遠隔実行可能にします。さらに、既存のイオン内部状態量子ビットを用いて比較的少数個（10 個オーダー）の量子計算機を実現し、これを遠隔から操作可能な状態で提供できる環境を整備します。また、クラウド化されたイオントラップ量子コンピュータの性能を向上させる基盤技術開発として、イオントラップモジュールを統合するためのイオンの輸送実験、量子ビット数拡張のための２次元的なイオン配列実験を行います。

2. これまでの主な成果

クラウド化されたイオントラップ量子コンピュータのために、イオントラップ装置の立ち上げを行いました。レーザー冷却に用いるイオントラップ装置については、機械加工３次元リニアトラップ、原子オーブン等を真空チェンバーにインストールしました（図 1）。これを用いて、Yb+イオンのローディングに成功しました（図 2）。また、誘導ラマン励起用光学系の設計・設置を行うとともに、誘導ラマン遷移を用いて安定に量子ビット制御を行うために必要なピコ秒パルスレーザーの繰り返し周波数安定化を行いました。パルスレーザーのファンノイズを除去するために外部空冷システムを設置したうえで実験を行うことにより、12 GHz 付近のビート信号に対して位相ロックを行うことに成功しました。これにより、この光源を量子ゲート操作に用いる準備ができたといえます。さらに、4 イオン配列の個別アドレッシングのための集光光学系を構築しました。

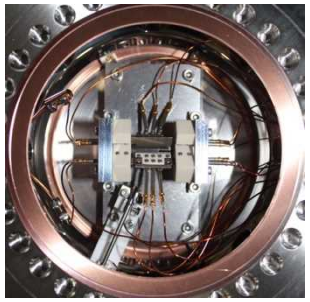

図 1　機械加工 3 次元リニアトラップ を真空チェンバーにインストールしたところ。

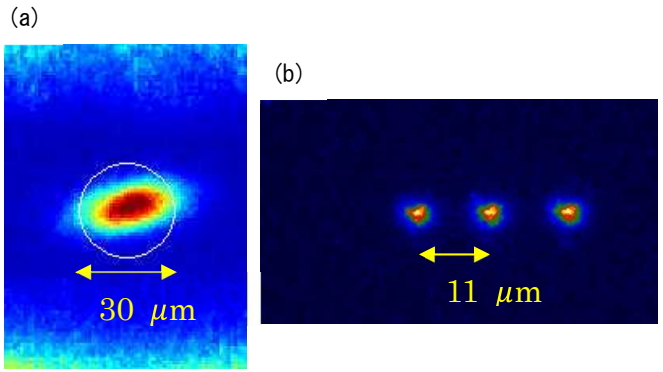

図 2 イッテルビウムイオンローディング実験の結果。(a) トラップされた Yb+イオン（クラウド状態）の蛍光画像。(b)結晶化した Yb^+イオンの画像。光っている 3 個のイオンは $^{174}Yb^+$であり、また左端に dark ion（$^{174}Yb^+$以外の同位体イオン）がいると推測される。

イオンの輸送技術開発では、図 3(a)のような複数のトラップ領域をもつ平面型イオントラップを用いて実験を行っています(図 3(b))。イオン輸送では各電極に印加する電圧を変化させてイオンの位置を操作します。そのためトラップ電極の高性能化に加えて、どのように電圧を制御するかも重要な課題です。そこで多数の出力をもち、汎用の装置

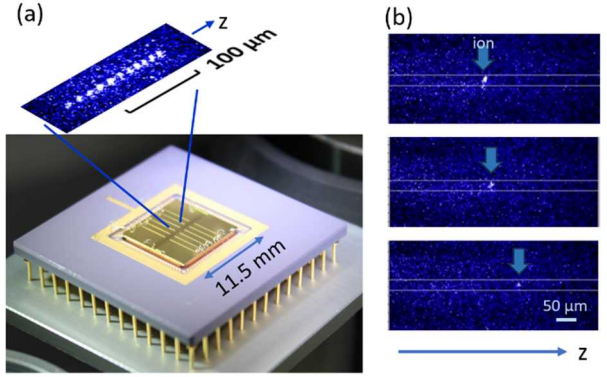

図 3　(a)平面型トラップ電極と電極表面から約 200 μm の高さに捕獲されたカルシウムイオンの画像。(b)単一イオンの輸送実験のスナップショット。

よりも２桁速く電圧を変化できる FPGA ベースの電圧制御装置を企業との共同研究で開発し、これによって高速化が可能になりました。

3. 今後の展開

量子ゲートを実現し、その精度を向上するとともに、比較的単純なアルゴリズムを実装し、量子ゲート・アルゴリズム実験を運用できるようにします。また、遠隔からの運用のテストを行います。さらに多くのアルコリズムを試験実行するとともに、それらについて遠隔からの実行を実現します。イオンの輸送は複数のモジュールから成る量子コンピュータの計算所用時間にかかわる重要な問題です。今後は輸送前と輸送後のイオンの状態の変化などを詳細に調べ、イオントラップモジュールを統合し動作させる場合に最適な輸送方法を確立していきます。

