

令和 6 年 4 月 22 日現在

機関番号：56301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04219

研究課題名（和文）多品種少量パワー半導体製造向け多価イオンマイクロビーム装置の開発

研究課題名（英文）Development of multi-charged ion microbeam system for high-mix low-volume production of power semiconductors

研究代表者

浅地 豊久（Asaji, Toyohisa）

新居浜工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：70574565

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）：イオン源は、マイクロ波を2.45GHzに高周波化することによって、総ビーム電流を3.5倍に増やすことができた。ウィーンフィルタについては、2次元シミュレーションにより電場の均一化を図った。新たな蒸発源を製作し、蒸発温度の低いマグネシウムでイオンビームを生成することができた。アルミニウムの蒸発も確認した。最後に、アルミナ管を用いて直径100 μm 以下のビーム生成ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体イオン注入分野などへの応用を考え、デスクトップサイズのイオンマイクロビーム装置の開発を行った。イオンビームから必要なイオン種のみを取り出すために大幅な小型化が可能なウィーンフィルタを採用した。また、内壁の帯電によってビーム収束効果が期待できるアルミナなどの絶縁管に、ウィーンフィルタを通過したビームを通すことによって直径100 μm 以下のイオンマイクロビームを生成することができた。

研究成果の概要（英文）：Total beam currents of the multiply charged ion source have increased by a factor of 3.5 by increasing the microwave frequency to 2.45 GHz. Regarding the Wien filter, we attempted to homogenize the electric field using two-dimensional simulation. We have developed a new evaporation source and succeeded in generating a magnesium ion beam with a low evaporation temperature. Evaporation of aluminum was also confirmed. In the end, we have produced ion beams with a diameter of less than 100 μm using an alumina tube.

研究分野：イオンビーム工学

キーワード：ECRイオン源 イオンビーム ウィーンフィルタ マイクロビーム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ハイブリッド車や電気自動車の普及に伴って、パワー半導体の需要が急速に伸びている。スマートフォンなどに比べて多品種少量生産となる自動車産業では、車種に合わせた半導体の設計製造が必要になってきている。しかしながら、半導体製造業界は多品種少量に合わせた生産体制を取っておらず、自動車メーカーは独自に生産ラインの導入を検討している。その一例としてミニマルファブ推進機構が支援している小型半導体製造装置が挙げられる。このような設備開発でボトルネックになっているのは不純物をドーピングするイオン注入装置であり、大幅な小型化・低価格化・省電力化など多くの課題が残っている。イオン注入装置はこれまで主に電子1個を取り除いた1価のイオンを用いており、必要な加速エネルギーを与えるためには数十キロボルト以上の加速電圧が必要であった。そのため、電気的な絶縁碍子なども大きくなり、装置全体としての小型化は極めて難しいのが現状である。それに対して、電子を2個以上取り除いた多価イオンを用いることで加速電圧を大幅に引き下げることができ、装置全体をコンパクトにできる。しかしながら、イオン注入装置メーカーにとって多価イオン源の小型化は難題であり、未だ実用化には至っていない。本研究の代表者はプラズマ/イオンビーム装置開発を専門としており、企業での実務経験を活かして超小型多価イオンビーム装置を開発し、日本の自動車産業および半導体産業の競争力強化に貢献したいと考えている。

2. 研究の目的

本研究ではイオン源からビーム分離器まで一式を大幅に小型化した多価イオンビーム装置を開発し、パワー半導体向けにアルミニウムの高密度マイクロビームを生成することを目的とする。これらを実現するために4つの要素技術を開発する。

3. 研究の方法

多価イオンビーム支援プラズマ加工装置の開発からイオンビームの生成、さらには照射実験へと展開するために、本研究計画では以下の研究項目を実施した。

- (1) 多価イオン源の開発
- (2) ウィーンフィルタの電磁場解析
- (3) アルミニウム蒸発源の開発とイオンビームの生成
- (4) キャピラリーを用いたビーム収束

4. 研究成果

(1) 多価イオン源の開発

これまでの1.3 GHzのECRイオン源を2.45 GHzに高周波化し、イオンビーム電流の向上を図った。それに伴い、ミラー磁場も強化した。図1に示す軸上の磁場強度分布のとおり、ミラー磁場の強度を全体的に上げ、ECRゾーンもコンパクトにした。この結果、総イオンビーム電流は1.3 GHz時の80 μ Aと比較して、当初の目標であった4倍に近い280 μ Aを達成した。これは現行装置の制約で引出電圧4 kVのときであり、将来、引出電圧を10 kV程度まで上げることができれば1 mA程度まで向上すると予想でき、デスクトップサイズの小型イオン源でも一般的なイオン源に匹敵する性能を持つことが可能であると考えられる。

