

報告番号	甲 第 13609 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 容量結合型プラズマ中における高アスペクト比ホール底部のチャージアップ挙動に関する研究
(Study on the charge-up behavior at the bottom of high-aspect ratio holes in a capacitively coupled plasma)

氏 名 森山 誠

論 文 内 容 の 要 旨

近年の半導体デバイス、特にメモリの需要がますます拡大しており、ホールパターンエッチングの高アスペクト比(HAR)化が要求される。高精度なエッチング性を実現するとともにエッチング速度を向上させるために、超高周波(VHF)電力と低周波(LF)電力を組み合わせた二周波重畳容量結合型プラズマが使用されている。実際のエッチングプロセスにおいては、構築されるホールパターン内部への正イオン入射によるチャージアップに起因されるエッチング速度の低下や形状異常について多くの報告例がある。現在では、このチャージアップの抑制のためにプラズマ源を kHz オーダーでパルス運転がなされている。しかし、ホール内の荷電粒子の挙動やホールに蓄積されるチャージ量については理解が十分でない。ホール内のチャージ量の指標としては鉛ガラス製のキャピラリープレート(CP)で模擬されたホールパターン底部における電圧を測定するという手法が提案されているが、電荷蓄積の過程や絶対量、及びパルス運転中の時間変化については未だに解明されていない。

本研究では、ホールパターンを模した CP 底部での面電荷密度を評価するため、新たにパルス駆動容量結合型プラズマ源及び計測系を新たに立ち上げた。この装置は近年のホールエッチングプロセスで用いられる超高周波(VHF: 40 MHz)と低周波(LF: 2 MHz)を組み合わせたものである。CP 底部の電荷密度評価は CP 底部の高精度電圧測定と等価回路及び静電モデルを組み合わせて評価した。

第 1 章では本研究の背景及び目的について述べる。上述の通り近年の半導体デバイス、特

に半導体メモリの需要が高まっており、この半導体デバイスの製造には多種多様なプロセスを行う必要がある。プロセスの多くにプラズマを用いたプロセスが含まれる。その一つにエッチングあり、これは半導体メモリの土台となる Si などの基板や SiO₂ などの絶縁膜を微細に加工するプロセスである。特に近年のメモリの主流となっている三次元構造の NAND-FLASH メモリの製造に求められるのは 100 にも及ぶ超高アスペクト比のホールエッチングである。このホールエッチングにおいてはチャージアップによるエッチング速度の低下や形状異常の問題が生じる。そのため、プロセスに用いるプラズマ源やプロセスガスの適切な選択を行う必要がある。また、選択されたレシピに従いプロセスを行う際に、どの程度電荷が蓄積しているかという定量的評価が必須となるが、これまでホールパターン内部における電荷密度の絶対値評価は成されておらず、また、その手法は確立されていない。そのため、CP で模擬したプロセスのホールパターンにおいて、ホール底部の面電荷密度の評価方法を確立し、その手法を用いてチャージアップ機構を解析することを本研究の目的とした。

第 2 章では、本研究のために立ち上げた、エッチングプロセスで使用される装置を模したパルス制御可能な二周波重畳容量結合プラズマ源の概要を示すとともに、その装置で生成されたプラズマの基本特性について述べる。まず設計指針を得るため有限要素法に基づいた簡易的なプラズマ生成シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、容量結合型プラズマ源において、電力を印加する RF 電極の側面に RF シールドを設置し、電極と側壁の間の空間を抑制することがプラズマの閉じ込めに有効であることがわかった。この設計指針に基づいて製作された装置は直径 11 cm、電極間距離が 3 cm の狭ギャップ容量結合型プラズマ源である。このプラズマ源は実プロセスで用いられるプラズマ源を模しており、超高周波(40 MHz)電力と低周波(2 MHz)電力を重畳できる仕様となっている。本装置で生成されるプラズマの基本特性として RF 電極の電圧、プラズマ密度、電子温度及びプラズマ電位を評価した。RF 電極の電圧は高電圧プローブを用いて測定した。プラズマ密度、電子温度及びプラズマ電位はラングミュアプローブ法で評価した。また表面波プローブを用いて、パルスプラズマにおけるプラズマ密度の減衰特性を評価した。本装置において Ar ガスを用いて生成したプラズマでは $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ の高密度プラズマが得られることを示した。

第 3 章では、論文で最も重要となるキャピラリープレート(CP)底面の面電荷密度の絶対評価方法及び評価例について述べる。面電荷密度は静電気学に基づいて CP や RF 電極絶縁用のアルミナ板、シースの静電容量と各境界における平均電圧から求めることができる。本章では、まず、CP の静電容量を評価するために、高電圧プローブを用いて CP の上下の高周波電圧振幅を測定した。高周波電圧振幅から推定した CP の静電容量と CP の上下の平均電圧に基づいて面電荷密度を評価した。しかし、CP の上部に電極を設置した構造では、CP の下部に荷電粒子が流れ込むことができず、CP の下部に蓄積された電荷を評価することができない。そのため、CP 上部に電極を配置しない場合の CP 上部の電位を推定する必要がある。本研究では、CP 上部の平均電圧が CP 上部の RF 電圧振動によって発生する自己バ

