

# 主論文の要約

論文題目 磁場援用高速原子ビーム源の特性評価と高性能化  
(Characterization and Further Improvement of Magnetic-Field-Assisted Fast Atom Beam Source)

氏名 森崎 諒

## 論文内容の要約

本研究では、高速原子ビーム源（以下、FAB 源）内部における荷電粒子の挙動、Ar<sup>+</sup>スパッタリング現象、及びビーム特性の解明に取り組み、FAB 源の特性評価と更なる高性能化を達成する FAB 源の開発を目指している。

第 1 章では、本研究を実施するに至った背景、表面活性化接合に用いられる従来形 FAB 源と磁場援用 FAB 源の特徴、及び研究の目的について述べている。

表面活性化接合は、半導体デバイス製造に用いられる常温接合手法の一種であり、接合物表面の自然酸化膜などの汚染層を Ar-FAB 照射により除去し、得られた活性表面同士を接触させることで接合を実現する。従来形 FAB 源は、箱形炭素陰極と円柱形炭素陽極で構成されており、内部で Ar プラズマを生成することから、Ar<sup>+</sup>スパッタリングにより電極表面が摩耗し、積算数百分程度の使用により炭素凝集体が発生してしまう。この凝集体が Ar-FAB 照射用開口部から排出され、接合物表面へ付着すると、接合時に界面へ欠陥を生成し、接合強度の低下を引き起こす。工業的に接合装置として FAB 源を利用する場合、FAB 源内部に炭素凝集体が発生する前に電極を交換する必要があり、生産性の低下を招く。

一方で、磁場援用 FAB 源は、FAB 源内部への磁場印加による荷電粒子の運動制御によって、従来形 FAB 源と比較して、最大で 15 倍の除去性能と 5 倍以上の長寿命化を達成した。しかし、磁場援用 FAB 源が、除去性能の向上と長寿命化を達成した詳細な要因は不明である。また、磁場援用 FAB 源の更なる高性能化のためには、FAB 源内部のプラズマ生成や輸送、Ar-FAB 生成原理、炭素凝集体発生機構などの解明が必要である。

以上のことから、本研究では、従来形 FAB 源と磁場援用 FAB 源内部における、荷電粒子の挙動、Ar<sup>+</sup>スパッタリングによる炭素電極表面摩耗と炭素堆積現象、及びビーム特性の解明を行い、更なる高性能化を達成する磁場援用 FAB 源の設計指針を提案する。

第 2 章では、FAB 源内部における荷電粒子挙動の解明を目指し実施した、従来形 FAB 源と磁場援用 FAB 源内部の Ar プラズマに関する粒子挙動解析シミュレーションと、ラングミュアプローブ法を用いたプラズマ内部パラメータ測定の結果について述べている。

本章では、PIC (Particle-in-cell)法と MCC (Monte Carlo collision)法を用いたシミュレーションにより、FAB 源内部の荷電粒子挙動の解析を行った。PIC 法により、電磁場解析や荷電粒子の挙動の模擬、MCC 法により、荷電粒子と中性粒子の衝突を模擬している。初めに、FAB 源内部中心面上の構造を模擬したモデルを作成し、プラズマ空間電位分布と荷電粒子密度分布の計算を行った。その結果、従来形 FAB 源は、先行研究にて提案されたプラズマ状態のように、内部に上下左右にそれぞれ対称な鞍状電位分布と荷電粒子密度分布を形成することを明らかとしている。一方、磁場援用 FAB 源内部では、Ar-FAB 照射方向に偏った分布を形成することが明らかとなった。これは、シース電界と印加磁場による  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトによるプラズマ輸送に起因している。また、以上の結果は、各 FAB 源内部の実験的なプラズマ状態観察結果と定性的に良い一致が確認された。さらに、ラングミュアプローブ法による、磁場援用 FAB 源内部の電子密度とプラズマ電位の空間分布の測定結果と、同様の傾向を示したことから、シミュレーションモデルの妥当性が確認された。

また、FAB 源内部の各電極へ入射する Ar<sup>+</sup>粒子束分布の解析結果から、従来形 FAB 源内部では、陽極の陰になる領域を除く全面へ同程度 Ar<sup>+</sup>が入射するのに対して、磁場援用 FAB 源内部では、Ar-FAB 照射用電極への Ar<sup>+</sup>の入射量が増加し、他面への入射量は相対的に減少した。この結果から、従来形 FAB 源は Ar-FAB 照射に伴い、すべての電極表面が Ar<sup>+</sup>スパッタリングにより摩耗すること、磁場援用 FAB 源は Ar-FAB 照射量が大きく、接合 1 回あたりの内壁摩耗量が少ないことが判明した。すなわち、磁場援用 FAB 源の除去性能向上は、Ar-FAB 照射量の増加に起因していることが示された。さらに、FAB 源内部の照射電極表面におけるイオンシース厚さの解析結果から、磁場援用 FAB 源は従来形 FAB 源と比較して、1/5 倍程度の厚さのシースを形成することが明らかとなった。また、Ar<sup>+</sup>の平均自由行程から、磁場援用 FAB 源内部では、Ar<sup>+</sup>は電位勾配の大きいシース中で十分に加速され、より高エネルギーな Ar 生成を達成することが示された。以上のことから、磁場援用 FAB 源の除去性能向上の二つ目の要因は、Ar-FAB の高エネルギー化であることを明らかとしている。

第 3 章では、FAB 源内部における Ar<sup>+</sup>スパッタリングによる炭素電極表面摩耗と炭素堆積現象の解明を目指し実施した、長時間使用後の磁場援用 FAB 源内部の電極表面観察と、従来形 FAB 源と磁場援用 FAB 源内外における、PIC-MCC 法と DSMC 法を用いた粒子挙動解析シミュレーションの結果について述べている。