また、イオン源にマイクロ波を導入するアンテナについても改良を行った(図2)。当初、イオン源で一般的に使用されている軸方向からの導入を試みていた。しかしながら、プラズマを生成しにくく、実験中に消えることもあった。我々のイオン源はサイドポートを持つため、そこからの導入を試したところ安定したプラズマ生成が可能となった。

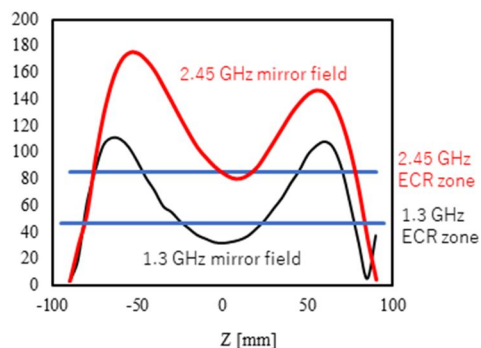


図1. イオン源中心軸上の磁場強度分布

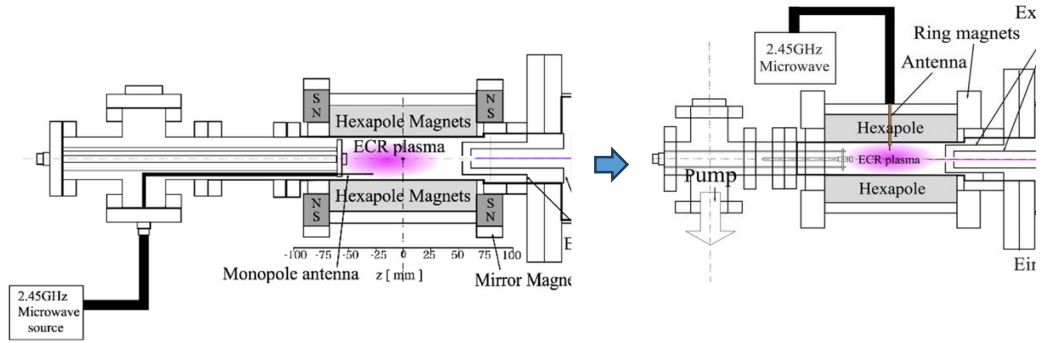


図 2. マイクロ波アンテナ導入位置の変更

(2) ウィーンフィルタの電磁場解析

ウィーンフィルタの概要を図 3 に示す。直交する電磁場を用いてイオンビームの質量分離を行うが、最初に電場の解析を行った（図 4）。平面電極がこれまで使用してきた電極形状で、改善案として湾曲させることで、電場均一化を図ることができると分かった。これを実験装置に採用（図 5）し、質量分離実験を行ったが、明確な効果を確認できなかった。この結果から、電場だけではなく磁場も考慮した設計が必要であり、さらに人がトライアンドエラーで設計を行っていくには限界があるため、引き続きイオンビーム軌道シミュレーションと AI を用いた電磁場設計を組み合わせ進めている。

