

氏名	しみず てつ じ 清水 鉄 司
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成13年3月26日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻
学位論文題目	変形マグネトロンプラズマのパラメータ制御
指導教官	東北大学教授 佐藤 徳芳
論文審査委員	主査 東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学教授 犬竹 正明 東北大学教授 畠山 力三 東北大学助教授 飯塚 哲

論文内容要旨

第1章 序論

反応性プラズマを用いたプラズマプロセスは広く活用されており、今後ますます需要が増していくと考えられる。しかしながら、新しい機能を持った薄膜の開発や、さらなる微細加工の要請にともない、現状の技術では高精度プロセスが求められる生産技術としては成り立たなくなるおそれがある。このために、迅速に技術開発を行える計測や物理的モデリングが必要になると考えられる。一般の反応性プラズマにおいては、たとえばプラズマ生成のための投入電力、ガス種やその混合比、動作圧力、また基板温度などを制御することによって、最適と思われる条件を導出しプロセスをおこなっている。ところが、パラメータがあまりにも多く、上記以外にもたとえば原料ガスの流れがプロセスの質や分布に影響を与えるため、完全な理解からほど遠いのが現状となっている。

反応性プラズマ中において、プラズマ中で生成されたイオンやラジカルが固体表面へ輸送され、固体表面で反応が進行し各種プロセスがおこなわれている。この固体表面における反応を決定しているのは、基板の材質・温度のほかに、プラズマ中で生成されたラジカルやイオンおよびイオンのエネルギーである。これらのラジカルやイオンはプラズマ中の励起・電離過程を通じて生成され、またイオンのエネルギーは基板電位やプラズマ中の電子温度の関数である。このように、プラズマが気相中の反応や基板前面シース電圧を決定しているため、今後プラズマそのもののパラメータをプロセスに導入し制御する必要性が現在出てきている。

今後のプロセッシングプラズマは、プロセスの高速・高品質化、また装置を汎用的にするため、各プロセスに応じてプラズマを自在に制御できるものである必要がある。基板前面のプラズマ密度分布は、そのままプロセスの分布に反映されるため、最低限制御しなければならないパラメータの1つである。基板表面の反応を決定する活性種は、プラズマ中における電子の衝突によって生成され、その電子エネルギーによって活性種が変化するため、電子のエネルギー分布制御がきわめて重要である。また、基板に入射するイオンは基板表面の化学反応を促進するが、適切な値よりも大きなエネルギーでイオンが基板に入射すると基板にダメージを与える可能性がある。そのため、基板に入射するイオンのエネルギー分布も制御する必要がある。

本論文においては、容易に直径1 m程度まで、均一プラズマを基板前面に生成できる変形マグネトロンプラズマ源を用い、補助電極を用いた基板前面密度分布制御、グリッド法を用いた基板前面電子温度制御、高周波電極上磁場やダブルプラズマ法を用いたイオンエネルギー制御をおこなうことによって、反応性プラズマを自在に扱うことのできるデバイスとしての方法を確立することを目的としている。

第2章 実験装置

本章では、本研究で使用した実験装置、プラズマパラメータの測定方法、ダイヤモンド成膜の際の膜質解析法などについて説明している。

プラズマ生成のために、変形マグネトロン型高周波電極を用いた。変形マグネトロン型電極は、リング状の高周波電極と2対の互いに極性の異なる磁石リングによって構成されている。磁石リングによって、高周波電極表面に平行に数100 G程度の磁場を印加することができる。この磁場によって、高周波電極表面における電子の捕捉効果による放電の高効率化のほか、壁などへの拡散を抑えることができる。また、この表面磁場によって、高周波電極表面の垂直方向電子の移動度が減少するため、高周波電極前面のシース電圧が減少し、高周波電極からのスパッタリングを低減することができる。プラズマは、この高周波電極に電力を入射しマグネトロン放電することによって生成される。この放電形式の特徴として、一般のプラズマ源とは異なり真空容器周辺部でプラズマを生成している点が挙げられる。このプラズマを拡散させることによって、基板前面に均一なプラズマを生成させるため、基板の大面积化が容易になる利点がある。

プラズマ中のパラメータはラングミュアプローブを用いて測定し、基板に入射するイオンのエネルギー分布はファラデーカップを用いて測定した。また、ダイヤモンド成膜実験の際の膜の同定および膜質の解析に関しては、ラマン分光を用いて行った。

