

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K12635

研究課題名(和文) 小型イオンマイクロビーム装置における超高電場加速レンズに関する研究

研究課題名(英文) Study on ultra-high electric field acceleration lens in a compact ion microbeam system

研究代表者

大久保 猛 (Ohkubo, Takeru)

国立研究開発法人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・主幹研究員

研究者番号：40446456

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：イオンマイクロビームは、量子コンピュータに必要な量子ビットを超精密に配列したり、光通信での新たな光学素子を微細加工で製作したりできる技術である。研究の全体構想は、ビームの加速・集束を静電場で同時に行う加速レンズを利用した超高精度イオン配列・微細加工装置を開発して、どこまでビーム径を縮小できるのかを追究することである。

本研究では、QST高崎研量子機能創製研究センターのレーザー冷却イオンプロジェクトで目指しているレーザー冷却単一イオン源に適応できるレンズ系開発を進め、縮小率0.006の2段加速レンズを用いて4.5nmの精度で照射できるレンズ系を設計することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、QST高崎研独自の技術である加速レンズとイオン源を組み合わせた超高精度イオン配列・微細加工装置の空間分解能が数ナノメートル程度になる見通しが得られた。今後、更なる開発によってこの装置を実現することにより、現在は限られた研究機関等でしか行われていない量子ビット配列等の研究が全国の大学の実験室や工場等に広がっていくことが予想され、我が国の量子コンピュータや光通信の分野における競争力増大に資すると考えられる。

研究成果の概要(英文)： Ion microbeams are a technology that enables the ultra-precise alignment of quantum bits required for quantum computers and the fabrication of new optical elements in optical communications by microfabrication. The overall concept of the research is to develop an ultra-precision ion array and microfabrication system using acceleration lenses that simultaneously accelerates and focuses the beam by electrostatic fields, and to investigate how small the beam diameter can be reduced.

In this study, we proceeded with the development of a lens system that can be adapted to a laser-cooled single ion source, which is the goal of the Laser-cooled Single Ion Source Project at the Quantum Materials and Applications Research Center, Takasaki Institute for Advanced Quantum Science, QST, and succeeded in designing a lens system that can irradiate with a precision of 4.5 nm using a two-stage acceleration lens with a magnification of 0.006.

研究分野：加速器工学

キーワード：ナノビーム マイクロビーム イオン配列 微細加工 小型装置

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

イオンマイクロビーム技術は、これまで静電加速器やサイクロトロンなど大型加速器から発生するイオンビームを電磁石によって集束することにより発展してきた。この方式では、加速されて出てきたイオンに対して大きな縮小率を得るために数メートル程度の長いレンズ系が不可欠であることから、イオンマイクロビームは大きな研究所など限られた場所にしか設置されず、利用者も限られていた。一方、情報処理・通信技術が目覚ましい進歩を遂げ、量子コンピュータや光通信用光学素子が注目されるようになり、その製造技術に関する様々なアイデアが生まれ活発な開発競争が起こっていた。イオンマイクロビームは、量子コンピュータに必要な量子ビットを超精密に配列したり、光学素子を 1 マイクロメートル程度の空間分解能で三次元的に製作したりできる技術であることから、早急に大学の実験室や工場で利用できるよう広く普及して我が国の量子コンピュータや光通信の分野における競争力増大に資する必要があった。

研究代表者は当時、二枚のドーナツ型電極の間に印加する静電場によってビームの加速・集束を同時に行う加速レンズを利用して、大きさが 1 メートル立方程度に収まる装置で 100keV 級のイオンマイクロビームを形成できる小型イオンマイクロビーム装置の研究開発を行っていた。この加速レンズ方式は、従来の大型加速器と電磁石を組み合わせる方式に比べて、原理的にレンズ系の全長を短くすることが可能である。しかし、この装置を量子ビット配列や光学素子製作に適用するためにはビーム径をより小さくする必要があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、小型イオンマイクロビーム装置を量子ビット配列や光学素子の三次元構造製作に適用することを目指して、レンズ系の縮小率向上やイオン源の改良によってビーム径を縮小し、どこまでビームを細く絞れるのかを明らかにすることである。

3. 研究の方法

まず、1 マイクロメートル程度の精度で三次元構造の光学素子を製作するために、小型イオンマイクロビーム装置に超高電場加速レンズを導入して、当時達成していた 1.8 マイクロメートルのビーム径を一桁小さくして空間分解能を向上させることを図った。次に、量子ビット配列を行う場合はイオンを一個ずつ注入することから大きなビーム電流を必要としないため、レーザー冷却イオン源により引き出し時のビーム径や発散角を小さくすることによるナノビーム化を図った。

4. 研究成果

はじめに、図 1 に概略図を示す小型イオンマイクロビーム装置において、超高電場加速レンズを導入することにより、どこまでビーム径を縮小できるのかを、イオン光学シミュレーションによって追求した。まず、従来の加速レンズを用いて 300keV ビームを発生させた場合について、3 段ある加速レンズに印加する電圧値を最適化した時の最小ビーム径は 130nm であった。次に、第 3 段目の加速レンズを超高電場加速レンズに置き換えた。ここで、超高電場加速レンズに印加可能な最大電場を本研究での開発見込み値である 20kV/mm とし、その電極間距離も変数とした。この条件の下で同じく 300keV ビームを発生させた場合について、印加電圧および電極間距離の最適化を行ったところ、電極間距離 15mm の時に最小ビーム径 18nm を得ることができた。この結

