

令和元年6月14日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06678

研究課題名(和文) 小型マイクロビーム装置における負イオン源に関する研究

研究課題名(英文) Study on a negative ion source in a compact 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 放射線高度利用施設部・主幹研究員(定常)

研究者番号：40446456

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：水素イオンマイクロビームは直接描画技術PBW(Proton Beam Writing)による三次元微細加工への応用が切望されており、この技術の普及を目的として、ビームの加速・集束を同時に行う加速レンズを用いた小型イオンマイクロビーム装置の開発を行っている。

本研究では、正水素イオンよりもビーム径を小さくできる負水素イオンのビーム発生を行った。その結果、PBWによる微細加工に要求される10pAの電流値の確保、マイクロビーム化及びその利用を実現できる見通しを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加速レンズ方式で『ガスイオンによる高エネルギーのマイクロビームをコンパクトな装置で形成する』というコンセプトは独自のものである。

本研究によって、PBWに利用できるイオンマイクロビームの実現見通しが得られたことで、3次元微細加工の精度が格段に向上することになり、スケールアップしたMeV級小型マイクロビーム装置の実現へ大きく前進する。このスペックのイオンビームは特に光通信デバイスとして切望されている数マイクロメートルから数10マイクロメートル領域の立体構造体の研究開発にとって極めて有用なツールとなると考えられる。

研究成果の概要(英文)：A hydrogen ion microbeam is desired to be applied to three-dimensional micro processing by direct drawing technology PBW (Proton Beam Writing). For the purpose of popularizing this technology, a compact ion microbeam system has been developed using an accelerating lens that simultaneously accelerates and focuses the beam.

In this study, beam generation of negative hydrogen ions that can make the beam diameter smaller than that of positive hydrogen ions was performed. As a result, prospects to realize microbeam formation with a beam current value of 10 pA required for PBW was obtained.

研究分野：イオンビーム工学

キーワード：イオンビーム マイクロビーム プロトンビーム PBW 小型化

1. 研究開始当初の背景

近年、通信機能の発展と情報量の大幅な増大によって数 μm から数 $10\mu\text{m}$ 領域の微細な構造を持つ光通信デバイスが3次元化が注目を集めている。現在は材料にマスクを被せて光リソグラフィによって加工しているため、基本的には2次元構造しか製作できていない。最近3Dプリンタが登場したが、まだ微細度は不十分であり、点を積層していく原理上多くの時間を要するため、デバイス生産への応用は現実的ではない。そこで、イオンビームが新たなツールとして期待されている。MeV級かつ軽イオンのビームは直進性が大きく飛程も長いので直接描画による3次元加工に有用である。

最近では $1\mu\text{m}$ 程度のビーム径を持つイオンビーム、いわゆるマイクロビームが、静電加速器やサイクロトロンで加速されたガスイオンのビームを集束して形成され、微細な加工・分析等に利用されている。しかし、このようにイオンを加速した後に集束する従来方式では、縮小率をなるべく大きく(数10倍)するためにレンズ系の物点距離を可能な限り長く(数m以上)とる必要があり、小型化は困難である。また、3次元加工では加工試料中の加工深度をビームのエネルギーによって制御する必要がある。しかし、従来方式ではビームのエネルギーを変えるとビーム集束が崩れてしまうため、その都度ビームの調整に膨大な時間を要し、深さ方向に形状を変えた加工への応用は現実的ではない。一方、イオンビームを形成する市販のFIB(Focused Ion Beam)や走査型ヘリウムイオン顕微鏡は、集束レンズの縮小率が10倍程度であり、イオン源内のイオンの発生点を物点(数10nm径)として、数10keVで数nm径のビームを形成している。このビームは低エネルギーであるため主に表面加工・分析に用いられている。また、電子ビーム描画装置は現在半導体の露光時に使用するマスクの2次元微細加工に用いられているが、電子はイオンに比べて直進性が小さいため長深度の加工では、多段のプロセスが必要である。

