



Title	対向発散磁界下低気圧誘導結合プラズマ中の電子加熱機構に関する研究
Author(s)	岡崎, 凌大
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16987号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16987
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99831
Type	doctoral thesis
File Information	Ryota_0kazaki_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 岡崎 凌大

学 位 論 文 題 名

対向発散磁界下低気圧誘導結合プラズマ中の電子加熱機構に関する研究
(Study on electron heating mechanism in low-pressure inductively coupled plasma under confronting divergent magnetic fields)

プラズマはイオンや電子といった荷電粒子および励起種を含む反応性の高い状態であり、半導体集積回路製造工程におけるエッチングや成膜などの材料処理に用いられる。集積回路の微細化や積層化において重要なプラズマ技術としては異方性エッチングが可能な低気圧プラズマドライプロセスが代表例である。プロセスの低気圧化の他にも大面積処理、高速処理、均一処理や材料損傷回避といった技術的要求がある。こうした技術の向上には、プラズマの密度、エネルギー、空間分布などの諸特性のより精緻な制御法が求められる。これらの要求に対し、磁界下で駆動される磁化プラズマは、電子数密度、電子温度、エッチャント生成量・基板照射量などが磁界形状・強度を通じて制御可能な点で有望視される。ドライプロセスに用いられる磁化プラズマの例としてマグネトロンプラズマ、ECR プラズマ (ECR: Electron Cyclotron Resonance、電子サイクロトロン共鳴)、誘導結合プラズマ (ICP: Inductively Coupled Plasma) が挙げられる。

本研究ではドライプロセスに適する低気圧下で高密度の維持が可能と期待される対向発散磁界下 ICP に注目している。対向発散磁界は 2 本の同軸直流励磁コイルに逆向きの電流を流すことで生じ、磁力線が互いに背き合う 2 領域の境界「分界面」では電子が磁力線周りに旋回することで電子の分界面通過が妨げられるため、電子閉じ込めの機能を有する。この働きでプラズマ励起源 RF アンテナ (RF: Radio Frequency、誘導電界でプラズマを駆動。13.56 MHz が代表的) に近い側ではプラズマを高密度・高エネルギーに、遠い側では低エネルギーとなる。その結果、前述の低気圧プラズマの維持や材料損傷の低減が期待される。

しかし、磁界下電子旋回により電子加速 (加熱) を受けられる時間が限られるため、電子はエネルギーを得難くなる。その対策として本研究では部分共鳴現象に注目する。部分共鳴は ECR と同様に磁界下電子旋回と交流電界による電子加速の方向が一致し生じる電子加熱現象であるが、不均一磁界下で起こるため電子加速が一時的・局所的であることから ECR と区別して部分共鳴と呼ばれる。ECR 発現に必要な磁界強度や空間的広がりが明確な一方、部分共鳴であると識別可能な磁界強度範囲 (共鳴磁界域) には学術的な共通の合意がなく、好ましい発現条件についても不明な点が多い。そこで本研究では、対向発散磁界下 ICP 中の電子の部分共鳴の機構解明と、部分共鳴を利用したプラズマへの効率的エネルギー投入と電子閉じ込めの両立を図る実践的設計制御指針の知見を得ることを目的としている。部分共鳴の機構解明には磁界下電子の微視的挙動の解析が必要であるため、粒子モデルシミュレーションを行った。部分共鳴による電子加熱を電子エネルギー利得 (EEG: Electron Energy Gain、電子 1 個が単位時間に受け取る電力) という独自の空間分解評価指標を設け評価した。電子のエネルギー消費はプラズマ発光を通じ実験的に観察できるが、電子加熱は測定が難しい点で精確に評価できる粒子モデルシミュレーションは目的に適う。

本論文は以下の 7 章からなる。第 1 章は研究背景を、第 2 章はシミュレーション上の想定を述べ

ている。第3章から第6章は研究結果である。第3章から第5章では各変数に対する依存性や制御性、第6章では電子加熱機構解明の試みについて述べている。第7章はまとめである。