果により、実際の実験体系で生じる様々な収差を限りなく小さくすることで、量子ピットの間隔である 10~20nm と同レベルの空間分解能に到達できることがわかった。

次に、必要性が明らかとなった色収差の低減を目的として、超高電場加速レンズを導入した小型イオンマイクロビーム装置に入射するビームを発生させる新たなイオン源を模索した。色収差は入射ビームが持つエネルギー幅に比例することから、エネルギー幅が従来のデュオプラズマトロンイオン源で到達できる数 eV よりも小さいイオン源を検討した。その内の一つとして、Penning Ionization Gauge-Type (PIG) イオン源の開発を行った結果、エネルギー幅 5eV を達成したものの、従来とほぼ同等であった。そこで、更なる小さなエネルギー幅を求めて、その値が数 mV 程度となることが期待されているレーザー冷却単一イオン源を候補として決定した。

また、本装置を微細加工に応用する場合には、比較的大きな電流値のイオンビームが必要となることから、従来用いてきたデュオプラズマトロン型イオン源の検討も継続した。これまでデュオプラズマトロン型水素イオン源から発生するイオンビームの集束を行ってきたが、高精度の微細加工を行うためには、ビーム内の水素イオン種を厳密に分別して利用する必要がある。そこで、イオン源のパラメータと水素イオン種の構成を計測した結果、ビーム内には 2 原子水素イオンと 3 原子水素イオンが主に含まれ、イオン源内の水素ガス圧を最適化することによって利用したいイオン種の構成比を高められることがわかった。また、高アスペクト比加工が可能な 1 原子水素イオンの発生も確認できた。

続いて、10nm レベル精度での量子ピット配列に対して十分に小さい収差となることが期待されるレーザー冷却単一イオン源であるが、このイオン源から発生するイオンを入射するレンズ系の解析を行った結果、従来の加速レンズ系を新しいイオン源に適用することはできないことが判明したことから、新たなレンズ系の検討が必要となった。NV センターと呼ばれる量子ピットを格子状に作製するためには、このイオン源から発生したたった 1 個の N イオンを正確に数ナノメートル精度で材料に打ち込む必要がある。これを可能にするレンズ系を追究した結果、縮小率 0.006 の 2 段加速レンズを用いて 4.5nm の精度で照射できるレンズ系を設計することに成功した。

最後に、本研究のテーマである「どこまでビームを細く絞れるのか」という問いに対する結論として、ビーム径 4.5nm に到達できる見通しを得られた。

なお、本研究は研究協力者である QST 石井の多大な貢献により遂行されたものであり、深く感謝の意を表する。

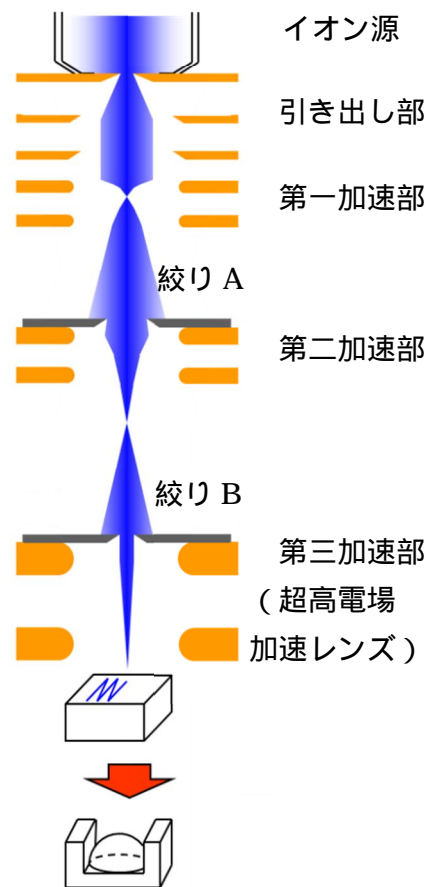


図 1：小型イオンマイクロビーム装置の概略図

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 Ishii Y., Ohkubo T., Kashiwagi H., Miyake Y.	4. 巻 91
2. 論文標題 Preliminary study: Measurement of ion beam energy spreads produced by a Penning ionization gauge-type ion source using electromagnets for a mega-electron volt compact ion microbeam system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 43304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5132301	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 Ishii Y., Ohkubo T., Miyawaki N., Yuri Y., Onoda S., Narumi K., Saitoh Y.	4. 巻 541
2. 論文標題 Design of an apertureless two-stage acceleration lens for a single-ion implantation system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 200 ~ 204
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nimb.2023.05.021	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yasuyuki Ishii and Takeru Ohkubo
2. 発表標題 Analysis of Ion Beam Generated by a Duoplasmatron-type Ion Source for a Compact 100 keV Ion Microbeam System
3. 学会等名 IBA/PIXE & SIMS（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井 保行、大久保 猛
2. 発表標題 小型イオンマイクロビーム装置用のデュオプラズマトロン型イオン源のイオン種分析
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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
---------	---------