そこで研究代表者は、新たなイオンビーム集束技術である加速レンズ方式の開発を行っている。電位差のある2つの電極間を通るイオンビームは静電場によって加速されながら同時に集束効果を受ける。この静電レンズ系を加速レンズと呼ぶ。低エネルギーのイオンビームを高エネルギーへ加速しながら集束すれば、従来方式に比べて大きな縮小率を小さなレンズ系で得ることが可能である。3次元微細加工用途に向けたMeV級イオンマイクロビームを形成する小型装置の実証機として、図1に示す300keV小型マイクロビーム装置(レンズ系全長650mm)を開発した。この装置における設計上のビーム径はサブミクロン径であるが、実験で得られていたビーム径は数 μm 程度に留まった。ビーム径が設計値より大きい主な原因はビーム集束を妨げる色収差であると考察された。

ここで、色収差を低減する方法として、負イオンの使用に着目した。一般的にプラズマイオン源において、電子を剥がす正イオンに比べて電子を付着する負イオンの方が低温度(=小エネルギー幅)で生成できるが、負イオンは発生割合が小さいため引き出せるビーム電流も小さい。マイクロビーム形成においては、ビーム集束を妨げる色収差はエネルギー幅に比例するため、ビーム電流量よりもエネルギー幅の小ささと輝度の大きさが重要である。

現在の実証機で用いているデュオプラズマトロン正水素イオン源が持つエネルギー幅は最小で2eV程度であるのに対して、エネルギー幅が一桁程度小さい数100meVのデュオプラズマトロン負水素イオン源を開発することで、色収差が一桁程度小さくなりビーム径も一桁程度小さい数100nmに縮小化することが見込める。

2. 研究の目的

本研究では、色収差を低減するために正イオンビームよりもエネルギー幅が一桁程度小さいデュオプラズマトロン負水素イオン源を開発し、正イオンの実証機を改造して負イオンを加速・集束する実験体系を構築する。これにより、負水素イオンのマイクロビームを形成して、その径を縮小化する。

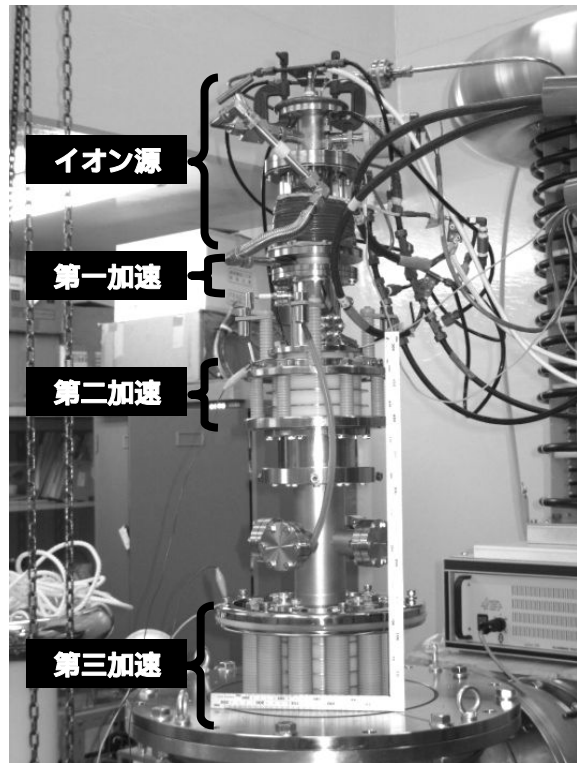


図1：300 keV 小型マイクロビーム装置

以上を実施することにより、『ガスイオンによる高エネルギーのマイクロビームをコンパクトな装置で形成する』というコンセプトを実現するための足掛かりとする。

3. 研究の方法

デュオプラズマトロン水素イオン源において、負イオンは他の粒子と衝突すると中性化しやすいため、比較的高密度のプラズマ中心軸付近から少し離れた低密度の空間により多く存在すると考えられた。そこで、300keV 小型マイクロビーム装置に搭載するデュオプラズマトロン負水素イオン源は、それまでに使用していた正水素イオン源の機能に加えて、ビーム引き出し軸とプラズマ中心軸を偏心できるようにした。具体的には、中間電極をほんのわずかに傾けて設置することによりプラズマの生成場所を少し横にシフトさせることで、上記2つの軸の偏心度合いを調整可能とした。

一方、負イオンを加速集束するために、小型マイクロビーム装置の実験体系の極性切替を行った。ここで用いる負イオン加速用の高電圧電源を本科研費により購入した。負イオン加速用の高電圧をレンズ系に印加して、耐電圧を試験した結果、十分安定な耐性を有することを確認した。