イアス電圧であることに着目し、プラズマから RF 電極までの構造を複数のコンデンサからなる等価回路で表現した。これを基に、RF 電極の RF 電圧振幅から CP 上部の自己バイアス電圧を推定した。この方法で得られた CP 上部と下部の平均電圧から、静電モデルを用いて各境界の表面電荷密度を求めることに成功した。その結果、VHF 単周波電印加時における AR = 50 の CP 下部の正の面電荷密度の絶対値は、 $\sim 25 \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$ であることがわかった。

第4章では、パルスオンとパルスオフの定常状態に着目し、印加電力とホールのアスペクト比それぞれに対する面電荷密度を評価することで、パルスプラズマにおける電荷の挙動と電荷蓄積の過程を考察した。まず、VHF 単周波での面電荷密度を評価し、VHF 電力 (CP 上部の自己バイアス電圧) に対して、CP 下部で電荷蓄積がほとんど起こらない領域、正の表面電荷蓄積が起こる領域、正の表面電荷密度が減少する領域の3つの領域が存在することを示した。特に表面電荷密度が低下する領域では、CW 放電とパルス放電の比較から、パルスオン時においても負電荷が CP の底部に流れ込む可能性があることが示唆された。さらに、LF 電力を重畳して CP の上部に強い負バイアスを誘導することで、アスペクト比に関わらずホールの下部に負電荷の蓄積が起こることを示した。これは従来の考えを覆す興味深い発見である。

第5章では、まず純 Ar プラズマにおける AR = 30, 50 の CP 底部の面電荷密度の時間変化を示した。AR = 30 では CP 底部の面電荷密度が単調増加するのに対し、AR = 50 では低 VHF 電力では低面電荷密度で、電力の増加と共に急激に面電荷密度が増加するという AR 毎に異なる傾向を示した。特に、AR = 50 かつ低 VHF 電力におけるパルスオン時の面電荷密度の変化に注目すると、面電荷密度がパルスオン時に増加を続けて飽和状態にならないことが示された。これは、高い AR のため荷電粒子流入が制限され、パルスオン時における電流が極めて少ないためであると考えられる。次に、純 Ar プラズマ中の面電荷密度の時間変化から、パルスオフ時の電荷緩和とパルスオン時のチャージアップ電流を評価した。パルスオフ時には比較的早い減衰と遅い減衰がみられた。早い減衰はアフターグロープラズマからの電子流入が支配的な電荷緩和であり、遅い減衰は CP 抵抗のリーク電流が支配的な電荷緩和であると考えられる。遅い面電荷密度減衰に注目し、その時定数と等価回路から CP 抵抗値は 300 M Ω と推定された。C₄F₈/O₂ 添加プラズマでも同様の推定を行った。その結果、AR の減少に伴って CP 抵抗が減少したため、ホール側壁に堆積したフルオロカーボン膜を介したリーク電流の存在が示唆される。また、AR = 50 では CP のリーク抵抗は 300 M Ω 程度であり、高 AR ではそもそもフルオロカーボンが底部に堆積していないことを示唆している。これは実プロセスにおいて非常に重要な知見である。次に、評価したリーク抵抗から推定したリーク電流の影響を除いて、ホールを通り CP の底部に流れ込む電子の量を評価した。その結果、パルスオフ直後の約 0.2 ms の間、アフターグロープラズマからの電子電流が存在することを確認した。これは表面波プローブで評価したプラズマ密度の減衰の時間スケールと一致する。最後に、パルスオン時のホールを通過するチャージアップ電流を

評価した。電荷密度の時間変化から評価できる電流はホールを通過する荷電粒子の電流とリーク抵抗を介したリーク電流の合算値となるため、リーク電流の影響を除いてチャージアップ電流を評価した。その結果、ホールから流入する電流は数 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり、プラズマから直接流れる電流よりもはるかに小さいことがわかった。

第6章では、本論文の総括と今後の展望について述べた。本研究における最大の成果は、高アスペクト比ホールパターン底部における面電荷密度及びリーク抵抗とリーク電流及びホールからの流入電流を推定する手法を確立したことである。本研究ではホールエッチングのパターンのモデルとして鉛ガラス製のCPを用いて、CP底部における電圧測定と等価回路モデルからホール底部の面電荷密度を評価した。また、その面電荷密度の時間変化から、ホールを通過し底部に直接流入する電流とCP抵抗を通じてリークする電流の評価も行った。本手法は、等価回路モデルがホールパターンの静電容量と抵抗から構築されるため、実際の被エッチ対象物質の物性(導電率及び比誘電率)と構造の情報からリーク抵抗、リーク電量及びホールからの流入電流を推定できることを示している。本手法を実際のホールエッチングプロセスに適応した場合、どのように電位構造を制御するとホール底部のチャージアップを抑制・緩和できるかを評価することができる。