学位論文題名

Modeling of Carbon Tetrafluoride (CF_4) RF Plasma
- Steady State and Transient Response -(四フッ化炭素 (CF_4) RF プラズマのモデリング - 定常状態と過度応答 -)

学位論文内容の要旨

近年、プラズマプロセスは半導体集積回路プロセスにおける薄膜堆積やエッチングだけではなく、コンデンサなどの回路素子、多層配線ならびにコンタクトの形成にも広く応用され、電子デバイス製造の基礎技術として定着しつつある。その中で、特に低圧非平衡高周波プラズマを用いたCVD(化学気相堆積)やエッチング技術は、半導体デバイスの高性能化、高速化、高集積化のために重要な技術であり、今後ますますその広がりを増していくと考えられる。

RF非平衡プラズマは、電子、イオン、中性化学活性種(ラジカル)から構成されており、電子-気体分子間の衝突や、電子、イオンの電界下でのドリフトなど様々な現象が複雑に起こっている。このとき、電子温度(電子エネルギー)は数万度から数十万度とイオンや気体分子の温度に比べて極めて高い非平衡状態にある。従って、本プラズマは高エネルギー電子が必要な化学反応を低温で起こすことができる場所に利点があり、本プラズマの特性を理解し、制御することは上記応用にとって重要である。

しかしながら、非平衡プラズマのプロセスへの応用に際しては、今なお克服すべき課題が多々ある。例えば、トレンチ内壁に蓄積した電荷の影響でイオンの軌道が曲げられ、エッチング速度が低下する、あるいは、電子温度が高い定常状態では多様な解離反応が進みすぎて必要な解離種を得るための選択性が低下する、などの問題も起きている。これらの問題を解決するためには、従来、プラズマをパルス変調する方式が提案されている。これは入力電力をパルスのように変調することで電極付近の電子エネルギーや電荷蓄積を抑制できる方法として期待されている。しかし、問題解決の決め手となる具体的な制御法や荷電粒子の挙動に関しては十分に理解されていない。従って、プラズマ制御パラメータの一つである外部印加電圧を変化させて、その時のプラズマ過渡応答や応答時間特性を的確に把握することが重要である。

本論文では、計算機シミュレーションの見地から、電源電圧振幅をステップ的に変化した際のプラズマ中の電子、イオン及びラジカル分布の過渡応答特性を検討して、実験では計測が困難なプラズマ諸量の過渡的挙動を理解することを目的としている。本研究では、 CF_4 ガス中のラジオ周波数(RF)非平衡プラズマの解析を行なった。 CF_4 ガスは半導体のエッチングやフルオロカーボン膜製造にもっとも頻繁に使われている。1次元及び2次元の流体モデルを開発し、周期的定常状態における本シミュレーションの妥当性や有効性を確かめた上で、プラズマを構成する様々な粒子の過渡応答について検討した。

本論文は6章からなり、以下のように構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的、構成について述べている。

第2章では、放電プラズマ中電子群の挙動記述の基礎となるボルツマン方程式について詳述し、実際の数値計算に用いるための展開式の導出を行っている。また、本研究で考慮した電子衝突過程や化学反応を記述する流体方程式を導出し、数値解析技法や境界条件についても述べた。

第3章では、1次元の流体モデルを用いてシミュレーションを行ない、一般的なプラズマの構造について検討した。空間電荷電界がゼロとなり電氣的に中性になるプラズマバルク領域と、正イオンが圧倒的に多く存在して高い空間電荷電界が形成されるプラズマシースの構造ができることが確かめられた。また、電氣的負性ガスの特性であるプリシース(シース-バルク境界)でのダブルレイヤ形成過程も検討した。

入力電力を増加させるとイオンの電極間密度分布に中心部で単一ピーク構造をとっていたものがプリシースに1個つつピークを持つ構造に変わった。これは電源電圧が高くなると電子衝突が激しくなり、ほとんどの電子がシース領域でエネルギーを失って相対的にエネルギーの低い電子がバルクに集まるために生じたと説明できる。しかし、プリシースでは高い電子衝突電離で正イオンが多く発生してプリシースでの二ピーク構造に変わることが新たにわかった。

次に、電源電圧のステップ変化に伴う過渡応答について解析した。ステップ変化に伴う過渡応答は、2段階に分けられることがわかった。第一段階は電子の衝突とドリフトによって $1\mu\text{s}$ オーダーで緩和するプロセス、第二段階はより遅い化学反応やイオン拡散によって $100\mu\text{s}$ オーダーで緩和するプロセスである。

続いて、電源電圧をステップ変化させる位相に依存して生じる応答を解析した。電源電圧ステップ変化に及ぼす位相の影響は、第一段階の緩和に大きく現われる。電源電圧がゼロ位相でないときに電圧振幅がステップ変化する、ブロッキングコンデンサの放電により電極間に加わる電圧の極性が反転する。この結果、荷電粒子がバルクの中央部に瞬間的に集中する。一方、電源電圧がゼロ位相で振幅がステップ変化した場合には、このような極性の反転は起こらない。第二段階は時間スケールの長い緩和過程であるため、ステップ変化時の位相には依存しない結果となった。

