

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 7 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760709

研究課題名（和文） 加速レンズ系による負の収差の制御技術に関する研究

研究課題名（英文） Study on Negative Aberration Control in Acceleration Lens System

研究代表者

大久保 猛 (OHKUBO TAKERU)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・放射線高度利用施設部・研究員

研究者番号：40446456

研究成果の概要（和文）：ナノテク分野での微細加工ツールとして切望されているガスイオンナノビームの普及に不可欠な装置の小型化を実現すべく、加速レンズ系内に減速レンズを挿入することによってビーム径の縮小化に有効である収差を制御する技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：The aberration control technology which is effective in reduction of a beam diameter was developed by adding a deceleration lens to an acceleration lens system. The compact lens system to form gaseous ion nanobeam will be a great tool for applications in nanofabrication.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	500,000	150,000	650,000
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、原子力学

キーワード：放射線工学・ビーム科学

1. 研究開始当初の背景

近年、 $1\mu\text{m}$ 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。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、レンズ系の物点距離を可能な限り長くとはしているが、縮小率は高々数 10 倍である。一方、一般に表面加工等に用いられている FIB(Focused Ion Beam)は小型ナノビーム形成装置であるが、物点の極小化が容易な液体金属イオン源（主にガリウム）を用いるため、

加工材料中に有害なガリウムが残留することが不可避であり、無害かつ多種多様なガスイオンのナノビームが期待されている。現在開発中の新たなイオンビーム集束技術である加速レンズ方式では、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ることによって従来のレンズ系に比べて大きな縮小率を短い距離で得ることが可能である。これまでに、物点 $200\mu\text{m}$ 径に対して 300mm 長の加速レンズ系で 46keV 水素分子イオンのナノビームが形成され、ビーム径 160nm 、ビーム電流 100pA 、縮小率 1250 倍が達成されている。

2. 研究の目的

ガスイオンナノビームはナノテクへの応用が切望されているが普及には装置の小型化が不可欠である。研究の全体構想は、ビームの加速・集束を同時に行う加速レンズ系で大きな縮小率を達成し、その後段に配置する加速管との一体型加速集束レンズ系とすることによりビーム径 10nm の MeV 級小型装置を開発することであるが、この場合、加速管で生じる収差がビーム径の縮小を妨げる。そこで本研究では、後段の加速管で生じる収差を打ち消すことを目的とし、前段の加速レンズ系内に減速レンズを導入することによって負の収差を制御する技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) 後段の加速管で生じる収差を前段の加速レンズ系で負の収差を制御することによって打ち消すことができる条件をイオン光学シミュレーションによって追究した。効率的に条件追究を進めるべく計算時間の短縮のため、計算コードを本研究で開発している加速レンズ系に最適化した。

(2) イオン光学シミュレーションによって得られた収差の制御によるビーム径の縮小化を実験によって実証するべく、新たな加速レンズ実験体系の構築を行った。収差制御を行う第二加速レンズには減速電圧印加用に新たな電極を配置した。この実験体系を使用してビーム集束実験を行った。

4. 研究成果

(1) 加速レンズ系は円柱対称系であること、イオンが中心軸の近傍を進行すること、磁場が存在しないこと、以上の3点を考慮することによって、計算コードの簡略化と計算時間の短縮化に成功した。その計算コードを用いて負の収差による全体系の収差の打ち消し条件を追究した結果、加速レンズ系出口で形成される 46keV 水素分子イオンビームに対して新たに付加する減速電圧が 15kV の時に、負の収差によって加速レンズ系の収差が最大 26%低減し（図1参照）、ビーム径を最大 17%縮小できることがわかった（図2、図3参照）。以上の成果により、加速レンズ系と加速管との一体型装置において、減速電圧による負の収差を制御することによって収差が打ち消され、ビーム径をより小さく集束できる見通しが得られた。