第2章では、まず粒子モデルシミュレーションについて説明している。電子軌道計算についてはルンゲ-クッタ法による運動方程式の計算法を述べ、電子衝突散乱過程については気体分子の衝突断面積に基づいたモンテカルロ法による判定と各種衝突後の処理を説明した。続いてプラズマ容器形状と、円筒容器外周に配した2本の同軸直流励磁コイルと1本のRFアンテナにより生じる電磁界の設定を行った。媒質ガスとしてベンチマークに頻用されるArを用い5 mTorrの低気圧条件とした。加えて電子反射などの境界条件や電子追跡終了条件を示した。本研究で導入したEEGとプラズマ維持の指標量である電離周波数の他、電子群諸量の定義とサンプリング方法を示した。

第3章では、装置設計制御のパラメータとなるRFアンテナ位置、励磁コイル電流(磁界強度)を通じて、交流電界分布や直流磁界強度分布の条件を変えた。これらの条件における部分共鳴による電子加熱空間分布の変化傾向を観察した。共鳴磁界域がRFアンテナから遠く低電界となっても部分共鳴が生じること、直流励磁コイル電流を増加させ共鳴磁界域を狭くさせても部分共鳴が生じることを確認した。また電子が磁力線に導かれて移流することを利用し容器内磁力線がRFアンテナ付近と共鳴磁界域とを結ぶように、あるいは、電子が長く高電界域に留まれるような容器内磁力線付近にRFアンテナを配置することで電子加熱を増強できることを確認した。部分共鳴により電離周波数が増加する結果から部分共鳴の電離促進効果、すなわちプラズマ維持への寄与を確認した。

第4章では駆動電界の振幅を一定にしつつ駆動電界周波数の条件を13.56 MHz、27.12 MHz、40.68 MHzとして共鳴磁界域を側壁高電界域側へ移動、拡大させ、電子加熱と閉じ込めの評価を行った。これは、高電界域と共鳴磁界域を重ねることによる部分共鳴の増強と、共鳴磁界域の拡大で多くの電子がエネルギーを受け取られるようにする設計の意図がある。結果として、周波数が高くなるほど電子加熱が増強され、電離周波数も増加した。電子閉じ込めは周波数によらず有効であった。また高周波条件では、電子が共鳴磁界域と高電界域を同時に通る磁力線に長く捕らえられるような設計となっていたために電離の促進や電力投入の増強が観察された。

第5章では電子数密度を高めるために上下直流励磁コイル電流比を通じた分界面の湾曲で電子閉じ込め領域を狭め、同時に電子加熱を増強するために共鳴磁界域を上方・側壁へ変形させた。また駆動周波数も増加させた。その結果、共鳴磁界域での高EEGが観察された。その一方、少数の高エネルギー電子が分界面を越えることによる分界面下部での比較的高い電子数密度が観察された。

第6章ではプラズマ容器内の位置毎のEEGと平均電子速度の交流応答波形を観察した。EEG波形をk平均法で分類し、磁界強度領域毎の特徴抽出を試みた。分類の結果、EEGが常に正となり電子加熱に好ましい波形は共鳴磁界域に分布し、部分共鳴の発現を強く示唆する結果を得た。一方、それ以外の磁界強度領域においてはEEGが負になる位相が現れ、EEGのピークが現れる位相にも磁界強度に応じた進みや遅れが見られた。EEGの非対称性は平均電子速度の直流成分に由来し、不均一電磁界が原因であることが示唆された。

本研究では励磁コイルおよびRFアンテナのさまざまな配置において対向発散磁界下ICP中の微視的電子挙動を粒子モデルシミュレーションで観察した。異なる電磁界分布や駆動周波数に対し共通して部分共鳴による高EEGが観察された。部分共鳴が起こる共鳴磁界域とRFアンテナの配置、駆動周波数、湾曲分界面に対するEEGの依存傾向から、電子閉じ込めによる高密度化や部分共鳴による電子加熱増強といった低気圧磁化プラズマの維持に繋がる有用な設計制御指針が得られた。