

博士（工 学） 楊

靖

学 位 論 文 題 名

Ar, SiH₄ ガス RF 非平衡プラズマの過渡応答解析

学位論文内容の要旨

近年、プラズマプロセスは、半導体などの機能性薄膜の作製だけではなく、コンデンサなどの回路素子、多層配線、コンタクト形成などの技術にも広く応用されている。今日、プラズマプロセスは電子デバイスの作製に欠かせない基礎技術として定着しつつある。この中、特に低圧グロー放電で作られる RF 非平衡プラズマを用いるプラズマ CVD やプラズマエッティング技術は、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と重要性を増していくと考えられる。しかし、この技術を一層発展させるためにはいくつかの課題を解決しなくてはならない。その課題とは：

1. プラズマ中で各種の反応、たとえば、電子とガス原子・分子の衝突、ラジカルと他の粒子の衝突、イオン・ラジカルと固体表面の衝突などが同時に進行するため、表面の加工に問題を生ずる。
2. 外部から与えることができる制御パラメータに対して、プラズマ内部のパラメータの数がはるかに多いため、外部制御パラメータの 1 つのセットに対して、複数のプラズマ内部状態が対応する場合が生じ、反応の選択性、再現性と安定性が損なわれる。
3. 基板に入射するイオンエネルギーと速度ベクトルを精確に目的に応じて制御し、優れた異方性と選択性をもつエッティングプラズマが要求される。

これらの問題を解決するためには、プラズマそのものを十分に良く理解した上で、制御しなければならない。その一つに、外部回路の制御によるプラズマの過渡応答時間特性を精確に把握することが要求される。

本論文の目的は、外部回路制御パラメータの一つである電源電圧振幅 V_{rf} のステップ変化から得られたプラズマ中の電子、イオンおよび中性粒子の密度やエネルギーの過渡応答時間特性をを明らかにすることである。本論文は全 6 章からなり、各章の内容を以下に要約する。

第 1 章は、本論文の序論であり、本研究の背景、在来の研究、本研究の目的及び本論文の構成について述べている。

第 2 章は、本研究で用いたシミュレーション方法を説明すると共に、境界条件の与え方を新に提案する。

第 3 章では、Ar プラズマステップ応答時間特性を解析する。電源電圧振幅をステップ変化させる際に、電極直前で、短時間領域における電子数密度の過渡応答は“オーバーシュート”と“アンダーシュート”現象が現われる。ステップ減少する際に、長時間領域における荷電粒子の過渡応答は、シース領域で約 100RF 周期 (7~10 μs) 荷電粒子密度が増加し、その後、約 1300RF 周期 (100 μs) を経て密度は減少する。また、この際、平均電子エネルギーは三種の特性応答時間を持ち、 τ_1 (約 230RF 周期、17 μs) はステップ変化幅と関係なく、イオンの平均ドリフト時間である。 τ_2 はステップ変化幅に依存し、イオン拡散時間で、500RF (37 μs) 周期以上になる。 τ_3 はステップ変化幅に依存し、中性粒子の過渡応答時間である。また、Ar プラズマが一つの定常状

態から次の定常状態までの過渡応答は 0.5ms 以上が必要である。ステップ変化する際に、荷電粒子数密度の過渡応答に過渡振動が起き、イオン移動度と電子拡散係数は荷電粒子数密度の過渡振動周期に影響を与える。

第 4 章では、 SiH_4 プラズマのステップ過渡応答について述べる。 SiH_4 プラズマの定常状態では、正イオンシース幅はバルクの負イオン密度によって決定され、負イオン密度の増加に伴いシース幅は増加する。 V_{rf} をステップ減少する際に、 SiH_4 プラズマは三つの過渡応答可能性がある。①ステップ変化幅 ΔV_{rf} は小さい場合に、荷電粒子密度が指数的に変化し、次の定常状態に達する過渡時間は約 5000RF 周期 (370 μs) が必要とする。②減少幅の ΔV_{rf} は大きく、 V_{rf} を 200V 以下に下げるとき、放電空間内にプラズマを維持することができなくなる（本研究で設定した放電回路における条件）。③ V_{rf} を 350V 前後にステップ減少させる際に、プラズマは約 3500RF 周期 (260 μs) のタイムスケールで周期振動する。この振動は負イオンの存在により生じることである。負イオン拡散係数が大きくなると振動周期は短く、負イオンの移動度が大きくなると振動周期は長くなる。

