

	かんの せい いち ろう
氏 名	菅野 誠 一 郎
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 17 年 9 月 14 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) 機械電子工学専攻
学位論文題目	Si ウエハと Johnsen-Rahbek 型静電チャック間に作用する 静電気力におよぼす誘電体抵抗率と表面粗さの影響の研究
指 導 教 員	東北大学教授 加藤 康司
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 加藤 康司 東北大学教授 桑野 博喜 東北大学教授 三浦 英生 東北大学助教授 足立 幸志

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序論

静電気力を利用して対象物を固定する静電チャック(ESC)は、単純な構成で半導体ウエハ(ウエハ)を固定することができ、プラズマ処理中のウエハ温度の制御性に優れるため、プラズマエッチング装置におけるウエハステージとして必須の構成要素となっている。この ESC は誘電体膜の材質や製法、構造によりさまざまなタイプに分類できるが、誘電体膜を流れるリーク電流がウエハと誘電体膜間のギャップにチャージして吸着力が発生する Johnsen-Rahbek 型 ESC (J-R 型 ESC) は、比較的低電圧で大きな吸着圧力を安定して得ることができるためエッチング装置への適用がすすめられている。しかしながら J-R 型 ESC では、誘電体膜の抵抗率や表面状態が変わるとリーク電流が変化するため、吸着圧力と残留吸着圧力も変化するという課題がある。このことは、J-R 型 ESC をプラズマ処理装置に適用した場合に、処理枚数が増えて表面の状態が変化すると吸着圧力と残留吸着圧力が経時変化する可能性があることを意味する。経時変化しにくい ESC を設計するためには、誘電体膜の抵抗率や表面粗さを調節し、表面状態の変化に対する感度を下げなければならない。そのためには、J-R 力を定量的に予測する技術が不可欠であるが、従来は吸着圧力や残留吸着圧力を定量的には予測できておらず課題となっていた。そこで本研究では、モノポール方式の J-R 型 ESC と Si ウエハ間に作用する吸着圧力におよぼす誘電体膜の抵抗率と表面粗さの影響を実験で明らかにし、吸着圧力の定量予測技術を確立することを目的とする。

次に、直流電圧を印加する電極を 2 個備えプラズマがなくとも電気回路を形成、すなわち吸着させることができるもう一つの方式であるダイポール方式 ESC では、吸着と除電のためのプラズマ放電シーケンスが不要であり処理能力の向上が期待される。しかしながら、J-R 型ダイポール ESC ではモノポール ESC とは残留吸着力の特性が異なることがわかった。この残留吸着力はウエハ引き剥がし時の破損や位置ずれを引き起こし、生産性を著しく低下させる。そこで、本研究では残留吸着力のない J-R 型ダイポール ESC の実用化を目指し、残留吸着力の発生メカニズムを解明することも目的とする。

更に、J-R 型 ESC を適用したプラズマ処理の再現性を確保するためには、プラズマ処理中のウエハ電位と温度の管理が重要である。そこで、本研究ではプラズマ処理中のウエハ電位の計測および予測技術を開発する。また、J-R 型 ESC の応用例として、250~400℃といった広い温度範囲で動作することが要求される不揮発性材料エッチャ用の高温 ESC を開発する。また、これらの技術にもとづき開発した高温 ESC を不揮発性材料エッチング装置に適用して白金をエッチングし、その有効性を確認する。

第2章 Si ウエハと Johnsen-Rahbek 型静電チャック間に作用する吸着圧力の予測

半導体製造装置用のウエハステージとして広く適用されている ESC のうち、特に安定した吸着性能が得られる J-R 型 ESC の性能向上を目指し、吸着圧力の定量予測技術を確立した。具体的には、吸着圧力と残留吸着圧力に及ぼす誘電体抵抗率の影響を実験で明らかにした。また、誘電体膜とウエハの接触状態を図1に示すようにコンデンサと抵抗の電気素子に置き換えた等価回路で表現し、この等価回路に用いる誘電体膜のバルク抵抗、ウエハと誘電体膜の接触抵抗、ウエハと誘電体膜間のギャップ静電容量のモデルを提案した。

