

論文の内容の要旨

論文題目 反応性プラズマエッチング技術の微細加工への応用に関する研究

氏名 藤原伸夫

半導体集積回路の目覚ましい発展において、微細加工技術の進歩によるところが大きい。特にプラズマを用いた反応性エッチング技術の高精度化は微細化を飛躍的に推進した。なかでもトランジスタのゲート電極の形成においては高精度な微細パターンを形成するために反応性プラズマエッチング技術は低圧力・低エネルギー化の技術変遷を繰り返してきた。最も低圧力領域にて反応性プラズマ生成が行なえるのが電子サイクロトロン共鳴(ECR : Electron Cyclotron Resonance)を用いたプラズマ生成法である。本論文はECRプラズマを用いて微細加工を実現するために、プラズマ特性とエッチング特性の比較検討を行なった結果をまとめたものである。

ECRプラズマでは低圧力動作が可能のため、プラズマ中における化学的に活性な中性ラジカル密度が低く、高精度な加工を阻害する要因であるパターン側壁保護膜の形成を最小限に留めることが可能である。しかも低圧力条件下ではエッチングに必要な反応性イオンが中性ガスにより散乱されることも少ないため、強いイオン加速を行なわなくても基板に対しての垂直入射性が維持できる。このことは低エネルギーイ

オンにより方向性のあるエッチングの可能性を示唆し、極薄いゲート絶縁膜上での高精度ゲート電極加工に適用する価値のあるものである。

しかし、実際に低圧力動作させたECRプラズマによりゲート電極であるpoly-Siをエッチングした結果は異方性が不十分な結果であった。加工形状には斜入射イオンの存在を示す特徴が観察され、要因として、エッチング基板に対する垂直入射を損なう方向のイオンの運動がプラズマ中で存在していると考えた。そこでプラズマの安定性に着目し、プラズマ生成磁場と基板入射位置におけるイオンのエネルギー分布の関係を検討した。この結果、プラズマを安定に閉じ込めることが可能な極小磁場条件を広げた磁場中で生成したECRプラズマにおいてはイオンエネルギー分布が狭くなる、すなわちイオン温度が低温化したと見なせることが判明した。極小磁場が得られる領域を広げるために永久磁石による多極カusp磁場を従来のソレノイドコイルによる磁場と複合させ、生成したプラズマとエッチング形状との対応を比較検討した結果、複合磁場では低イオン温度プラズマが得られ、この条件下ではエッチング異方性が高まることが確認できた。

プラズマの安定性を阻害している要因をプラズマ密度の不均一性に起因したプラズマのドリフトと考え、ドリフトと電子との速度差を小さくするために軽質量イオンを生じるガス系を検討した。塩素プラズマにHeを加えた場合、塩素イオンのエネルギー分布は狭くなり、同時にエッチング異方性も向上することが確認された。さらに軽質量の水素イオンを含ませるためにハロゲン化水素によるエッチングを検討したところ、ハロゲンイオンのエネルギー分布が狭くなり同時にエッチング異方性も向上した。

微細加工に適した安定なプラズマを生成するための恒久的な対策として、これまでの検討から均一なプラズマ密度分布とすることが最も重要であり、このためにはプラズマの生成と輸送を均一にすることが必要であると言える。そこで、ECRプラズマ生成においてマイクロ波電力の吸収と磁場分布の関係を考察し、均一かつ高密度のプラズマ生成のためには、共鳴磁場位置におけるマイクロ波進行方向の磁場勾配がプラズマ生成領域全体で均一かつ低勾配である必要性を見出した。この検討に基づき磁場の最適化を実施し、エッチング特性実験を行なった結果、均一かつ低勾配の磁場により、エッチング速度は均一かつ高速となった。さらにプラズマ密度が均一化しているため、この効果によりプラズマの不安定性も軽減されていることがエッチング異方性の向上により確認でき、ECRプラズマによる高異方性エッチング技術が確立された。

低圧力・低イオンエネルギー条件において異方性エッチングが可能となったECRプラズマエッチングをpoly-Siゲート電極加工に適用した結果、加工形状に特異なサイドエッチ(ノッチ)が発生することを発見した。このノッチはパターンサイズやパターンレイアウトに強く依存する特徴を有し、微細パターンにおいてプラズマから供給された電子とイオンが分離して帯電(チャージアップ)していることが原因とするモデルを提案した。このモデルに基づき、低電子温度化がノッチ抑制に有効であることを実験により実証した。さらに実用性の高い高エッチング速度条件でのノッチ抑制の試みとして高周波バイアスとプラズマのパルス変調の検討を行なった。

高周波バイアス印加においてノッチは抑制可能ではあるものの、下地ゲートSiO₂膜との選択性の評価などによりチャージアップは依然として残留することが判明した。一方、プラズマ生成のマイクロ波電力をON/OFFパルス変調を行った場合にはOFF時間を長くすることでノッチが抑制されることが明らかとなった。さらにマイクロ波電力制御の方法を検討した結果、チャージアップの緩和はOFF時間中のプラズマによるチャージアップ電荷の中和に加えて、ON時間初期の高電子温度プラズマから供給される電子によるものであることを明らかにした。

チャージアップはノッチを引き起こすだけでなく、電気的なダメージを被加工表面のデバイスに与える。MNOSキャパシタを用いた電気的評価により、微細パターンにおけるチャージアップ量は広いパターンに比較して大きいことが判明した。ノッチの抑制と同様にパルス変調したプラズマにより同様の電気特性評価を行なった結果、チャージアップは大きく抑制されることを実証した。

半導体集積回路のゲートエッチング工程への実用上の課題として異方性加工、高選択性と同時にRIE-Lag効果(エッチング速度のパターンアスペクト比依存性)の抑制という課題がある。代表的な材料であるWSi₂、poly-Si、単結晶SiのRIE-Lag効果を比較評価した結果、WSi₂と単結晶Siにおいて顕著なRIE-Lag効果が観察された。要因として考えられる中性反応種の供給律速、マスク材料のスパッタ再堆積、反応生成物の表面脱離などを検討した結果、WSi₂のRIE-Lag効果に最も影響するのは反応生成物の脱離であると結論された。高密度・高エネルギーのイオン照射がある場合には反応に寄与する中性粒子の吸着が阻害され、低次の塩化物が反応生成物となるので、揮発性が低い反応生成物が表面を覆っているためと考えられる。同様の検討を単結晶Siに対して行なった結果では、中性反応種の供給律速がRIE-Lag効

果の主要因となっていた。特に発散磁場型のECRプラズマを用いた場合、プラズマを被加工基板方向に加速するような空間電位分布中で輸送されるイオンは中性ガス分子と電荷交換衝突を起こす結果、方向性のある中性粒子束となり基板に入射するためRIE-Lag効果を抑制することが可能であることを示した。

WSi₂のRIE-Lag効果抑制のためにパルス変調したプラズマの適用を試みた。プラズマOFF時間中のイオン照射の少ない状態で中性粒子を被加工面に吸着させた後、ON時間中のイオン照射により異方性に反応を進めることが繰り返される効果を狙ったものである。実験結果においてRIE-Lag効果の抑制が確認され、さらに反応生成物も揮発性の高い高次の塩化物の割合が増加していることが示されたことから、OFF時間中の中性粒子束/イオン束が大きくなったためと結論した。

以上に述べた研究結果により低圧力・低エネルギー条件によるECRプラズマエッチングの微細加工性能の向上が図られ、また半導体集積回路製造におけるゲート電極加工への応用上の課題に対しての対策の方針を示すことができた。