第 5 章では、 Ar 、 SiH_4 プラズマのパルス応答について検討する。 Ar プラズマにおいては、パルス周期同じく、デューティ比は 1/1 より小さい場合では、シース領域の電子とイオン密度が平均的に減少し、デューティ比は 1/1 より大きい場合では、密度が増加する。同じデューティ比、パルス周期は長い場合では、電子とイオン密度が高くなる。 SiH_4 プラズマにおいて、パルス周期は 2000RF 周期 (150 μs) 以上になると、荷電粒子密度の最大値はパルス周期に強く依存しなく、デューティ比に強く依存する。デューティ比が大きい場合では、正・負イオン密度が増加すし、正イオン電極に到着する時間は長くなり、しかし、負イオンは、デューティ比が小さくなると電極に到着時間は長くなり、正・負イオンは電極に到着位相が反対である。また、平均電子エネルギーはパルスの変化に応答する時間は極めて短く、平均電子エネルギーの最大値はデューティ比に依存しなく（パルス周期は数 RF 周期より長い場合）、電子密度とイオン密度は同じ時間スケールでパルス応答する。いずれの場合にラジカル SiH_3 はパルス変調より電極に到着する量が増加する。

以上の Ar 、 SiH_4 プラズマの過渡応答時間特性を本研究により明らかにした。

第 6 章は、本研究の結論であり、本研究で得られた結果をまとめて示し、今後の研究課題について述べる。

学位論文審査の要旨

主査教授 酒井洋輔

副査教授 長谷川英機

副査教授 本間利久

副査教授 榎戸武揚

学位論文題名

Ar, SiH₄ガス RF 非平衡プラズマの過渡応答解析

近年、弱電離非平衡プラズマは機能性薄膜のプロセスのみならず、半導体デバイスの高速化、高集積化に伴い高度なPVD(Plasma Vapor Deposition)やエッチング技術にますます重要性を増している。しかし、現実には、プラズマ中では電子とガス原子・分子間の衝突、ラジカルの生成、それと他粒子の衝突反応、イオンやラジカルの固体表面への衝突などは同時に進行するため、基板上に流入する粒子の制御が容易ではない。さらには、基板表面の電荷蓄積、プラズマ中のダスト発生等のことが問題となっている。この問題に対処するため、現在RFプラズマをパルス制御する方法が提案されている。しかし、その際のプラズマの応答特性には明らかにされていない点が多い。

本論文は、ArとSiH₄ガスプラズマを駆動するRF(13.56MHz)電圧をパルス変調した際に得られる電子、イオンおよび中性粒子の密度、電子エネルギー、シース電界の過渡応答特性を流体モデルを用いて解析したものである。

Arガスプラズマにおいて、電源電圧をステップ的に減少すると、電子・イオン密度はバルク中では単調に減少するが、シース領域では約100RF周期(7~10μs)間は増加し、その後減少し約1300RF周期(100μs)で定常値に達する。この特性はイオンのドリフト速度と両極性拡散係数に依存することが明らかにされた。また、平均電子エネルギーの過渡変化には三種類の特性時間、すなわち τ_1 (イオンのシース移動時間; 約17μs)、 τ_2 (荷電粒子密度空間分布の再調整時間; 約37μs)、 τ_3 (励起粒子の拡散時間)が対応し、定常状態を得るまでに必要な時間は0.5ms以上であることを明らかにした。

電気的負性ガスであるSiH₄定常プラズマのシース幅はバルクの負イオン密度により決定される。電源電圧550Vをステップ的に変化した場合、①電圧のステップ変化値 ΔV_{rf} の小さい場合、プラズマ密度は時間とともに指数的に変化し、その過渡時間は約500RF周期(370μs)、② $\Delta V_{rf} < -200V$ になるとプラズマを維持できなくなる、③ ΔV_{rf} を-350V前後にした場合プラズマは約3500RFの周期(260μs)で振動する、ことを明らかにした。特に、③振動の生じる現象は本研究で発見したものである。その原因を詳細に検討するとともに、振動は負イオンの存在(その拡散係数と移動度)によって生じることを示し、本現象が基板表面に与える効果を検討した。

さらには、パルス変調されたArとSiH₄ガスRFプラズマの応答について検討し、プラズマの特性とパルスの周期とデューティとの間の関係を広く検討した。

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技

術であるパルス変調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。