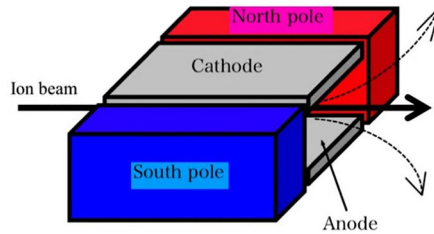


図 3. ウィーンフィルタ基本構造

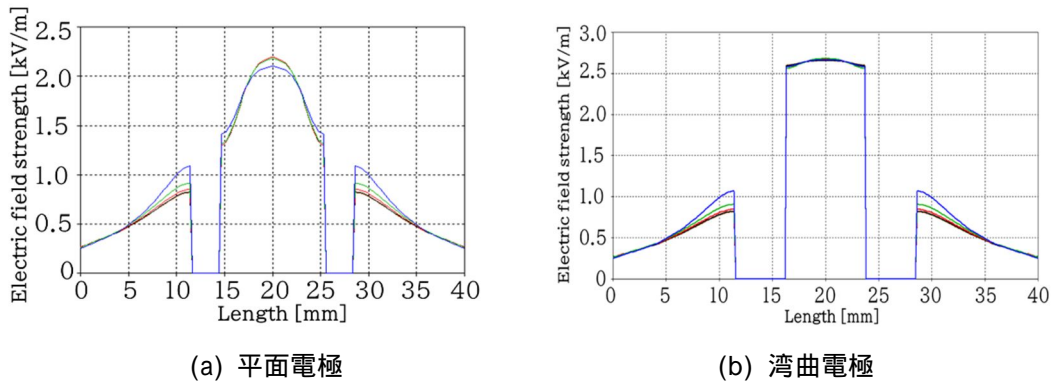


図 4. ウィーンフィルタ電場解析結果

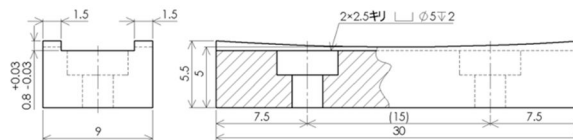


図 5. ウィーンフィルタ湾曲電極

(3) アルミニウム蒸発源の開発とイオンビームの生成

イオン源からルツボを突出させ、外部に設置した管状炉で加熱する蒸発源を開発した（図 6）。これを用いて蒸発温度の低いマグネシウムおよびアルミニウムのイオンビーム生成を行った。当初、ルツボは蒸発温度に上がっているが、十分加熱されていない部分で冷却され、ほとんどイオン源に到達できない状況が続いた。改良案として、ルツボ内面に熱伝導率の良いモリブデン板を挿入することで、蒸気の冷却による吸着を大幅に低減することが可能となった。図 7 にマグネシウムのイオンビームを生成した結果を示す。Mg³⁺については不純物と分離できないため明確な変化は見られなかったが、Mg⁺、Mg²⁺、Mg⁴⁺についてはるつぼの温度上昇とともにイオンビ

ーム電流の増加が見られた。

次に、アルミニウムの蒸発を試みた。マグネシウムの蒸発温度 700 程度に対して、アルミニウムは予備実験で 1050 程度は必要であることを確認した。それを参考に、本蒸発源でアルミニウムの蒸発を確認し、多価イオンビームの生成を試みている。

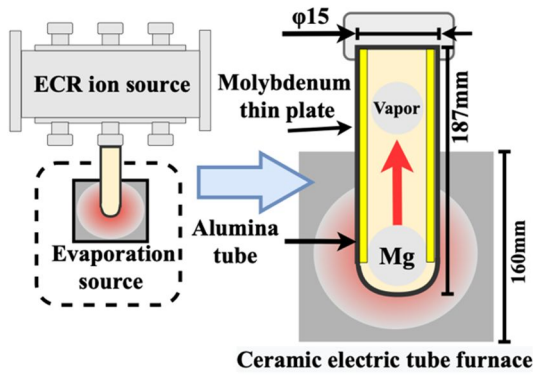


図 6. 外付型蒸発源の概要

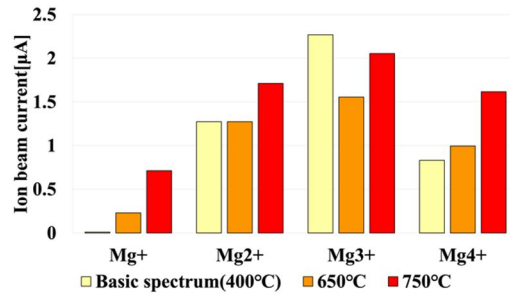


図 7. マグネシウムイオンビーム生成結果

(4) キャピラリーを用いたビーム収束

マイクロビームを生成するために、ウィーンフィルタの下流側にステンレス管またはアルミナ管を設置してどの程度の直径のイオンビームが生成されるか実験を行った。このときの細管の内径は 2 mm とした。ウィーンフィルタの上流側にも中央付近のみにビームを通すため、内径 2 mm のステンレス管を設置してある。図 9 に下流側にステンレス管またはアルミナ管を設置した場合の実験結果を示す。ワイヤープローブを上下方向に動かし、径方向の電流量分布を測定した。ステンレス管の場合、半値幅が約 1 mm のピークとなり、下流側の 2 mm のステンレス管で制限された直径がほぼそのまま通過していることが分かる。それに対して、アルミナ管の場合はイオンビームにより内壁が帯電するため、それによりビーム軌道が変わる。図 9(b)より、直径 0.1 mm 以下のビームが生成されていることが分かる。ただし、ワイヤープローブを上下させている直線導入機の位置決め分解能が 0.1 mm のため詳細な測定はできなかった。現在、分解能が 0.01 mm の導入機を入手し、詳細実験を始めている。

