氏　名	立　田　利　明（たつた　としあき）
学位(専攻分野)	博　士　（工　学）
学位記番号	博　甲　第　98　号
学位授与の日付	平成 7 年 3 月 24 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	工芸科学研究科情報・生産科学専攻
学位論文題目	平行平板型高周波放電プラズマ装置の特性と硬質炭素膜の形成過程に関する研究
審査委員	（主査）教授 橘　邦英 教授 金森仁志　教授 堤　誠

論文内容の要旨

低温プラズマを用いた材料プロセスは、半導体製造、新素材開発、表面処理、マイクロマシニングなどで欠くことのできない基盤技術となってきている。本研究は、そのようなプロセスで最も広く用いられている平行平板電極を有する容量結合型高周波放電プラズマ装置について、放電の構造やプラズマ特性を詳細に調べ、市販装置としての改善の方策や、薄膜形成への適用例における動作制御の指針を得ることを主たる目的としたもので、申請論文は7章により構成されている。

第1章は序論で、本研究の背景と目的、論文の構成について述べている。

第2章では、平行平板型高周波放電プラズマの特徴と電気的プローブ法によるプラズマパラメータの計測法について述べている。平行平板型プラズマ装置内では、電極間に印加した高周波電界によって放電が開始し、電子衝突による原料の解離や電極が進み、生成された反応活性なラジカルやイオンは気相で二次的な反応を繰り返して組成が再調整された後、拡散や電界によるドリフトで電極に輸送され、その上に設置された基板表面での反応を経て薄膜が形成される。従って、電極間での電位の分布や電子エネルギー、密度といったプラズマパラメータの空間的な変化がプロセスにおける反応過程を支配している。それらの測定のために申請者が自作して使用したシングルプローブ、対称型ダブルプローブ、非対称型ダブルプローブ、エミッシブプローブ、指向性電子エネルギー分析プローブについて、それぞれの構造や測定の原理、並びにその特徴について述べている。

第3章では、硬質炭素膜の堆積に用いられるメタンガスの放電プラズマについて、電極間でのプラズマパラメータの空間的変化をプローブ法で測定している。特に、プラズマ電位の高周波変動に伴うシングルプローブ測定への影響とその除去の工夫について検討している。得られた電子のエネルギー分布と密度を用いて、メタン分子の電離や解離の衝突断面積の既知のデータから、イオン化やラジカル生成の空間的な頻度の分布を推定した。また、プラズマ中の CH ラジカルの発光分布と比較して、その妥当性を議論した。また、CH_x（x＝1～3）ラジカルなどの膜堆積前駆体の密度や空間分布の、ガス圧や RF 電力に対する依存性を系統的に調べている。

前章の解析によって膜堆積に基板表面でのイオン衝撃が大きな影響をもっていることが示唆されたので、第4章では、電極に入射するイオンのエネルギーとその種類を測定する実験を行った結果を記述している。まず、試作した阻止電界型イオンエネルギー分析器の原理と構造、測定の方法について述べた後、接地電極と RF 印加電極側でのイオンのエネルギー分析を行い、アルゴンガスの測定で参考文献のデータとの比較によって方法の妥当性を確認している。次に、実際のメタンガスを用いた測定で、それぞれの電極上で

のイオンエネルギー分布の特徴が、ガス圧やプラズマと電極間の電位差（シース電圧）によって変化する様子を系統的に調べている。また、電極に入射するイオンの種類を四重極質量分析計によって測定し、ガス圧などによる組成の変化を、シース内での衝突による反応と関連付けて議論している。

第5章では、実際に基板を設置して炭素系薄膜を堆積させ、その特性をマイクロビッカース硬度の測定や、赤外吸収スペクトルによる水素結合形態の測定、レーザーラマン散乱法による炭素の sp^2、sp^3 結合形態の測定、薄膜の表面形状の走査型原子間力顕微鏡による測定によって調べている。更に、その結果をイオン衝撃のエネルギーやイオン電流の測定結果と関連付けて考察し、平滑な表面形状で硬度も高い良質な炭素膜を得るためには、最適なイオン衝撃エネルギーの値が存在することを示した。

プロセスプラズマ中では、微粒子の発生、捕捉、成長が起こり、膜形成などの結果に重大な影響を与えることがある。その問題に関連して、第6章ではアルゴンプラズマ中に炭素の微粒子を注入し、その挙動やその存在がプラズマ特性に与える影響を実験的に考察している。その結果、大量の微粒子が存在すれば、付着によって電子を消滅させるため、プラズマ電位の空間分布がプラズマバルク中で電界を高めるように自己再編して、体積内での電離を促進して放電を維持する傾向を示すことを検証した。また、微粒子の相互癒着などによる成長や総密度の減少に伴って、プラズマ中の電位分布が変化するために、微粒子の存在する領域が時間的にゆっくりと変化していく様子も観測している。これらの知見は微粒子の発生や成長、輸送現象を解明し、それを制御する方策を考える基礎データとして有用である。

第7章は結論で、本研究で得られた成果を要約している。

論文審査の結果の要旨

本研究は、各種材料の薄膜形成等のプラズマプロセスで広く用いられている平行平板（二極）型高周波放電反応装置について、その放電機構やプラズマ特性を理解することによって、市販のプラズマ装置の設計や性能改善に反映することを主な目的として行われたものである。まず、プラズマパラメータとその空間的な変化を測定するために、種々の電気的探針法を試み、電子エネルギー分布関数や電子密度、空間電位の高周波変動などの測定を行った。得られた知見を基にして、放電維持や膜形成に直接関与するイオンやラジカルの生成頻度の空間分布が、ガス圧などの外部パラメータに依存する様子を系統的に調べている。また、実際のプロセスへの適用例として硬質炭素薄膜の堆積過程を取り上げ、イオン衝撃が膜特性に与える影響を調べるために、電極に入射するイオンのエネルギーを分析する装置を試作し、それを用いて接地側と RF 印加側の電極上でのエネルギー分布をそれぞれ測定している。その結果、プラズマ中の電位分布とガス圧などによって変わるイオンエネルギー分布の特徴と得られる炭素膜の表面形状、硬度、化学結合形態などの特性が相互に関連付けられた。

このように、本研究の主な成果は、従来経験的になされていたプロセスの制御を電子やイオンのエネルギー分布などの内部パラメータと外部制御パラメータとの関係を明確にすることによって、より高度なプロセス制御のソフトウエアに対して基礎データを提供することができたことである。また、その結果は実用的な生産装置の設計に利用することができる。本論文の主要な内容は2編の論文として、国際的な学術論文誌に公表されている。

以上の審査から結論して、申請者の論文は博士の学位授与に値するものと判定する。なお、本論文は実用的なプラズマ装置の開発に関して、工学的な見地から深く考究したものであるから、付記する専攻分野としては工学が適切である。