第4章では、電極半径方向の粒子の動きも考慮した2次元流体モデルと1次元流体モデルの比較を行なった。外部回路や放電条件は1次元モデルと同じもとで解析し、結果を比較した。また、実験結果とも比較を行ない、本シミュレーションモデルの妥当性を検討した。2次元モデルで特に考慮した点は、実際にはプラズマの安定化や外乱抑制のためチェンバ壁を接地しているため、放電空間は電氣的に非対称な構造にしたことである。その結果、電極間中央部に対して対称なプラズマが分布する1次元モデルとは異なって、駆動電極側に粒子密度分布のピークが寄り、そのため、駆動電極側の空間電荷電位が負となる直流自己バイアスが生まれる。このような非対称構造を近似する方法を提案し、それまでより速く計算できる1次元モデルを開発した。この結果、電源電圧増加と共に電極間に流れる電流が増加した。また、両電極の面積比が大きくなるほど接地電極側より駆動電極側の電界が相対的に大きくなり自己バイアス電圧が増加することが分かった。

第5章では、2次元モデルと1次元モデルにおける過渡応答を比較した。その結果、対称軸付近では両モデルによる結果はよく一致するが、2次元モデルの電極端付近の解析結果は径方向の電界が非常に高くなり、対称軸付近よりも緩和時間も早くなることがわかった。2次元モデルからプラズマの均一性を調べた結果、入力電力が増加すると接地電極側のプラズマの均一性は向上するが駆動電極側ではプラズマの均一性が大きく損なわれることがわかった。これらは大口径ウェハーのプロセスにとって重要な関心事になっている。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果を総括している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 酒 井 洋 輔
副 査 教 授 雨 宮 好 仁
副 査 教 授 本 間 利 久
副 査 助 教 授 菅 原 広 剛

学 位 論 文 題 名

Modeling of Carbon Tetrafluoride (CF₄) RF Plasma – Steady State and Transient Response –

(四フッ化炭素 (CF₄) RF プラズマのモデリング – 定常状態と過度応答 –)

非平衡プラズマは、近年半導体集積デバイスの堆積、エッチング、表面洗浄、リソグラフィ用光源を始めとし精密機器材料の表面処理やコーティング等、材料表面プロセス技術に欠かせないものとなっている。本プラズマは、電子、イオン、中性活性種(ラジカル)と中性種から構成され、電子温度(電子エネルギー)は数万度から数十万度となりイオンや中性粒子温度(ほぼ室温)に比べて極めて高いことが特徴であり、この高エネルギー電子が低温においても化学反応に必要な活性種を生成する。デバイスの微細化に伴い、プラズマと基板界面での化学反応の制御、基板表面への電荷蓄積の軽減、活性種の効率的生成、等に対する要請が一層強くなっている。現在、これらの要求に対処する方法として、プラズマをパルス変調する方式が提案されている。

本論文では、パルス変調時のプラズマの詳細を理解し制御手段を見出すため、電源電圧振幅をステップ的に変化させた際のプラズマ中の電子、イオン及びラジカル分布の過渡応答特性を計算機シミュレーションした。具体的には、半導体のエッチングや絶縁膜堆積に使用されているCF₄ガス中のラジオ周波数(RF)非平衡プラズマの解析を一次元及び二次元流体モデルの下で行い、これまで困難とされてきた数値解析上の問題を克服し、プラズマ過渡応答について得られた新知見を纏めたものである。

本論文は6章からなり、以下のように構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的、構成について述べている。

第2章では、放電プラズマ中電子群の運動を記述するボルツマン方程式について詳述し、次に本研究で考慮した電子過程や化学反応を記述する流体方程式、数値解析技法、ならびに境界条件について述べている。

第3章では、一次元流体モデルのもとでプラズマの構造について検討し、空間電荷電界がゼロとなるバルク領域と過剰な正イオンが作る空間電荷から形成されるプラズマシースの構造ができることを確かめた。また、電気的負性ガスの特徴であるプリシース(シースーバルク境界)での二重層形成過程について検討した。

電源電圧のステップ変化に伴う過渡応答については、電子の衝突とドリフトによって1 μ sオーダーで緩和する過程と励起種反応やイオン拡散に支配される100 μ sオーダーの緩和過程の2段階からなり、電源電圧のステップ変化時の位相依存性は、第一段階の緩和過程に大きく現われることを示した。すなわち、ゼロ位相外で電圧振幅がス

テップ変化すると、ブロッキングコンデンサに蓄積した電荷の放電により電極間に加わる電圧の極性が反転し、この結果、荷電粒子がバルクの中央部に瞬間的に集中する現象を見出した。

第4章では、二次元流体モデルを提案し、一次元流体モデルの結果ならびに実験結果と比較し、本モデルの妥当性を示した。二次元モデルでは、プラズマ容器壁の接地による接地側電極面積が等価的に大きくなる非対称構造を考慮した結果、電極間で空間的に対称な分布になる一次元モデルとは異なって、電子・イオン密度分布のピークが電源電極側に移動し、電源電極側が負となる直流自己バイアスが生じることを明らかにした。

第5章では、二次元モデルと一次元モデルにおける電源電圧ステップ変化後の過渡応答を比較した。その結果、プラズマ中心軸付近では両モデルの結果はよく一致するが、二次元モデルでは電極端付近の径方向の電界が非常に高くなり、中心軸付近よりも速やかに緩和することを示した。プラズマの均一性は、入力電力が増加すると接地電極側のプラズマの均一性は向上するが駆動電極側ではプラズマの均一性が大きく損なわれる結果を得た。これらの性質は大口径ウェハーのプロセスにとって重要な関心事になっている。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果を総括するとともに将来への展望が述べられている。

以上のように、本論文はプラズマによる半導体集積デバイス微細プロセスに重要なパルス変調 CF_4 RF プラズマの過渡応答特性を電算機シミュレーションにより定量的に検討し、種々の新知見を与えたものであり、非平衡プラズマ工学および半導体プロセス工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。