国立研究開発法人 科学技術振興機構 Japan Science and Technology Agency

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

2023 年度までの進捗状況

1. 概要

イオントラップ量子技術には通常、多数のレーザー光が用いられます。従来は多数の光学素子を堅牢な除振台の上に精密に並べて固定し自由空間の光回路を構築していましたが、本テーマではこの光回路を小さなチップ上の微細な光素子からなる光回路で置き換え、光回路がイオントラップと一体化した「光回路一体型イオントラップ」の実現を目指しています。この研究の推進によりイオントラップ量子ノードの大幅な小型化と安定化が期待でき、光接続された多数のイオントラップ量子ノードを量産・実装するための技術的ハードルがはるかに易しくなります。

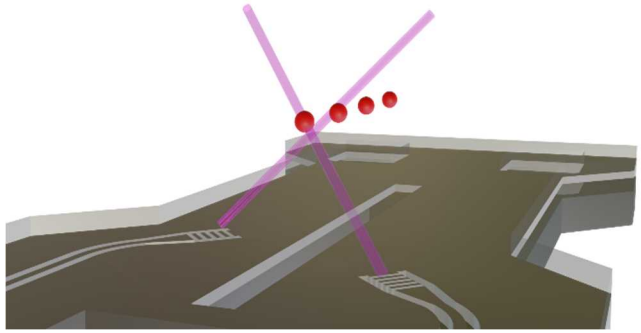

図１．光回路一体型イオントラップの概念図

2. これまで主な成果

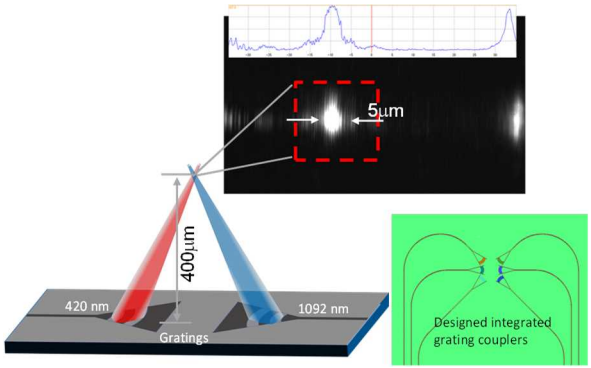

図２．光回路素子（光出射素子、光変調器）の開発

九州大学ではイオントラップに多種のイオンポンプ用レーザーを導入するための集積光回路を開発しています。波長は可視から近赤外域にわたっており、最大 6 波長のレーザー光源をイオントラップ中に集光する必要があります。このような集光導波路素子を作製するため、Si 基板上で光集積デバイス化が可能な SiN 系光導波路チップの作製を行いました。得られた集光特性は、東京大学で進めているイオントラップ内に実証することを目指しています。これまでに、イオン冷却で必要とする波長 422nm から 1092nm の複数のレーザー光を集光できる照射素子を作製してきました。また、最終的にイオントラップ内へ導入するレーザー光はその位相・周波数制御、および安定化などが必要となります。従来、これらの光源制御はデスクトップで調整がされていましたが、本研究の集積化光回路はオンチップで制御するデバイス実装化も目指しています。そのため、電気光学を使った高効率位相シフタの開発も進めています。光回路一体型イオントラップは、東京大学のグループで進めるイオントラップ実験系に導入される予定です。

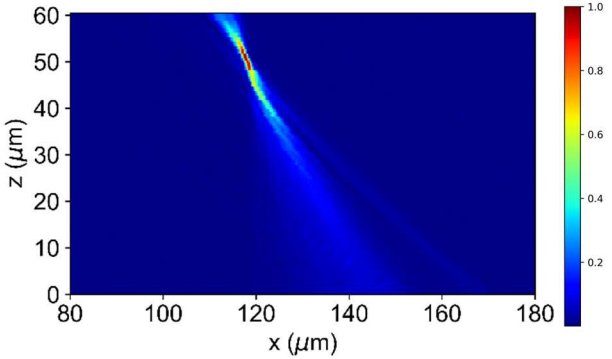

図３．試作された光出射素子による放射パターン

また、東京大学のグループでは光回路一体型イオントラップの集積手法の開発（特許申請中）やそれを実装するための光回路チップの加工技術の開発を、九州大学と相補的な形でおこなっています。また、捕獲されたイオンのうち一つだけを個別にレーザー照射するための光出射素子の設計も行い、その試作と評価を行いました。

