

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 11459 号
------	---------------

氏 名 鈴木 陽香

論文題目

大気圧非熱平衡マイクロ波放電を用いた長尺高密度プラズマに関する研究

(Study on long-scale and high-density plasma using atmospheric-pressure non-thermal microwave discharge)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	豊田 浩孝
委員	名古屋大学	教授	堀 勝
委員	名古屋大学	特任教授	関根 誠
委員	東北大学	教授	金子 俊郎

論文審査の結果の要旨

鈴木陽香君提出の論文「大気圧非熱平衡マイクロ波放電を用いた長尺高密度プラズマに関する研究」は、さまざまな広幅材料の処理に有用な革新的プラズマ処理手法として大気圧下において高プラズマ密度・低ガス温度・空間均一な一次元長尺マイクロ波プラズマを生成する装置を新たに考案し、そのプラズマ生成を実現するとともにプラズマ生成の物理機構を明らかにし、またその工業的有用性を実証することに成功したものであり、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、大気圧プラズマの発展およびプロセスにおけるその利点について概説するとともに、効率的なプロセスのために求められるプラズマ源と、これまでに提案されている種々のプラズマ源についてその特徴と問題点を示している。そして、これらの問題点をもとに本研究の目的について述べている。

第2章では、本研究で提案するスロットアンテナ式マイクロ波ラインプラズマ源の原理および本方式によるプラズマ生成の結果について述べている。従来のスロットアンテナ式マイクロ波プラズマ源は導波管端を短絡終端することにより導波管内部のエネルギーを増加させプラズマ生成をおこなうものであったが、導波管内部における定在波の発生により導波管方向に対するプラズマの均一生成が不可能であった。そこで、本研究ではサーキュレーターと整合器をループ型導波管と組み合わせることにより、高エネルギー密度の進行波のみをループ導波管内部に発生させることを提案している。そして本提案にもとづいたループ導波管に長尺スロットを配した装置を製作しプラズマ生成試験をおこなったところ、長尺の大気圧マイクロ波プラズマ生成に成功した。また、プラズマの挙動を詳細に観察したところ、パルスマイクロ波のデューティ比、スロット幅あるいはマイクロ波電力に依存して、2つの放電モードすなわち、数mmのプラズマがスロットに沿って数m/sで移動する「移動型ラインプラズマ」モード、およびプラズマが長尺スロット内に完全に一樣に発生する「直線ラインプラズマ」モード、が存在することを見出した。そして、直線ラインプラズマにおいて長尺スロット内において均一なプラズマ生成が実現されていること、また2つの放電モード間の移行はマイクロ波電力密度に依存していることを明らかにした。

第3章では、本プラズマ源が低ガス温度かつ高密度なプラズマであることを実証するため、発光分光計測によるプラズマ評価をおこなった。ヘリウムあるいはアルゴンガスに窒素を微量添加した際の窒素分子発光スペクトルを計測し、その結果をシミュレーションと比較することによりガス温度を算出したところ、ヘリウムにおいて400K、アルゴンにおいて600Kであった。また、希ガスへの水素微量添加時の水素原子バルマーβ線のシュタルク拡がりをもとに電子密度を求めた結果は $1.2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ となり、本プラズマ源が低ガス温度で高密度のプラズマであることが明らかとなった。

第4章では、本ラインプラズマにおいて安定したプラズマ生成をおこなうための知見を得るため、放電モードのひとつである「移動型ラインプラズマ」について、プラズマの移動メカニズムについて、実験および電磁界シミュレーション・1次元拡散シミュレーションをもとにした検討をおこなった。まず、高速ゲートICCDを用いることにより移動する一つのプラズマの発光強度分布計測をおこなったところ、プラズマ内で空間的に発光強度の分布が存在することが確認され、この原因について電磁界シミュレーションによる調査をおこなったところ、プラズマ中における電界強度の空間分布が発光強度の分布を引き起こしていることが明らかとなった。また、この電界空間分布をもとに1次元拡散シミュレーションをおこなったところ、プラズマがマイクロ波伝搬方向にそって移動し、その移動速度が実験結果とよい一致を示すという結果が得られ、「移動型ラインプラズマ」におけるプラズマ移動のメカニズムが明らかとなった。

第5章では、本プラズマ源を用いた応用について、樹脂フィルムの表面親水化処理および酸化銅の還元を例として取り上げ、本プラズマ源の性能を評価した。本プラズマ源を用いて希ガスプラズマによるPETフィルムの表面処理をおこなったところ、約5秒で表面親水性が大幅に向上していること、またスロットに沿って均一な処理が実現されるとともに樹脂そのものには全く熱的ダメージが発生していないことが示された。さらに、酸化銅還元実験では希ガスにわずかの水素ガスを添加して表面処理をおこなうことにより、1~2nm/sの高速で酸化銅の還元が実現できることを明らかにした。これらの結果より表面処理装置として本ラインプラズマ源の有用性が実証された。

第6章では、プロセスの低コスト化の観点から100%分子ガスを用いたラインプラズマ生成を目指し、電磁界シミュレーションを援用した装置の改良をおこなった。その結果、窒素ガスを用いた電力2.0 kWのプラズマ生成において30 cm長スロット内で長さ約15 cmのラインプラズマの生成に成功した。また、発光分光法によりこのプラズマのガス温度を評価したところ1,400Kであり、窒素プラズマとしては比較的低温であることが確認された。本章の成果は、低コストかつ高速なプロセス装置として本ラインプラズマ源が幅広い用途に応用でき

論文審査の結果の要旨

ることを示す極めて重要な成果である。

第7章では本論文を総括し、得られた研究成果の意義を明確にするとともに、残された課題と将来展望について述べている。

以上のように本論文は、広幅プラズマ処理において重要となる大気圧長尺高密度プラズマ生成の革新的手法を提案・実現するとともに、プラズマ生成の物理機構を明らかにし表面処理プロセスとしての有用性を実証したものであって、工業の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文提出者 鈴木陽香君は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格があると判断した。