第3章 プラズマ密度分布制御に関する実験結果

半導体プロセスにおいて、プロセスの面内均一性は様々なパラメータによって決定されている。様々なプロセス、特にCVDプロセスにおいて、密度分布が均一であるにもかかわらず、プロセスの均一性を実現できないことがある。これは、プロセスの均一性がプラズマの密度分布と電気的に中性なラジカルの密度分布の両方の影響を受けているためである。ラジカルの密度分布は、ガスの導入法や真空排気法、電極形状などの装置の構成によって決まるガス密度分布と、プラズマ中の電子温度などのプラズマパラメータ分布とによって決定されており、そのすべての制御は困難である。このような場合、プロセスの面内均一性を実現するには、ラジカル分布の不均一性を補正する形でプラズマの分布を積極的に制御することが有効であると考えられる。そこで、本章では変形マグネトロン型電極に平板型補助電極を導入し、基板前面密度分布制御を試みた。

直径50 cmの変形マグネトロン型電極に、変形マグネトロン型電極中心から7 cm離れた位置に直径20 cmの平板マグネトロン電極を導入する。変形マグネトロン型電極に500 W入射し、平板電極に高周波電力を入射することによって基板前面の密度分布制御を行った結果について述べている。

その結果、変形マグネトロン型電極中心から5～15 cm離れた位置で、補助電極に0～50 W入射することによって、密度分布を凹型から均一、凸型にまで自在に制御できることがわかった。主放電に入射した電力の10%で制御していることは、非常に効率的に補助電極前面でプラズマを生成していることを意味している。また、この方法は変形マグネトロン型電極近傍で密度均一面を生成できることを意味しており、装置の小型化に有効である。

第4章 電子温度制御に関する実験結果

反応性プラズマにおいて、基板表面の反応を決定しているものに、基板表面に輸送される活性種やイオンが挙げられる。この活性種やイオンは、プラズマ中の電子の衝突によって生成されており、電子のエネルギーによってその種が決定される。つまり、電子のエネルギー分布を制御することによって基板表面の反応を制御することができる。そこで、本章では大口径プラズマ中において、グリッド法によって基板前面の電子温度を制御した結果について述べている。

直径50 cmの変形マグネトロン型電極に同軸上に直径35 cmの浮遊電位に保たれたグリッドを挿入する。グリッドにはスリットと呼ばれる穴があいており、その面積を変化させることによって基板前面の電子温度を制御

した。

その結果、Ar などの希ガスのほかに、 H_2 、 CH_4 などの反応性ガスを用いたプラズマ中においても、基板前面の電子温度 T_e を 0.5 ~ 2.5 eV まで制御できることが分かった。また、電子温度制御下においても直径 30 cm にわたり、均一なプラズマを生成できることが分かった。

第5章 イオンエネルギー制御に関する実験結果

本章では、高周波放電プラズマ中における基板入射イオンエネルギー制御に関する実験結果について述べている。絶縁物表面に深い負の電位を印加できることから、高周波放電は広く半導体プロセスに用いられている。しかしながら、高周波プラズマ中では基板前面のシースが高周波振動をしているため、プラズマの駆動周波数がイオンプラズマ周波数に比べ十分大きいにもかかわらず、基板に入射するイオンのエネルギー分布は非常に幅広いものとなる。そこで、本研究においては高周波放電プラズマ中でイオンエネルギー幅をできるだけ狭くした状態で、平均イオンエネルギーを制御することを目的として実験を行っている。実験方法として、1 つは変形マグネトロン型電極の高周波電極表面磁場を変化させることによって行ったイオンエネルギー幅制御である。高周波電極表面磁場を変化させることによって、電極表面における電子の移動度が変化する。それに伴い、プラズマ中の空間電位振幅も変化する。この原理を用いて、高周波電極表面磁場 B を 0 ~ 610 G まで変化させることによって、基板に入射するイオンエネルギー幅を 56 ~ 4 eV 程度まで変化させることができた。この際の 4 eV というのは、プラズマ中の電子温度と同じオーダーである。

もう 1 つは、ダブルプラズマ法とグリッド法を用いた基板前面電子温度と入射イオンエネルギーの独立制御である。変形マグネトロン型電極を軸方向に 2 つならべ、その間をセパレーショングリッドで分割する。それぞれをイオンビーム源、活性種源とし、活性種源側変形マグネトロン型電極には同軸上にグリッドを挿入する。基板は活性種源側に置き、第 4 章で述べたのと同様の方法で基板前面の電子温度を制御する。基板入射イオンエネルギーは、イオンビーム源側電極の壁電極に直流電位 V_B を印加することによって、イオンビーム源側の空間電位を制御し、2 つのプラズマの空間電位差を利用することによって行った。その結果、電子温度 T_e を 0.7 ~ 2.2 eV まで制御することができ、それと独立にイオンビームエネルギーを 0 ~ 20 eV まで制御することができた。