3. 今後の展開

今後はこれまでに設計、評価した光出射素子を実際にイオントラップに組み込んだ光回路一体型イオントラップの実現に向け、デバイス設計されたフットプリント内で光集積化を進めていきます。

この実現によってさまざまな光回路素子をイオントラップに組み込んでテストするための基礎ができますので、光出射素子に加えて光変調器などのより高機能な光素子の一体化へと進み、イオントラップ量子技術とフォトニクスの融合した新分野の最先端へチャレンジし、量子ノードの小型化を飛躍的に進めることができます。

研究開発項目

6. 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

2023年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発テーマは、複数元素イオンを任意の順番でイオントラップに配列し、多重化を図るための技術基盤の整備の役割を担っています。これにより量子ビットおよび計算時間の拡張に貢献します。

多数のイオンを輸送するためには2次元イオントラップが優れていますが、一方で、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くなります。また、イオンから光を伝送するに当たっては、イオンの捕獲位置をしっかり確定させ、ファイバと高効率で結合させることが非常に重要となります。そのためには、イオンのトラップポテンシャルが深く堅牢性に優れている3次元イオントラップが望ましいと考えられます。本研究では、3次元イオントラップに対して、協同冷却を念頭において、異元素イオン(CaおよびSr)を同時に捕獲・配列できるような3次元微細加工電極によるトラップ装置の開発に取り組んでいます。

2. これまでの主な成果

昨年度電場解析ソフトを用いて設計したジャンクション電極について、検討を行いました。それを元に課題4-1-1(NICT)と共同で開発を進めるとともに、製作工程を6工程に細かく分割して各工程を分業委託する方針で、可能性を模索しています。

課題4-1-1(NICT)から平面型イオントラップの供与を受けて、システム構築を行いました(図1)。また、昨年度調達した物品に加え、レーザー光源系の調達が完了し、真空系、電場駆動系、観測・光学系、レーザー光源系などの実験系の立ち上げを行いました。

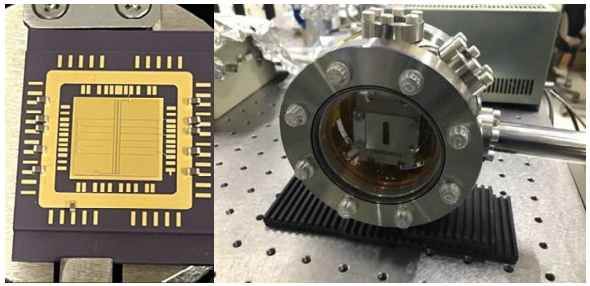

図1:(左)供与を受けた平面型イオントラップ
(右)平面型イオントラップをインストールしたソケット型トラップチャンバー

真空系に関しては、3種類のポンプを組み合わせることで、5.6×10^{-9} Torrの真空度を達成し、イオントラップが可能な真空特性を確認できました。電場駆動系に関しては、微細電極トラップに必要なRF周波数を生成するため、課題4-1-1(NICT)の協力のもと、ソケット型ヘリカル共振器を製作しました。増幅試験を行い、周波数19 MHzにおいて約4倍の増幅を確認し、プリアンプと組み合わせることでイオントラップが可能なRF電圧(振幅:100~150V)を達成しました。また、Labview経由での直流電圧の制御系を構築しました。観測・光学系に関しては、過去に構築した光学系(倍率10倍)を、鏡筒長を伸ばすことで倍率20倍まで増倍に成功し、qCMOSカメラと組み合わせることで捕獲したイオン間の距離も正確に観測できる見込みであることが明らかになりました。レーザー光源系に関しては、Ca原子の光イオン化のために423 nmと375 nm、捕獲イオンの冷却および再励起のために397 nmと866 nmの4波長の外部共振器型半導体レーザー(ECDL)を使用し、このうち波長375 nmのレーザーに関しては自作のリトロー型ECDLを製作しました。その上でECDLの各種パラメータの最適化を行い、特に発振閾値電流値に関して、フリー動作時の46.5 mAから43.3 mAまで改善し、強い光フィードバックを得ることができました。

図2:構築したイオントラップ装置

完成した実験系(図2)および平面型イオントラップを用いて、目標捕獲イオンの1つであるCaイオンのトラッピング実験に取り組んでいます。

3. 今後の展開

製作を進めている3次元微細加工電極のプロトタイプを完成させ、目標捕獲対象であるCa/Srイオンについて、個別イオンの捕獲・レーザー冷却による観測を目指します。イオンの観測が可能になれば、DC電圧を変化させることでイオン輸送に取り組みます。さらに、両イオンの同時捕獲・観測および任意の順番でのイオン配置を目指します。

