

機関番号：82110

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560779

研究課題名 (和文) 仮想物点による高縮小率レンズ系の構築に関する研究

研究課題名 (英文) Development of high demagnification lens system by forming a virtual object

研究代表者

石井 保行 (ISHII YASUYUKI)

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・研究副主幹

研究者番号：00343905

研究成果の概要 (和文) : 数 10keV ガスイオンナノビームを形成するため、原子力機構で開発してきたビーム形成装置を用いて加速レンズ系の高縮小率化に関する研究を行った。このため、(1)専用のプラズマ型ガスイオン源内に小さな仮想物点をもつ数 100eV の低エネルギービームを形成し、(2)そのビームを二段加速レンズ系に入射する方法を考案した。形成装置では、イオン源内に直接ビーム引き出し電極系、即ち微小発散角を持つビームを発生する電極系を開発し、導入した。これにより、ビーム軌道計算に用いた値通りの微小発散角のビームを発生し、47keV 水素イオンビームで最小径 120nm、ビーム電流 36pA のビーム形成を実現した。この結果、直接引き出し電極系をもつプラズマ型イオン源と二段加速レンズ系の組み合わせにより、本課題で目的とした縮小率 1700 を超えるレンズ系を構築した。

研究成果の概要 (英文) : Enhancement of the demagnification at an acceleration lens system was studied to generate several tens keV gaseous ion nanobeam using the nano-beam formation apparatus in JAEA. The concept of the enhancement of the demagnification was as follows; (1) Several hundred eV gaseous ion beam (low energy gaseous beam) with a small imaginary object was generated by a dedicated plasma-type ion source. (2) Its low energy gaseous ion beam was injected into the two-stage acceleration lens system. A direct beam extraction electrode system was installed in the ion source to generate ion beams with the small divergence angle. A minimum hydrogen beam size of 120 nm in diameter with 36 pA at 47 keV was successfully formed by the experiment as the beam trajectory simulation. The focusing lens system with the demagnification over 1700 was composed of combining the plasma-type ion source with the direct extraction electrode and the two-stage acceleration lens system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：イオンビーム工学

科研費の分科・細目：原子力学

キーワード：放射線工学、ビーム科学、集束ガスイオンビーム、加速レンズ、高縮小率

1. 研究開始当初の背景

keV 領域のイオンナノビームは国内外を問わず液体金属イオン源を用いた集束イオンビーム装置 (FIB) により Ga+ナノビームが形成されている。FIB では、液体金属イオン源で点光源 (100nm 径以下) のイオンビームを発生できるため、低縮小率 (数 10) の磁気又は静電レンズにより 6nm 径以下のビームが形成されている。一方、ガスイオンでナノビームをプラズマ型イオン源により発生する場合、引き出し電流の問題から数 100 μm 径が下限となり、ナノビーム形成のためには 1000 以上の縮小率レンズ系を必要とする。しかし、磁気又は静電レンズ系の縮小率は数 10 程度であるため、現状の技術ではナノビームを実現できない。更に、現在の MeV 領域のイオンマイクロビーム形成装置は、大型のイオン加速器及び精密スリットと磁気レンズを配置した長尺のビームラインで構成されており、小型化は実現していない。

本研究の基礎技術として申請者らは既に二段加速レンズ系により高縮小率 1000 を世界に先駆けて達成し、エネルギー 46keV の H_2^+ ビームにより径 170nm (電流 100pA) の形成に成功した。

そこで、本加速レンズ系は加速・集束同時方式ながら高縮小率が得られるので、加速管との連結により高エネルギー化を実現すれば「超小型 MeV 領域集束ガスイオンナノビーム形成装置」が開発できるのではないかと着想した。しかし、加速管の性質から縮小率を得ようとするこの管の中にビームは結像され、加速管外へ結像させようとする、縮小率は 1 以下となる。この縮小率の低下分を補うために二段加速レンズ系の縮小率を増強し、加速管へ入射するビームの径の縮小化の研究が必要となった。これには二段加速レンズ系へ入射するイオンビームの仮想物点を遠方にずらす方法を着想した。仮想物点を調整するために平行ビーム形成可能なイオン光学系を構築の研究が必要となった。