以上2つの準備の後、負イオンビーム加速実験を行った。レンズ系の末端に到達するビーム電流の値を計測することで、イオン源内に存在する負イオンの分布を計測した。

4. 研究成果

負イオンビーム加速実験を行い、ビーム引き出し軸とプラズマ中心軸を偏心させた時のビーム電流を計測した。その結果を図2に示す。横軸は偏心距離、縦軸がビーム電流である。全く偏心しない時に比べて、偏心距離が1.8mmの時のビーム電流は6倍程度増加した。これは事前の予想どおり、プラズマ中心軸から少し離れた場所に負イオンが多く存在することを示す結果であった。一方、偏心距離をさらに大きく3.6mmとした時はビーム電流が減少したが、この原因は、プラズマ中心軸から遠く離れるとプラズマの密度が小さくなり負イオンに限らずイオン・電子の量が少ないことが考えられた。

今後、偏心距離やイオン源のガス圧やアーク電流等のパラメータを最適化することで、十分にPBWに要求される10pA以上のビーム電流を得ることが可能である。また、本実験は放電等による機器類の故障を避けるために第三加速の電圧を本来の値よりも下げて行ったが、この電圧を設計値どおりに戻すことによってビーム集束が可能である。

以上により、本装置による負水素イオンのマイクロビーム化及びその利用を実現できる見通しを得た。

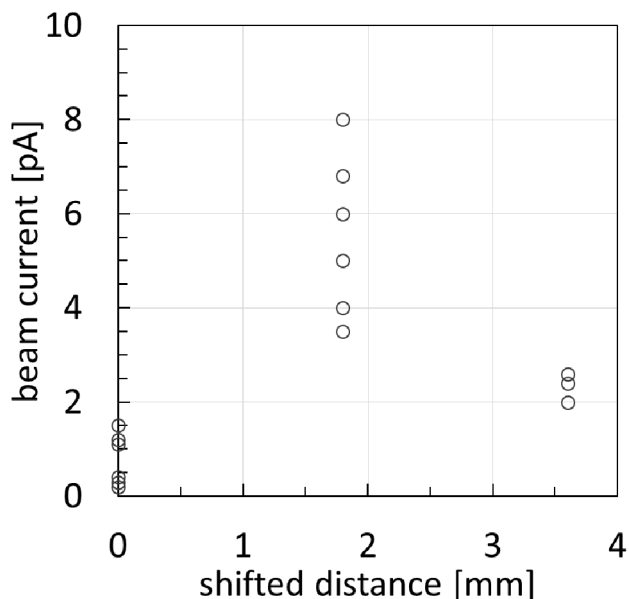


図2：負イオン源偏心量とビーム電流

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1. Takeru Ohkubo, Yasuyuki Ishii, "Beam Diameter Reduction by Optimization of an Extraction Condition in a Compact Ion Microbeam System" *Physics Procedia*, **90**, 79-84 (2017). DOI: 10.1016/j.phpro.2017.09.022 (査読有)

〔学会発表〕(計4件)

1. 大久保 猛, 石井 保行, 「小型イオンマイクロビーム装置における負イオン発生技術の現状報告」日本原子力学会 2018 年秋の大会, 2018 年 9 月 5 日~7 日, 岡山大学(岡山県・岡山市)

2. T. Ohkubo and Y. Ishii, "Preliminary formation of a negative ion microbeam in a compact ion microbeam system" 25th Conference on Application of Accelerators in Research and Industry (CAARI2018) (国際学会), 2018年8月12日~17日、Grapevine, Texas, USA
3. T. Ohkubo and Y. Ishii, "Beam diameter reduction by optimization of an extraction condition in a compact ion microbeam system" 24th Conference on Application of Accelerators in Research and Industry (CAARI2016) (国際学会), 2016年10月30日~11月4日、Fort Worth, Texas, USA
4. 大久保 猛, 石井 保行, 「小型イオンマイクロビーム装置の引出条件の改良によるビーム径縮小」日本原子力学会 2016年秋の大会, 2016年9月7日~9日, 久留米シティプラザ (福岡県・久留米市)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。