

氏 名	こ 上 さ 坂 ひろ ゆき 之
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2305 号
学位授与の日付	平 成 15 年 7 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 航 空 宇 宙 工 学 専 攻
学位論文題目	Numerical Studies of the Electromagnetic Fields and Plasma Properties in a Microwave Plasma Source Excited by Azimuthally Symmetric Surface Waves (軸対称表面波励起マイクロ波プラズマ源における電磁界とプラズマ特性に関する数値的研究)

論文調査委員 (主 査) 教 授 斧 高 一 教 授 川 原 琢 治 教 授 福 山 淳

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、プラズマと誘電体壁との境界を伝播する表面波の電磁界によって励起されるマイクロ波プラズマについて、電磁波動伝播解析と流体モデルを統合した新しい解析法を構築し、表面波の発生・伝播とプラズマ生成・維持機構を論じた結果をまとめたものであって、5章からなっている。

第1章は序論であり、表面波励起マイクロ波プラズマ源の研究開発の歴史と応用分野についてまとめ、さらに、表面波および表面波励起プラズマの特徴について理論的分散関係を用いて説明している。表面波は1950年代に発見され、1990年代に入り表面波励起による低圧・高密度・大口径プラズマ源の開発が進められた。装置構造が比較的単純で、薄膜プロセス、宇宙推進など広い工学分野への適用が期待されるが、プラズマ源における物理諸現象は未解明な部分が多い。

第2章では、誘電体で覆われたマイクロ波導入口ロッドアンテナを有する軸対称構造のコンパクトな表面波励起プラズマ源を提案し、プラズマ分布を空間的に一様であるとして、有限差分時間領域法 (FDTD 法) を用いて、プラズマ源内の電磁波動伝播に関する数値解析を行っている。その結果、プラズマ電子密度が誘電体の誘電率とマイクロ波周波数によって決まるしきい値を越えると、プラズマと誘電体との境界近傍に局在する表面波が生じ伝播すること、しきい値以下ではマイクロ波は体積波として全体に広がりプラズマ源内に深く進入できないことを明らかにした。具体的に、マイクロ波周波数 2.45 GHz・誘電体の比誘電率 3.7 (石英) の場合、体積波から表面波へ遷移するプラズマ電子密度のしきい値は、 $n_{cr}=3.0 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ であり、周波数・比誘電率の増大とともに増大する。これらの解析結果は既知の実験観測結果とほぼ一致した。さらに、解析結果より求めた体積波と表面波の伝播定数 (伝播方向の減衰定数と波数) は、理論的に知られる波の分散関係から予測される伝播定数と良く一致した。

第3章では、軸対称表面波励起プラズマ源における物理諸現象をより現実の条件に即して解明するため、プラズマ分布の空間非一様性の効果を取り入れ、電磁波動伝播と表面波プラズマの挙動に関する自己無撞着な数値解析法を提案している。プラズマを流体モデルで取り扱い FDTD 法と組み合わせたハイブリッド数値解析モデルを構築し、表面波励起プラズマ柱に対する解析結果と既知の実験および理論的分散関係との比較により、この新しい解析法が表面波励起プラズマの挙動の解明・評価に適用できることを示した。具体的には、本解析法を適用して、表面波励起プラズマ柱の特徴である、プラズマ柱の軸方向に沿って電子密度はほぼ直線的に減少するが電子温度はほぼ一様となること、ガス圧力一定でマイクロ波投入パワーを増加すると軸方向の電子密度の傾きが維持されたままプラズマ柱の長さが伸びること、が十分再現された。さらに、プラズマ柱における電子密度や電子温度のガス圧力および管径への依存性も、実験とほぼ同様の傾向を示した。また、本解析結果から得られた表面波の伝播定数は、空間一様を仮定した理論的分散関係から得られる伝播定数と比較して、特に高密度領域で良く一致した。

第4章では、上で開発した FDTD/流体ハイブリッドモデルを用いて、軸対称表面波励起プラズマ源の数値解析を行って

いる。その結果、アンテナを覆う誘電体に沿って表面波の定在波が形成されること、定在波は波の位相速度と群速度の方向が一致した前進表面波の重ね合わせにより形成されること、またガス圧力やマイクロ波投入パワーが低い場合、すなわちプラズマ電子密度が比較的低い場合には、波の位相速度と群速度が対向する後進表面波が同時に現れ、一つのプラズマ源内に複数モードの表面波が混在することを明らかにした。さらに、後進表面波の波長は前進表面波の波長と比較して1桁程度短いこと、プラズマ密度の増大とともに後進表面波の伝播における減衰定数は増大し波長は短くなること、低圧力下でのプラズマの生成・維持には主に後進表面波が、一方高圧力下では前進表面波が寄与していることを示した。このような後進表面波の混在とその電磁界の微細構造は、従来の理論解析や数値解析では予測されず、本研究で初めて明らかにされた知見であり、本解析法の有用性を示している。

第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、宇宙推進、薄膜プロセッシングなど様々な工学分野で重要な役割を担っているマイクロ波プラズマのうち、プラズマと誘電体壁との境界を伝播する表面波の電磁界によって励起されるマイクロ波プラズマについて、表面波の発生・伝播とプラズマ生成・維持機構の解明と、プラズマ源開発に供しうる数値解析モデルの構築を目的として研究した成果についてまとめたものであり、その主な成果は次のとおりである。

(1) マイクロ波導入ロッドアンテナを有する軸対称構造のコンパクトな表面波励起プラズマ源を提案し、有限差分時間領域法 (FDTD 法) によるプラズマ源内の電磁波動伝播解析を行った。その結果、プラズマ電子密度が誘電体の誘電率とマイクロ波周波数によって決まるしきい値を越えると、プラズマと誘電体との境界近傍に局在する表面波が生じ伝播すること、しきい値以下ではマイクロ波は体積波として全体に広がりプラズマ源内に深く進入できないことを明らかにした。

(2) 軸対称表面波励起プラズマ源における物理諸現象をより現実の条件に即して解明するため、プラズマ分布の空間非一様性の効果を取り入れ、電磁波動伝播と表面波プラズマの挙動に関する自己無撞着な数値解析法を提案した。具体的には、プラズマを流体モデルで取り扱い FDTD 法と組み合わせたハイブリッド数値解析モデルを構築し、表面波励起プラズマ柱に対する解析結果と実験および理論的分散関係との比較により、この新しい解析法が表面波励起プラズマの挙動の解明・評価に適用できることを示した。

(3) 開発した FDTD/流体ハイブリッドモデルを用いて、軸対称表面波励起プラズマ源の数値解析を行った結果、アンテナに沿って表面波の定在波が形成されること、定在波は波の位相速度と群速度の方向が一致した前進表面波の重ね合わせにより形成されること、またプラズマ電子密度が比較的低い場合には、波の位相速度と群速度が対向する後進表面波が同時に現れ、一つのプラズマ源内に複数モードの表面波が混在することを明らかにした。さらに、後進表面波の波長は前進表面波の波長と比較して1桁程度短いことを示した。後進表面波の混在とその電磁界の微細構造は本研究で初めて明らかにされた知見であり、本解析法の有用性を示すものである。

以上要するに本論文は、表面波励起マイクロ波プラズマについて、電磁波動伝播解析と流体モデルを統合した新しい解析法を提案し、実験と比較してその妥当性を確かめるとともに、後進表面波による電磁界の微細構造の発現を初めて見出したものであり、得られた成績は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年6月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。