2. 研究の目的

本研究の全体構想は、単孔レンズ効果を有する加速・集束同時方式の加速レンズにより高縮小率 2000 以上を有し、keV~MeV エネルギー領域まで適応可能な超小型ガスイオンナノビーム形成装置を世界に先駆けて開発することである。本研究に於いては二段加速レンズ系の高縮小率化を行い、この縮小率を保持したままで高エネルギー化が可能なイオン光学的な解を求める。更に、超高縮小

率化した二段加速レンズ系を構築し、その有効性を 100keV、 H_2^+ を用いてナノビーム形成をすることにより実証する。

3. 研究の方法

本研究ではプラズマ型のガスイオン源から発生する水素イオンビームを用いて、数 10keV で、100nm 径レベルのビームを形成するため、高縮小率のレンズ系、即ち、二段加速レンズ系の高縮小率化が必要であった。これに対して本研究ではレンズ系を高縮小率化するため、イオン源内に形成される物点を仮想的に小さくすることで達成することが試みられた。初年度の研究では初めに仮想物点を形成するための引き出しレンズ系、及びレンズ系全体の研究を行った。この研究の中では、初めに計算コードの整備を行い、これを用いて引き出しレンズ系の設計を行うとともに、この引き出しレンズ系が有効となる様に二段加速レンズ系の配置の設計も行った。次にこの結果を基に引き出しレンズ系の設計及び製作を行い、イオン源に導入した。二年目に、この引き出し電極系を用いて小径で、且つ発散角の小さなビーム、即ち平行ビーム発生の実験を行うとともに、この実験結果を基に引き出し電極系の改良を行った。この後、平行化したビームを二段加速レンズ系に入射させ、ナノビーム形成の実験を行った。この実験結果を基に更なるレンズ系の最適化、及び詳細なレンズ系のパラメーターの最適化を行い、目標のナノビームの形成を行った。

4. 研究成果

二段加速レンズ系を高縮小化するため、イオン源内に形成される物点を仮想的に小さな径とする方法を考案した。これを実現するため、引き出し電極系に直接引き出し法を行える電極系を開発し、これをイオン源の引き出し電極系に導入した。この電極系で発生した仮想径を持つビームを二段加速レンズ系に入射し、ビーム形成を行った結果、47keV 水素イオンビームにより 120nm 径、ビーム電流 36pA を形成することができた。これにより直接引き出し電極系と二段加速レンズ系の組み合わせにより、高縮小率レンズ系が構築できることが分かった。

また、本研究の範囲ではビームエネルギーを 47keV としたが、二段レンズ系では電圧により縮小率をスケールリングすることができるため、ビームエネルギーを 100keV 程度に増強すれば、ビーム径は 100nm 以下となり、当所の目標である縮小率 2000 のレンズ系により、ビーム径 100nm を達成できる見込みが得られた。

これにより世界で初めて二段加速レンズ

系を用い、且つこれを高縮小化することにより、ガスイオンナノビームを形成することができた。

本研究では水素イオンナノビームの形成を主眼としたが、本集束レンズはガスイオンビームであれば原子量、イオン価数に関係なく同一点に集束することができる。このため、微細加工用途でガスイオンナノビームを使用する場合、Ar や Xe の様な原子量が大きく、スパッタリング効果が大きなガスイオンの使用が考えられる。これらのイオンを使用することで試料中へのイオンビーム物質の残留が極めて少ない加工や分析が可能となる。

また、微細化において長深度の加工を行う場合、ビームエネルギーの増強を必要とする。これには、二段加速レンズ系の後段に第3加速レンズとして加速管を設置することでビームのエネルギーを増強することができる。二段加速レンズ系で得られたデータを基に、これを可能とするレンズ系の設計を行った。この結果、最大電圧 300kV で、140mm の加速管を設計し、これと二段加速レンズ系との組み合わせで、レンズの長さが 700mm 程度と小型ながら、最大 300keV で、ビーム径が 100nm のレンズ系を設計することができた。このレンズ系の構成は加速管を 330mm 程度にすれば 1MeV のガスイオンナノビームの形成が可能である。この結果から本研究の最終目的の小型のガスイオンナノビーム形成装置の開発に対する可能性を示すことができた。

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 6 件)

(1) Y. Ishii, T. Ohkubo, T. Kamiya, Design of a Compact Focusing Lens System with Short Acceleration Tube at 300 kV, Nuclear instrument and method in physics research Section B, 査読有り、Accepted.