本章では、長時間使用前後の磁場援用 FAB 源内部炭素電極の表面性状から、Ar<sup>+</sup>スパッタリングによる摩耗と炭素堆積量を評価した。その結果、磁場援用 FAB 源内部では、磁場

印加による荷電粒子の運動制御によって、スパッタリングが局所化することが示された。また、FAB 源の連続使用によって、高エネルギーの  $\text{Ar}^+$  が炭素電極へ入射することで、電極が加熱されることで熱ひずみを生じることと、電極表面に形成される炭素堆積層は DLC であることが分かった。DLC 堆積層の断面観察結果から、堆積層中または、堆積層と電極材料との界面に空隙が形成されていることが確認された。このことから、FAB 源の連続使用による電極表面の熱ひずみによって炭素堆積層中に形成された空隙から、炭素堆積層が剥離することで、炭素凝集体が発生することが示された。また、5,000 分使用後の磁場援用 FAB 源内部には炭素凝集体の発生が確認されず、 $\text{Ar}$ -FAB 照射時の炭素凝集体の排出もないことが確認されたことから、磁場援用 FAB 源の寿命は 5,000 分以上であることが示された。

また、シミュレーションによる各 FAB 源内部の炭素原子の挙動解析結果から、荷電粒子の分布に従って、従来形 FAB 源内部では電極全面にわたって、 $\text{Ar}^+$  スパッタリングによる炭素電極表面の摩耗と炭素堆積が発生し、磁場援用 FAB 源内部では、照射用電極表面においては摩耗が優位となり、側面電極と背面電極では炭素堆積が優位となることが分かった。磁場援用 FAB 源は局所的なスパッタリングによって、炭素堆積層が形成される面積の減少を達成したことが示された。さらに、磁場援用 FAB 源は、従来形 FAB 源より小さな放電電圧で、同等以上の除去性能を達成する。すなわち、接合装置として FAB 源を連続使用する際、電極へ入射する  $\text{Ar}^+$  のエネルギーは小さく、電極表面の温度変化も小さい。以上のことから、磁場援用 FAB 源は、除去性能の向上と、炭素堆積層中の空隙の抑制による長寿命化を達成したことが示された。

第 4 章では、FAB 源から照射される  $\text{Ar}$ -FAB 照射特性の解明を目指し実施した、磁場援用 FAB 源から照射される  $\text{Ar}$ -FAB 中のイオン電流測定と、FAB 源内外のプラズマ輸送と高エネルギー  $\text{Ar}$  原子に関するシミュレーションによる、 $\text{Ar}$ -FAB 中の  $\text{Ar}^+$  の中性化過程、ビームの中性化率、及びビーム径の解析結果について述べている。

本章では、磁場援用 FAB 源から照射される  $\text{Ar}$ -FAB を平板プローブで捕集することで、ビーム中のイオン電流の空間分布を調査し、ビーム特性評価と FAB 源外部における  $\text{Ar}^+$  中性化過程の解明を目指した。ビーム照射方向のイオン電流測定結果から、磁場援用 FAB 源の照射口近傍では、電子と  $\text{Ar}^+$  が存在しているが、照射距離の増加に伴って、 $\text{Ar}^+$  が  $\text{Ar}$  との非弾性衝突である電荷交換などによって中性化され、 $\text{Ar}^+$  は照射過程にて十分中性化されることが示された。また、ビーム径方向のイオン電流測定結果から、低エネルギー  $\text{Ar}^+$  はクーロン斥力によってビーム径方向へ拡散することが分かった。

また、従来形 FAB 源と磁場援用 FAB 源から照射される  $\text{Ar}$ -FAB 中の  $\text{Ar}^+$  と高エネルギー  $\text{Ar}$  の挙動解析結果から、磁場援用 FAB 源は磁場印加による高エネルギー  $\text{Ar}^+$  の生成により、FAB 源外部まで  $\text{Ar}^+$  が引き出されたことによって、照射口付近の中性化率は従来形 FAB 源と比較して小さいことが示された。しかし、このことは、磁場援用 FAB 源の  $\text{Ar}$ -FAB が高エネルギー化を達成したことも同時に示している。また、照射距離の増加に伴い、中性化率は増加し、従来形 FAB 源の中性化率と同程度となることから、接合装置への実装時における

被接合物表面の帯電防止効果は、従来形 FAB 源と同程度であり、十分実装可能であることが示された。また、各 FAB 源の照射距離に対するビーム径の増加率は同程度であり、FAB 源と被接合物との距離の調整によって、従来形 FAB 源と同サイズのウエハの接合が容易に達成されることも示された。したがって、磁場援用 FAB 源は表面活性化接合装置へ適用可能であるといえる。

第 5 章では、前章までの解析手法を用いて、電磁場の最適化によって更なる高性能化を達成する磁場援用 FAB 源の設計指針を提案する。

現在の磁場援用 FAB 源は、従来形 FAB 源と比較して電極構造に大きな差異はなく、磁場印加による荷電粒子の運動制御を目指し設計された。そこで、本章では、印加磁場強度と陽極構造が磁場援用 FAB 源性能へ与える影響を調査し、更なる除去性能の向上と長寿命化を達成する磁場援用 FAB 源の設計指針の検討を行った。FAB 源性能は、シミュレーションを用いて、除去性能、内部電極表面の耐摩耗性、ビーム中性化率を評価した。

最後に、第 6 章にて本論文のまとめを述べる。