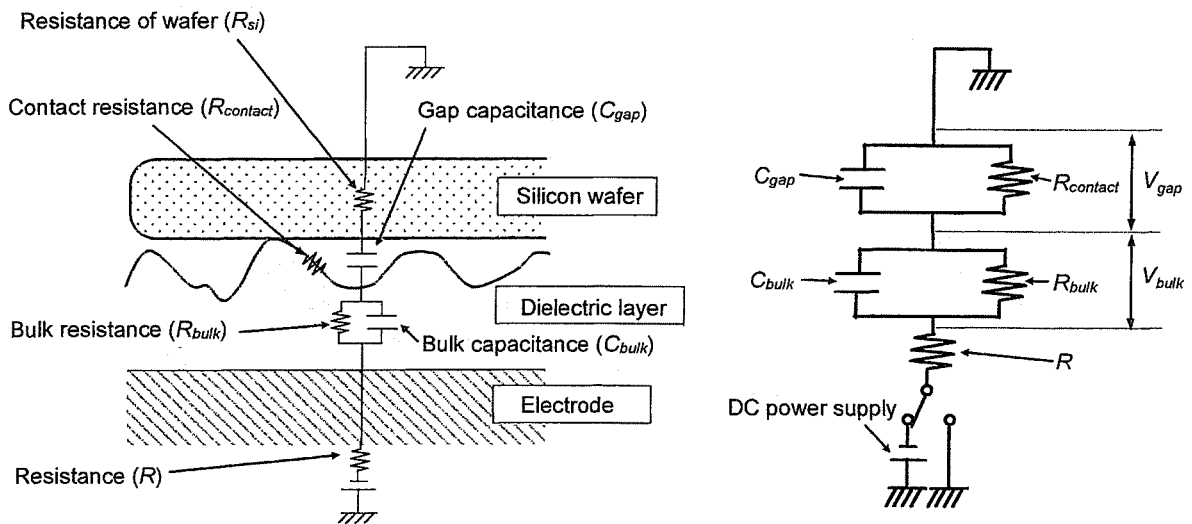


図1 誘電体膜とウエハの接触状態を表す等価回路モデル

これらのモデルを等価回路に適用し、回路シミュレーションにより吸着圧力と残留吸着圧力を求め実験と比較した。その結果、誘電体膜のバルク抵抗 R_{bulk} は、リーク電流が印加電圧 V の2乗に比例する空間電荷制限電流モデルを変形し、低電圧領域ではオーミックな抵抗特性を示す抵抗モデルで表すことができることがわかった。このバルク抵抗 R_{bulk} は次式で表せる。

$$R_{bulk} = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{V}{V_0}\right)^2}}$$

ここで、 V_0 と R_0 は定数である。

また、ウエハと誘電体膜の接触抵抗 $R_{contact}$ は、接触抵抗 $R_{contact}$ にかかる電圧 V_{gap} が低電界領域ではオーミック抵抗により支配され、強電界領域では電界放電電流により支配されるリーク電流モデルを考慮することにより表わすことができることがわかった。この接触抵抗 $R_{contact}$ は次式で表せる。

$$R_{contact} = \frac{R_1}{1 + CV_{gap} \exp\left(-\frac{D}{V_{gap}}\right)}$$

ここで、 C と D は定数である。

これらのバルク抵抗と接触抵抗を等価回路モデルに適用し、ウエハと誘電体膜間のギャップ厚みをパラメータとして計算した吸着圧力を実験結果と比較した。その結果、図2に示すようにウエハと誘電体膜間のギャップ厚

みを表面粗さ曲線から求めた突起高さの確率密度分布がピークを取る高さ位置からウエハまでの距離とすると、誘電体膜の抵抗率の異なる2種類の ESC において計算結果と実験結果が約 20%の精度で一致することを実証した。これにより、ウエハと誘電体膜間のギャップ静電容量を決定するギャップ厚みは、表面粗さ曲線から求めた突起高さの確率密度分布がピークを取る高さ位置からウエハまでの距離で近似できることがわかった。