第6章 電子温度制御技術を用いたダイヤモンド成膜に関する実験結果について

本章では、第 4 章で述べた電子温度制御技術を用い、それをダイヤモンド成膜に適用した実験結果について述べている。プラズマ生成に変形マグネトロン型電極を用い、ガスは水素希釈したメタンガスを用いた。グリッド法を用い基板前面の電子温度を制御している。基板は Ni 基板を用い、成膜中は常に 700 °C に加熱されている。基板にはひっかけ処理などの前処理はおこなっておらず、浮遊電位に保たれている。

基板前面の電子温度 T_e を 0.5 ~ 2.5 eV まで変化させたところ、基板上に堆積した試料の膜質をグラファイトからダイヤモンドにまで制御することができた。また、低電子温度下で高品質のダイヤモンドを生成することに成功した。この理由として、基板前面においてダイヤモンド生成に有効な活性種 CH_3 ラジカル密度が増え、反応性の高い CH_2 密度が減少したためと考察している。

第7章 結論

本章では、本研究で得られた成果を要約し、結論としている。本研究で得られた結果を総括すると、以下のようになる。

- 変形マグネトロン型プラズマに補助電極を導入した結果、直径 30 cm にわたり凹型の分布から均一な分布、凸型の分布まで自在に制御することができた。
- グリッドのスリット面積を変化させることにより、基板前面の電子温度を 0.5 ~ 2.5 eV まで制御すること

に成功した。これは、希ガスにとどまらず反応性ガスにも適用可能である。また、電子温度制御下において直径 30 cm 以上の均一面をつくることに成功した。

- 変形マグネトロン型電極の磁場を最適化した結果、高密度プラズマ中において電子温度程度のエネルギー幅のイオンビームを生成することに成功した。
- グリッド法とダブルプラズマ法を用いた結果、基板前面の電子温度と基板に入射するイオンエネルギーを独立に制御することができた。
- 電子温度制御技術をダイヤモンド成膜に適用した結果、基板前面の電子温度を変化させることにより、膜質をグラファイトからダイヤモンドにまで変えることができた。また、電子温度を低温化した結果、高品質のダイヤモンドを作成することに成功した。

論文審査結果の要旨

材料・デバイスの各種プロセスにプラズマプロセスが欠かせないものとなっている。変形マグネトロンプラズマ装置は次世代のプラズマプロセス用に提案され、その有用性が期待されている。本論文は変形マグネトロンプラズマにおけるプラズマパラメータ、特に密度の均一性と電子およびイオンのエネルギー制御に関する基礎的研究に加え、水素希釈のメタンの低圧プラズマ中でのダイヤモンド成長への応用をまとめたもので、全編7章から成る。

第1章は序論である。

第2章では、変形マグネトロンプラズマ発生装置の基本構成および特色を詳述するとともに、使用する測定方法、基板の処理、および真空装置について述べている。

第3章はプラズマ密度分布の制御に関するもので、小電極による補助放電によって各種の密度分布を制御し、大面積均一プロセスに必要なプラズマ密度分布の実現に極めて有用な成果を得ている。

第4章では、格子による電子温度制御について述べている。プラズマ生成領域を隔離する格子の間隙変化によって電子温度を変えることに成功し、プローブ測定と分光測定の結果の詳細な比較を行い、極めて良好な一致を見ている。

第5章では、まず変形マグネトロンプラズマに必要な磁界によってプラズマ空間電位およびその変動幅を変化させて、基板に流入するイオンのエネルギーとその広がりを制御している。また、ダブルプラズマ法によるイオンエネルギー制御にも成功している。これらの結果はプラズマプロセスにおけるイオンエネルギー制御に新たな知見を与えるものである。

第6章では、第4章の電子温度制御の手法を水素希釈の低圧メタンプラズマに適用し、通常ではグラファイト生成しか見られない低圧条件下でも、電子温度を低下させることによって基板上に大きさ数十ミクロンのダイヤモンド粒を成長させることに成功している。しかも、通常の人工ダイヤモンドと比較して、その品質が格段に高いことをラマン分光スペクトルによって確認している。この結果は、プラズマプロセスにおける電子温度制御の重要性を検証することに加え、高品質ダイヤモンドの生成技術に新しい視点を与えており、多くの注目を集めている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、変形マグネトロンプラズマ装置を用いて、プラズマパラメータ制御に新しい知見を提供するとともに、それを応用して高品質ダイヤモンドの生成に成功しており、電気・電子工学、材料工学の進展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。