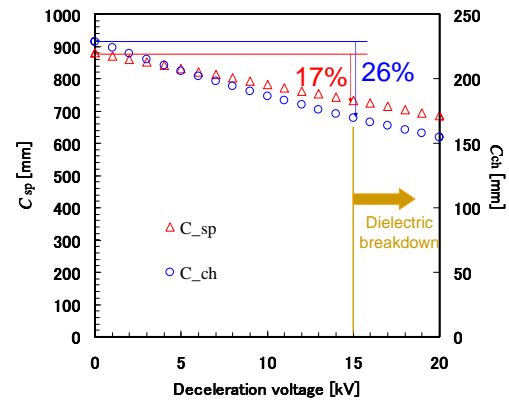


図1：減速電圧と収差係数

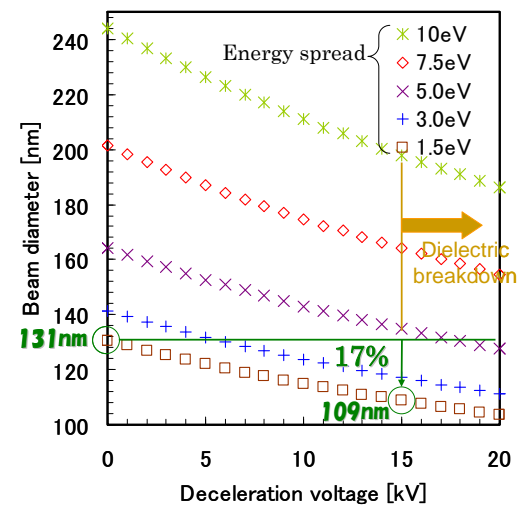


図2：減速電圧とビーム径

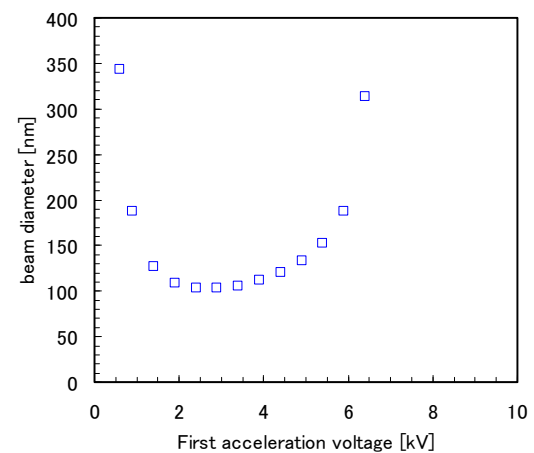


図3：電極に付加する電圧値最適化の一例

(2) 図4及び図5に新たに構築した加速管一体型加速レンズ系を示す。後段に配置する加速管に印加する電圧として300kVを想定しているが、加速レンズ系に高電圧を印加すると電圧勾配が非常に大きいため放電が頻繁に発生することがわかった。レンズ系全体に対して150kV以上印加すると、加速レンズ装置と周辺との絶縁破壊やコロナ放電、周辺物品のチャージアップや高圧電場による計測機器へのノイズ混入など、ビーム形成及びその計測における不安定性が複数生じることがわかった。そこで、例えば装置周辺のチャージアップに起因するノイズ電場から電流測定用端子をシールドする等、不安定性の原因を一つ一つ特定して解消したことによって、200kVでのビーム電流計測が可能になり、ビーム電流10pA程度、ビーム径20 μ m程度への集束に成功した。研究実施計画では、収差制御の有効範囲であるビーム径サブミクロンまでの集束を行うことになっていたが、そのためには今後さらに加速レンズ系内のコンディショニング(クリーニング)を継続しながらビーム形成及びビーム径計測の安定性を高める必要があることがわかった。しかしながら、現段階において減速レンズ部には最大で40kV程度を安定に負印加できることを確認しており、イオン光学シミュレーションによって得られた収差制御によるビーム径縮小化の最適条件である減速電圧15kVを負印加することは十分に可能であると結論付けられる。

