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。

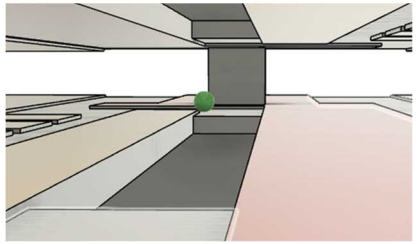

図１．微細加工超伝導回路を使ったイオントラップ図

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

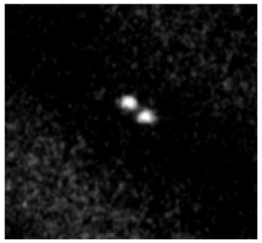

図２．捕獲されたストロンチウムイオン２個の写真

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。

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。

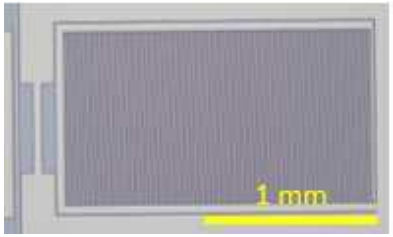

図３．低インピーダンス小型超伝導マイクロ波回路

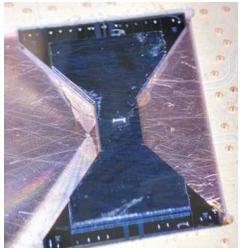

図４．フリップチップ実装された超伝導イオントラップチップ

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。