



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_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 岡崎 凌大

審査担当者 主 査 特任教授 村山 明宏

副 査 教 授 本久 順一

副 査 教 授 樋浦 諭志

副 査 准教授 菅原 広剛

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)

高度情報社会を支える半導体集積回路の製造工程における材料処理にはプラズマが利用されている。特に集積回路微細化に不可欠な異方性エッチングのためにはプラズマの低気圧駆動が必要であり、低気圧下でのプラズマ維持の他、大面積均一処理、高速処理、材料損傷回避といった技術的要求がある。これら技術の実現のため、電子、イオン、励起種他からなるプラズマの精緻な制御が求められる中、磁界下で駆動される磁化プラズマは、磁界の持つ電子閉じ込めや電子流誘導の効果により電子数密度、電子温度に加え、電子衝突による反応活性種生成の空間分布や基板への照射量などを制御可能と有望視される。しかしながら、電磁界が共に働く状況ではプラズマ挙動が複雑になる。プラズマ構造・動特性を決める根本たる電子挙動に基づく諸現象の理解は充分ではなく、その上に立脚した磁界効果の利用技術も開発途上にある。

本論文では誘導結合プラズマの対向発散磁界による維持・制御を目的としている。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、磁力線が背き合う2領域の境界「分界面」は電子通過を妨げ電子閉じ込めの機能を持つ。また、電界周波数と同期した電子旋回が生じる磁界強度となる「共鳴磁界域」では不均一磁界下での一時的局所的電子サイクロトロン共鳴現象「部分共鳴」が起こり電子が効果的にエネルギーを得て低気圧下でプラズマ維持が可能と期待される。これを踏まえ著者は、磁界形状と強度、プラズマ励起源高周波アンテナとコイルの位置関係、電界周波数などの条件を変えつつ粒子モデルモンテカルロ法による計算機シミュレーションを行い、電子空間分布および電子加熱の様子を観察した。電子を閉じ込める磁界が強いと一般的には電子加熱が抑制されるが、部分共鳴の積極利用でプラズマ維持に必要な電子加熱が効果的に起こることを示し、磁化プラズマ装置と磁界の設計制御のための重要な基礎指針を得た。

第1章は研究背景を、第2章は解析手法詳細を述べている。第3～6章は各種条件依存性を解析しており、第7章はまとめである。第3章ではアンテナとコイルの位置関係および磁界強度を様々に変え、電子加熱発生の位置や程度を観察した。共鳴磁界域がアンテナから遠くても部分共鳴電子加熱が生じることを確認し、アンテナ付近と共鳴磁界域とが電子移流を導く磁力線により結ばれるようなアンテナ配置、または、電子が長く高電界域に滞在するような磁力線付近へのアンテナ配置で電子加熱を増強できることを示した。また、部分共鳴で加熱された電子と気体分子との電離衝突で生じる電子増倍を評価しプラズマ維持への寄与を確認した。第4章では誘導結合プラズマ駆動の

標準的電界周波数 13.56MHz に加え、産業科学医療用周波数帯に定めのある 2 倍周波数 27.12MHz および 3 倍周波数 40.68MHz で駆動したプラズマの解析を行い、駆動周波数に比例して 2 倍・3 倍の磁界強度となる共鳴磁界域で部分共鳴が生じることを確認した。共鳴磁界域がアンテナ付近高電界域に近付くと同時に共鳴磁界域の空間体積も増大が見込まれ、部分共鳴電子加熱がより多くの電子に対し生じることも期待される。高周波駆動は電子閉じ込めに有利な強磁界下でも電子加熱が可能でありプラズマ維持に寄与する可能性が示された。第 5 章では上下コイル電流比を変えて分界面を湾曲させアンテナ付近高電界域への電子閉じ込めを試みた。共鳴磁界域での電子加熱増強と、電離が閉じ込め領域に限定される効果が観察された。一方、分界面が高電界域・共鳴磁界域に近づくため高エネルギー電子が閉じ込めから逃れ易くなる傾向も観察された。第 6 章では電子加熱の交流電界応答位相分解観察がなされた。プラズマ容器内各所で得た電子エネルギー増減波形を k 平均法により分類した結果、第 3 章で部分共鳴が観察された領域に特有かつ共通の特徴として電界との同期や電子加熱が常に正となる特徴が見られ、部分共鳴識別手段となることを見出した。さらに、電子移流方向を表す電子ドリフト速度ベクトルは楕円ベクトル軌跡を描き、楕円軸の傾きからも部分共鳴発現を識別できることが判った。

これを要するに、著者は、対向発散磁界下誘導結合プラズマ中の部分共鳴による電子加熱の解析を通じ、磁界による電子閉じ込めと磁界下での電子加熱を両立する方策として、部分共鳴が起こる共鳴磁界域、プラズマ励起源となるアンテナ付近の高電界域、電子を導く磁力線の通過領域、これらを重ねる、あるいは磁力線を介して繋ぐとの指針を得た。プラズマ物理における部分共鳴現象の理解深化に寄与し、誘導結合磁化プラズマ装置の合目的的な設計制御に資する重要な指針を得たものであり、プラズマ工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。