

氏 名	で ぐち みき お 出 口 幹 雄
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論 工 博 第 3706 号
学位授与の日付	平 成 15 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Study on the Insulated Probe Method for Monitoring Processing Plasma.
	(プロセッシングプラズマのモニタリングのための絶縁プローブ法の研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 橋 邦 英 教 授 石 川 順 三 教 授 福 山 淳

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、半導体プロセスなどに用いられる反応性プラズマの制御技術に関して、プロセッシングプラズマのモニタリングに適した新しいプラズマ測定方法を考案し、その測定原理と特徴について実験に基づいて論じた結果をまとめたものであって、7章から成っている。

第1章は序論であり、プラズマプロセスにおけるプラズマのモニタリングの意義と、最も基本的なプラズマ計測手法であるラングミュア・プローブ法の長所、および、これを反応性プラズマに適用した場合の問題点について整理し、本研究に対する動機について述べている。

第2章では、新しく考案した「絶縁プローブ法」の測定原理について、プラズマの空間電位一定の前提に基づいて述べている。すなわち、表面を薄い絶縁膜で覆ったプローブに矩形波パルス電圧を印加して、プローブ電位にステップ状の変化を与えた場合のプローブ電流の応答について解析し、パルスエッジにおけるプローブ電流のピーク値、および、それに続く減衰波形の時定数を測定することにより、これらからラングミュアプローブ法と同様に電子温度・プラズマ密度などのプラズマパラメータを求めることができることを示している。また、パルス電圧波形が有限の立ち上がり時間を持っている場合のその測定への影響、並びに、プローブシースの静電容量やプローブの浮遊容量を介して流れる変位電流の測定への影響について考察を加え、これらによる誤差を回避できるための条件を明らかにしている。さらに、シリコンウエハをプローブとして用いることが可能であることを実験により明らかにしている。

第3章では、プローブ表面に汚染膜が付着した場合に、これが測定に及ぼす影響について考察し、汚染膜が導電性を持つ場合は、汚染が極端にならない限り、測定には殆ど影響が現れないこと、また、汚染膜が絶縁性の材質の場合には、プローブの電流応答の時定数が、汚染の蓄積とともに変化するため、この時定数の変化から汚染膜の付着量を逆に見積もることが可能であることを、簡単なモデルによる数値計算によって示している。また、実際にプローブを、 O_2 を含むプラズマおよび CH_4 を含むプラズマに暴露し、プローブ特性の推移を従来のラングミュア・プローブ法と比較した結果、絶縁プローブ法によるプローブ特性には、ラングミュア・プローブ法の場合のような不安定な推移は見られず、プローブ表面の汚染が予想される雰囲気においても、安定した測定が可能であることを明らかにしている。

第4章では、RF放電プラズマに絶縁プローブ法を適用する場合の測定原理について述べている。すなわち、RF放電プラズマの空間電位振動によってプローブに流れる電流のRF基本波成分に注目し、プローブに矩形波パルス電圧を印加して、プローブ電位にステップ状の変化を与えた場合の、プローブ電流中のRF基本波成分の応答について解析し、パルスエッジにおけるその振幅変化と位相シフト、およびこれらの変化分の減衰時定数を測定することにより、電子温度・プラズマ密度・プローブシースにかかる平均電圧およびプラズマの電位振動の振幅をそれぞれ見積もることができることを示している。また、測定値からこれらのプラズマパラメータを計算するために必要となる、プラズマの空間電位振動の位相情報についても、これを知るための方法について考察し、放電用RFと周波数の僅かに異なる正弦波電圧をプローブに加え、プローブ電流のRF成分の振幅変化を観測することにより、これからプローブ電流と空間電位振動の間の位相角を知ることができるこ

とを示している。以上の測定法を 13.56 MHz のアルゴン RF 放電プラズマに適用し、おおよそ妥当な測定結果が得られることを実験で示している。

第5章では、RF 放電プラズマに絶縁プローブ法を適用する場合、正弦波電圧をプローブに印加して、これによってプローブ電流の RF 成分が変調を受ける様子を分析し、変調によって生じる側波帯の強度と、基本波成分に対する側波帯の位相角とを求めることにより、第4章に述べている方法と同様の測定が可能であることを示している。その具体的な例として、13.56 MHz のアルゴン RF 放電プラズマを用いて、パルス電圧を用いる方法と正弦波電圧を用いる方法の比較を行い、両者の測定値がほぼ一致することを示している。

第6章では、さらに、RF 放電プラズマに絶縁プローブ法を適用する場合、RF の基本波成分に対して半波長の伝送線路をプローブに接続して、これを介してプローブ電圧を供給し、その中間点において線路電圧を検出してプローブ電流信号を得るように測定系を構成することにより、測定のための電子回路をプローブの位置から RF 基本波の $1/4$ 波長分だけ離して置くことができるようになり、プローブの浮遊容量を増加させることなしに、測定系の設置の上での自由度を大幅に高めることができ、実際のプロセス装置への本測定方法の適用性が著しく改善されることを示している。13.56 MHz のアルゴン RF 放電プラズマにおいて、伝送線路を用いてプローブ電流検出を行う方法と、電子回路的にプローブ電流を行う方法の比較を行い、両者が同等であることを明らかにしている。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約し、プラズマプロセスのモニタリング手段としての実用化への展望を述べるとともに、残された課題について触れ、特に、プラズマ中に種々の粒子種が存在する場合の問題について、モニタリング手法としての可能性について示唆している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、材料プロセス用プラズマのモニタリング法として、ラングミュア・プローブ法を基礎としながら、反応性プラズマの測定に際して、その方法が持つ致命的な問題点を解決しうる新しいプラズマ計測方法を提案し、実証したものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

(1) 電極の表面を薄い絶縁膜で被覆したプローブを用いて、これに矩形波パルス電圧を印加した際のプローブ電流の応答を直接観測できるように電子回路上の工夫を行い、そのプローブ電流の応答波形の分析から、プラズマ中の電子の温度や密度などの主要パラメータを、従来のラングミュア・プローブ法と同様に求めることができることを理論的に示し、空間電位変動のない非反応性プラズマ中で実験的に検証している。

(2) 実際にこの測定法（絶縁プローブ法）では、従来の方法に比べて反応性プラズマへの暴露に対して安定した測定が可能であることを、簡単なモデル計算によって示すとともに、実際に双方のプローブを O_2 や CH_4 を含む反応性プラズマに暴露し、この測定法が従来の方法よりも表面の変化に影響を受けずに、安定に使用できることを実験的に示している。

(3) また、RF 放電プラズマに対してこの測定法を適用する場合には、プラズマの空間電位振動によってプローブに流れる RF 電流成分の振幅および位相が、プローブに電圧を印加した際に変化する様子を観測することにより、プラズマの電子温度・密度・プローブシースにかかる平均電圧・プラズマの空間電位振動の振幅といった、RF プラズマを特徴づける主要なパラメータを見積ることが可能であることを、理論的・実験的に示している。

(4) この場合、プローブに加える電圧は、矩形パルス電圧に代えて正弦波電圧を用いても同等の測定が可能であること、さらには、プローブ電流の検出に当たって、電子回路を直結して検出する代わりに、 $1/2$ 波長の伝送線路の特徴を利用して、遠隔でもプローブ電流検出が可能であることを実験的に示し、この測定法の実プロセス装置への適用性が高められることを示している。

以上要するに、本論文は、反応性プラズマ中でのプラズマパラメータの簡便で再現性のよいモニター方法としての絶縁プローブ法を開発し、その有効性を明らかにしたもので、学術上、実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14年12月18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。