研究開発項目

7．イオンと原子の量子インターフェースの開発

2023年度までの進捗状況

1. 概要

イオントラップを用いた大規模な量子コンピューティングにおいては、量子ビット数の拡張を行うために独立したトラップモジュール間を接続することが重要となります。そのためにはイオンを異なる量子系と結合させる技術を確立する必要があります。本研究テーマでは単一イオンと中性原子のハイブリッドトラップを開発し、イオン-原子間の量子インターフェースの開発を行います。中性原子はイオントラップデバイスや光共振器との高い親和性を示すため、トラップモジュール間のつなぎ役として活用することが可能となります。それにより、より効率的なイオン量子ビット数の拡張が行えるものと期待されます。

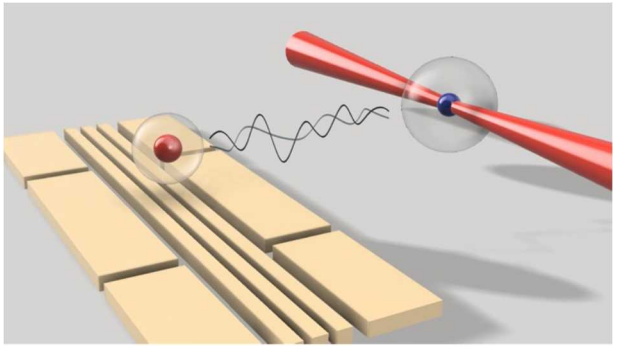

図 1. イオンと原子の量子インターフェース

2. これまでの主な成果

これまでの研究において単一イオンと中性原子のレーザー冷却とトラッピングを行いました。そのためにまず、線形イオントラップ装置を開発し真空装置内へと実装しました。イオンを捕獲するためにはイオンのレーザー冷却が欠かせません。今年度の研究では必要となるレーザー光源の開発を行い、イオントラップ装置へと照射することでストロンチウムイオンの捕獲と冷却ができることが確認されました。図 2. はその時に高感度 CCD カメラにより撮像された単一/複数のイオンからの蛍光画像を表します。レーザー冷却されたイオンの温度は数百マイクロケルビンのオーダーと見積もられ、こういった状況においては一次元クーロン結晶が形成されることがわかります。今後はイオンを高性能量子ビットとして動作させるためのコヒーレント量子制御技術の開発に取り組みます。

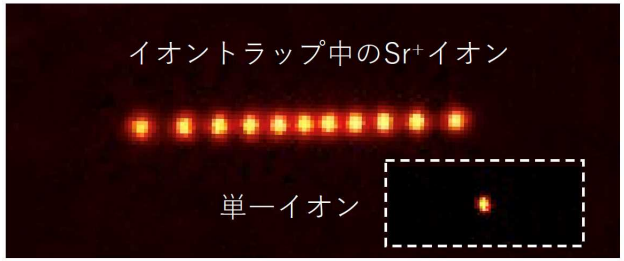

図 2. トラップされたストロンチウムイオン

これと並行して、中性原子（ストロンチウム原子）の捕獲と冷却のための実験装置開発も進めました。中性原子のトラッピングにおいてはまず、気化した原子をゼーマン減速機により予備冷却します。そのようにして準備された低速の原子はその後、磁気光学トラップ中で捕獲されさらにレーザー冷却されることとなります。本研究ではそのために必要となるトラップ装置と高パワー冷却用レーザー光源の開発を行い、ストロンチウム原子を真空装置中にトラップできることが確認されました。図 3 中央では冷却原子集団が磁気光学トラップ中でレーザー冷却されている様子が見て取れます。このようにして準備された原子はその後、光ピンセットへと移行され自在に移動・配列することも可能となります。さらに、レーザー光による励起を行うことで原子をリドベルグ状態へと準備し量子操作へと応用することができます。

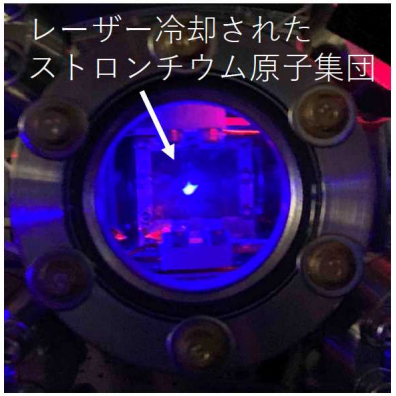

図 3. トラップされたストロンチウム原子

3. 今後の展開

今後の研究においては、これまでにトラップ中に準備されたイオンや中性原子を量子ビットとして機能させるための量子操作技術の開発を進めます。本課題では特に、原子やイオンをリドベルグ状態へと励起すること実現される、新規な量子結合方式や高速な量子ゲート操作に着目しています。来年度の研究においてはそのための基盤技術の確立にも取り組みます。こういった研究開発課題は、イオン-原子混合系といったハイブリッド量子システムにおける量子インターフェース実現へと発展することが期待されます。