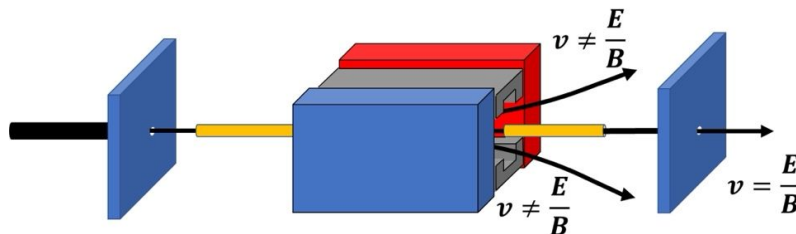


図 8. ウィーンフィルタ原理図と管の設置位置

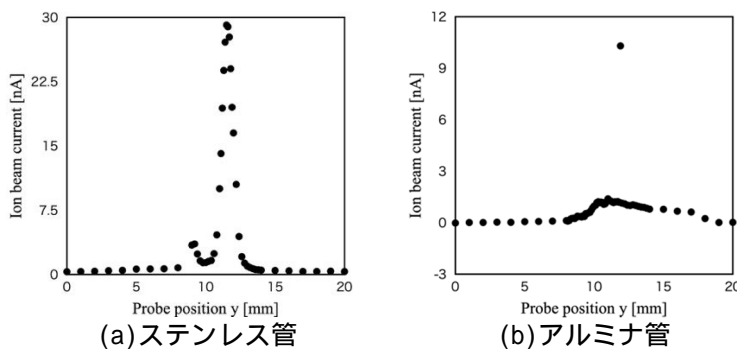


図 9. ウィーンフィルタと細管を用いたマイクロビーム生成結果

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 Seitatsu Onosaka, Kazuki Sakamoto, Tsubasa Nakamura, Toyohisa Asaji	4. 巻 1
2. 論文標題 Generation of Multi-charged Magnesium Ions Using an External Evaporation Source in ECR Ion Source	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Transactions on GIGAKU	6. 最初と最後の頁 10004-1-10004-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34468/gigaku.10.1_10004-1	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 Seitatsu Onosaka, Syotaro Oue, Taku Shinohara, Tsubasa Nakamura, Daichi Ishii, Syo Itimiya, Shiori Kobayashi, Hiroya Uyama, Suzuka Fujita, Ayumu Inagaki, Toyohisa Asaji, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi	4. 巻 8
2. 論文標題 Verification for Aluminum Multi-Charged Ions Generation Using ECR Ion Source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions on GIGAKU	6. 最初と最後の頁 08004-1-08004-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 野間 祐希、坂本 和輝、野志 晃生、松友 真哉、浅地 豊久、中村 翼
2. 発表標題 ウィーンフィルタおよび絶縁管を用いたイオンマイクロビームの生成
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 渡辺 唯斗、松友 真哉、浅地 豊久
2. 発表標題 ウィーンフィルタにおける荷電粒子の軌道シミュレーションと可視化
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野坂 成龍、中村 翼、浅地 豊久
2. 発表標題 ECRイオン源による外付けの蒸発源を用いた金属イオン生成の検証
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Seitatsu Onosaka, Kazuki Sakamoto, Tsubasa Nakamura, Toyohisa Asaji
2. 発表標題 Generation of Multi-charged Magnesium Ions Using an External Evaporation Source
3. 学会等名 The 7th International Conference on "Science of Technology Innovation" (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本 和輝, 渡辺 唯斗, 松友 真哉, 浅地 豊久, 中村 翼
2. 発表標題 小型ECRイオンビーム装置用ウィーンフィルタの開発
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会 第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石原 慎太郎, 浅地 豊久, 中村 翼
2. 発表標題 小型 ECR イオン源の引出電極改良によるイオンビーム電流量の向上
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会 第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川村時代、井上雄太、浅地豊久、中村翼
2. 発表標題 デスクトップ型2.45GHz ECRイオンビーム装置の開発
3. 学会等名 日本機械学会中国四国学生会 第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taku SHINOHARA, Syotaro OUE, Seitatsu ONOSAKA, Tsubasa NAKAMURA, Daichi ISHII, Tsukasa ITIMIYA, Shiori KOBAYASHI, Hiroya UYAMA, Ayumu INAGAKI, Toyohisa ASAJI, Kazumasa TAKAHASHI, Toru SASAKI, Takashi KIKUCHI
2. 発表標題 CHANGE IN TOTAL ION BEAM CURRENT OF ECR ION SOURCE BY EACH PARAMETERS
3. 学会等名 The 5th International Conference on "Science of Technology Innovation" (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Seitatsu ONOSAKA, Syotaro OUE, Taku SHINOHARA, Tsubasa Nakamura, Daichi Ishii, Syo Itimiya, Shiori Kobayashi, Hiroya Uyama, Ayumu Inagaki, Toyohiro Asaji, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi
2. 発表標題 PRODUCTION OF MULTI-CHARGED ALUMINUM IONS DUE TO THE DIFFERENCE IN BUFFER GAS USING AN SUPPTER SOURCE IN ECR ION SOURCE
3. 学会等名 The 5th International Conference on "Science of Technology Innovation" (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究 分担者	中村 翼 (Nakamura Tsubasa) (10390501)	大島商船高等専門学校・電子機械工学科・准教授 (55502)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	太田 孝雄 (Ota Takao) (80353267)	奈良工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授 (54601)	

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