(2) T. Ohkubo, Y. Ishii, T. Kojima and T. Kamiya, Theoretical Approach of the Reduction of the Chromatic and Spherical Aberrations in an Acceleration Lens System for gas-FIB to Form Gaseous Nanobeam, AIP Conf. Proc. Vol. 1336, 査読有り, 2011, 6 月, P. 176-180.

(3) 石井保行, 大久保猛, 神谷富裕, 300kV 領域小型集束ガスイオンナノビーム形成装置の開発、Proceedings of the Twelfth Symposium on Accelerator and Related Technology, 査読無し、2010、6 月、P. 65-68

(4) 石井保行, 小型高エネルギー集束イオンビーム形成装置開発に向けた取り組み、放射線、査読無し、Vol. 35、2009、12 月、P. 87-96

(5) 石井保行, 磯矢 彰, 大久保猛, 小嶋拓治, 二段加速レンズ系を用いたガスイオンナノビームの形成、放射線と産業、査読無し、Vol. 122、2009、6 月、P. 4-8

(6) 石井保行, 極微細加工用小型高エネルギー集束プロトンビーム描画システムの開発、放射線化学、査読無し、Vol. 89、2010、3 月、P. 38-41

[学会発表] (計 9 件)

(1) 石井保行, 大久保猛, 神谷富裕, 300kV 領域小型集束ガスイオンナノビーム形成装置の開発, Twelfth Symposium on Accelerator and Related Technology, 2010/6/18, 東京工業大学 (東京)

(2) 石井保行, 数 100keV 小型集束プロトンビーム形成装置のための高縮小率レンズ系の開発、日本応用物理学会、2009/9/8、富山大 (富山県)

(3) 大久保猛, ガスイオンナノビーム形成のための加速レンズ系収差制御、日本物理学会第 64 回年次大会、2009/3/27、立教大学 (東京)

(4) 石井保行, 大久保猛, 佐藤隆博, 神谷富裕, 小嶋拓治, 西川宏之, 微細加工用小型高エネルギー集束プロトンビーム描画システムの開発、第 3 回高崎量子応用研究所シンポジウム、2008/10/10、群馬県 (高崎市)

(5) 石井保行, 微細加工用小型高エネルギー集束プロトンビーム描画システムの開発、第 4 回高崎量子応用研究所シンポジウム、2008/10/10、高崎シティーギャラリー (群馬県、高崎市)

(6) 石井保行, 大久保猛, 小型高エネルギー集束イオンビーム形成装置開発に向けた取り組み, 2008 年秋季第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008/9/4

(7) 石井保行, 小型高エネルギー集束イオンビーム形成装置開発に向けた取り組み, 2008 年秋季第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008/9/4, 中部大 (愛知県、春日井市)

(8) T. Ohkubo, T. Ishii, 11th International Conference on Nuclear

Microprobe Technology and Applications, Reduction of Aberration Coefficients in an Accelerator Lens System to Form the Gaseous Ion Nanobeam, 11th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications, 2008/7/21, Hungary, Debrecen 市.

(9) Y. Ishii, A. Chiba, J. Haga, A. Yokoyama, K. Agematsu, T. Kamiya, K. Mizuhashi, Development of an Ion Beam Brightness Measurement System using Luminescence Analysis for Formation of MeV Ion Nanobeam, 11th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications, 2008/7/21, Hungary , Debrecen 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

石井 保行 (ISHII YASUYUKI)

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・研究副主幹

研究者番号：00343905

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

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・研究職

研究者番号：40446456