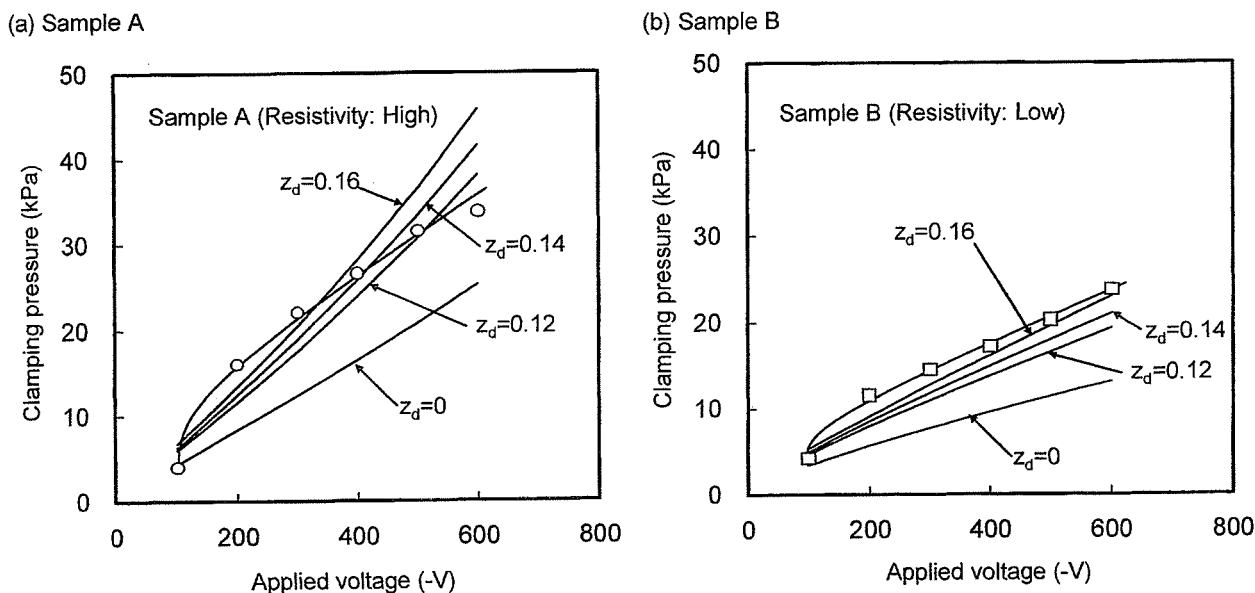


図 2 印加電圧と吸着圧力の関係の計算値と実験値の比較

第3章 Johnsen-Rahbek 型ダイポール静電チャックにおける残留吸着力の発生メカニズム

モノポール ESC に比べて処理能力と温度制御性の向上が期待できるダイポール ESC の実用化を目指し、残留吸着力のない J-R 型ダイポール ESC を実現するために、残留吸着力の発生メカニズムを明らかにした。具体的には、J-R 型ダイポール ESC の残留吸着圧力に及ぼす2個の電極面積比の影響を実験で明らかにした。また、等価回路モデルにもとづく回路シミュレーションにより2個の電極上にチャージした電荷の時間変化、吸着圧力の時間変化、ウエハ電位の時間変化を明らかにした。また、電圧印加から電圧印加停止までのウエハ表面電位を非接触の表面電位計で測定し、結果を計算結果と比較した。その結果、J-R 型ダイポール ESC では吸着圧力は2個の電極面積比の増加とともに減少し、残留吸着圧力は2個の電極面積比の増加とともに増加することがわかった。また、400V の電圧を 60 秒間印加し、電圧印加停止後に発生するウエハ電圧を非接触の表面電位計で測定した結果、2個の電極の面積比が 1.0, 1.6, 2.8 と増加するにしたがい、0V, -42V, -59V とウエハに発生する電圧の絶対値が増加することを確認した。このウエハ電圧の時間変化は、第2章で提案した等価回路モデルを応用した回路シミュレーションにより予測可能であることを明らかにした。これらの結果にもとづき、J-R 型ダイポール ESC において残留吸着力が発生する原因は、電極面積が異なると吸着中に2個の電極上にチャージする電荷量に差が発生し、この差分の電荷が緩和できずに残留することにあるとするモデルを提案した。

第4章 プラズマ処理中のウエハの電位計測

J-R 型 ESC の適用先の一例であるプラズマエッチング装置において、プラズマエッチング性能に大きな影響を与えるエッチング中のウエハ電圧の測定方法、および予測技術の確立を目指し、新開発のウエハ電圧プローブによるウエハ電圧の直接計測方法と、高周波バイアス電力の給電ラインに設置したインピーダンスモニタ(IM)

による測定結果を等価回路モデルもとづき補正するウエハ電圧の予測方法を検討した。その結果、ウエハ電圧プローブを用いることにより、処理中のウエハ V_{pp} と直流成分 V_{dc} を直接測定可能であることを実証した。また、ガス種酸素、処理圧力 1.0Pa、ソース電力 1kW(周波数 13.56MHz)の誘導結合プラズマにおいて、バイアス電力が 200W から 500W(周波数 800kHz)の条件では V_{dc} は V_{pp} に比例し、 V_{dc} / V_{pp} は約 36% で一定であることがわかった。さらに、バイアス電圧を印加する給電ラインに設置した IM で測定した電圧は、給電ラインのインダクタンス成分、ESC の誘電体膜の静電容量、ESC とアース間の浮遊容量によりウエハ電位プローブで測定されるウエハ電圧とは異なる値を示すが、IM で測定したデータを等価回路モデルにもとづき補正したところ、ウエハ電位プローブで測定した値と 3.4% 以内の精度で一致することを確認した。

これらの技術を適用しプラズマ処理中のウエハ電圧を測定、または予測しプラズマ処理条件を管理すれば、より再現性のよいプラズマ処理方法を実現することができるものと考えられる。また、等価回路モデルを用いたウエハ電圧の予測方法は、装置構造の変更にもなうウエハ電圧への影響の見積もりにも応用することができるので、装置設計にも役立てることができ、開発期間短縮の効果も期待できる。

第5章 Johnsen-Rahbek 型静電チャックの不揮発性材料用エッチング装置への応用

J-R 型 ESC の応用例として、不揮発性材料のエッチングに不可欠なヒータ内蔵の焼結セラミックス製高温 ESC (250~400℃対応)を開発した。高温 ESC ではヒートバランスを考慮した熱設計が重要であり、高温動作時の熱逃げを実験により明らかにした。また、高温 ESC の性能評価をおこない、誘電体膜抵抗率の温度依存性、高温 ESC の熱特性、吸着圧力特性、ウエハ面内の温度分布を検証した。さらに、高温 ESC をエッチング装置に組み込み、不揮発性材料である白金を常温と高温でエッチングしエッチングレートと形状を比較することにより、高温 ESC が不揮発材料のエッチングに有効であることを実証した。その結果、室温から 400℃まで 40 分以内で到達でき、バイアス電力が 600W までヒータのオン、オフ操作により $\pm 1^\circ\text{C}$ で温度調節可能な高温 ESC の開発に成功した。開発した高温 ESC で吸着中のウエハの温度分布は、 $407^\circ\text{C} \pm 9^\circ\text{C}$ と均一な温度で保持可能である。高温 ESC の誘電体膜である焼結体セラミックスの抵抗率を ρ とすると、 $\log \rho$ は絶対温度 $1/T$ に比例し、見かけの活性化エネルギーは 1eV であることを確認した。また、開発した高温電極を用いて 40°C と 300°C で白金(Pt)をエッチングし比較した結果、エッチング時間が 41%短縮し、かつエッチング形状の垂直性が増すことを確認し、高温 ESC が不揮発性材料用エッチャの ESC として適していることを実証した。

第6章 結論

本研究を総括し、2章から5章までに得られた結果と知見をまとめた。

論文審査結果の要旨

静電チャックは、超精密な寸法管理が要求されるプラズマエッチング装置用のウエハステージとして広く利用されている。ナノメートルスケールでの再現性に優れたエッチングが強く要求される近年では、それらに直接影響を与える静電チャックによる吸着力と残留吸着力の管理が極めて重要になるが、これらは静電チャックの誘電体膜の表面状態や内蔵電極の構造に依存して変化する。しかるに従来の研究では静電チャックによる吸着力と残留吸着力の発生機構に関する検討が十分なされておらず、これらの定量的予測が不可能であった。

本研究においては、吸着力と残留吸着力に及ぼす誘電体抵抗率と表面粗さの影響を明らかにし、それらの定量的予測技術を確立した。さらに、これに基づく設計により十分な吸着力を発生しかつ残留吸着力の発生しない静電チャックを開発し、その有用性を不揮発性材料エッチング装置において確認した。本論文はこれらの研究成果についてまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、Si ウエハと静電チャック間に作用する力を引っ張り試験により求め、吸着力と残留吸着力に及ぼす誘電体抵抗率の影響を明らかにしている。さらに、吸着力と残留吸着力に及ぼすSi ウエハと静電チャックの接触状態の影響を抵抗とコンデンサからなる等価回路モデルで表し、このモデルにもとづく計算により従来は予測不可能であった吸着力を約20%の精度で予測することに成功している。これは静電チャックの材料選定及び寸法設計の観点から、極めて重要な知見である。

第3章では、ダイポール方式静電チャックにおける内蔵電極の面積比が吸着力と残留吸着力に及ぼす影響を実験により明らかにするとともに、第2章で提案した等価回路モデルを応用し、ダイポール方式静電チャックでの残留吸着力の発生メカニズムを明らかにしている。これにより、残留吸着力の発生しない静電チャックの実用化に世界で初めて成功しており、極めて重要な成果である。

第4章では、プラズマエッチングを管理する上で極めて重要なプロセスパラメータであるウエハ電圧の測定と予測の方法を確立している。これは、エッチング中にウエハに入射するイオンエネルギーや静電チャックに作用する吸着力の管理を可能にするものであり再現性に優れたエッチングを実現する上で重要な成果である。

第5章では、第4章までに得られた知見に基づき不揮発性材料エッチング装置用の高温静電チャックを開発している。さらに、開発した高温静電チャックにより白金のエッチングにおいて、処理時間の短縮とエッチング形状の改善が可能であることを明らかにしている。これは、本研究の成果に基づいて設計した静電チャックの有用性を実証した非常に重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、プラズマエッチング装置用静電チャックの性能向上に必要な吸着力の定量的予測方法を確立し、これを応用することにより優れた吸着力特性を有する静電チャックを開発し、その有用性を実証したものであり、機械工学及びトライボロジーの発展に寄与するところが少なくない。

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。