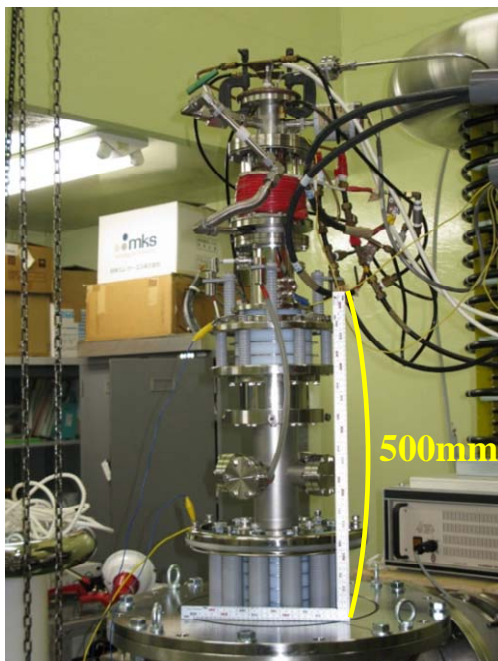


図4：加速管一体型加速レンズ系の外観

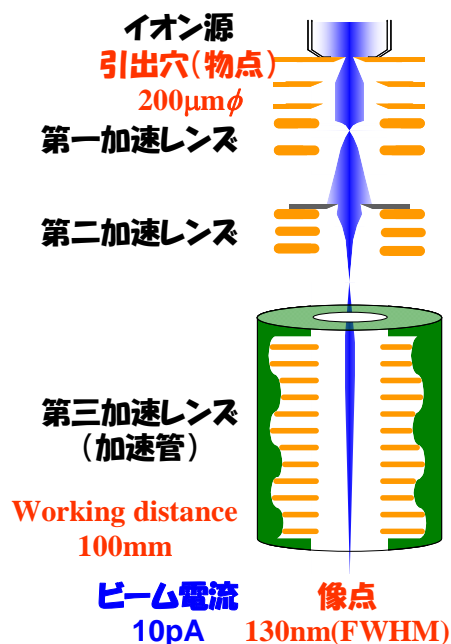


図5：加速管一体型加速レンズ系の概略図

以上、3年間の研究目標であった減速レンズによる収差制御技術をほぼ確立した。今後サブミクロン径ビームを形成した後、更なる縮小化のために収差制御技術を適用する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

① T. Ohkubo, Y. Ishii and T. Kamiya, Theoretical Approach Of The Reduction Of Chromatic And Spherical Aberrations In An Acceleration Lens System For Hundreds Of keV Gaseous Ion Nanobeam, AIP Conference Proceedings、査読有、vol.1336、2011、pp.176-180、DOI: 10.1063/1.3586083

〔学会発表〕(計4件)

① 大久保猛、ガスイオンナノビーム形成装置小型化のための加速管一体型レンズ系開発、日本原子力学会2009年秋の大会、2009/09/17、東北大学

② 大久保猛、300kV 小型ガスイオンナノビー

ム形成装置のレンズ系開発、日本物理学会第
65 回年次大会、2010/03/21、岡山大学

③Takeru Ohkubo、Theoretical Approach of
the Reduction of Chromatic and Spherical
Aberrations in an Acceleration Lens System
for Gas-FIB to Form Gaseous Nanobeam、21st
International Conference on the
Application of Accelerators in Research
and Industry (CAARI2010)、2010/8/10、Fort
Worth, Texas, USA

④大久保猛、ガスイオンナノビーム形成のため
の 300kV 小型装置の構築、日本原子力学会
2011 年秋の大会、2011/9/21、福岡県北九州
市

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大久保 猛 (OHKUBO TAKERU)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・放
射線高度利用施設部・研究員

研究者番号：40446456

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし