

シリコンウエハ均一高速成膜のための 積層型減圧 CVD 装置内における熱・物質移動に関する研究

学位論文内容の要旨

半導体集積回路の微細化に伴い、シリコンウエハの成膜プロセスに対して、より高品位な成膜が要求されている。一方、生産性を上げるためにウエハは大口径化しつつあり、しかも加熱・冷却ならびに成膜時間の短縮が求められている。そのため、熱応力や均一成膜性の観点から、より厳しい条件のもとで従来以上の品質を確保しなければならない。

そこで本研究では、炉内の温度分布ならびにウエハの加熱・冷却特性を計測し、炉内各部の温度分布を予測するためのシミュレーターを作成した。これにより、ウエハが目標温度に到達するまでの最短温度制御条件を明らかにした。次に、CVD 装置内における成膜原料ガス流動に関して可視化実験を行い、極低圧場の気体流動を数値計算により正確に解析可能であることを明らかにした。この結果を踏まえ、CVD 炉内形状、原料ガス供給ノズル条件、ガス流量などに関して解析を行い、品質条件を満足するための CVD 装置の必要諸元を明らかにした。そして本予測条件に基づき、共同研究先で実際に成膜実験を行った結果、均一成膜性が従来に比べ格段に改善されていることが確認できた。

論文は以下の6章から構成した。

第1章は序論であり、研究の背景について述べるとともに、本研究の目的及び得られた結果の概要について論述した。

第2章では、ヒーター内の積層ウエハの過渡温度分布を調べる目的で、様々な加熱・冷却条件の下で炉内温度を測定し、所定温度に最短時間で到達するための温度制御法について考察した。その結果、ウエハ加熱・冷却時における面内温度偏差は、ウエハ積層間隔に大きく依存することを明らかにした。また、所定温度に到達させる際のリカバリ時間を短縮するためには、ウエハ周縁温度を所定温度に対してオーバーシュートさせ、同時にウエハ中央の温度はアンダーシュートさせる温度制御が有効であることを実験および計算から求めた。また、半透明材料を含む非灰色ふく射伝熱計算を行い、シリコンウエハの透過率の温度依存性がウエハ温度変化に与える影響について解析した。その結果、昇温時においてウエハ温度が約 350℃を超えた直後の急激な温度上昇および面内温度偏差の増大は、その温度の前後でシリ

コンウエハの透過率が大きく変化することによるものであり、350℃から600℃の間の温度帯ではウエハ面内温度偏差は通常よりも100℃程度大きくなることを明らかにした。

第3章では、成膜状態に大きな影響を及ぼすと考えられるウエハ面上および、高さ方向のガス流れについて、300 Pa 程度まで減圧できる真空実験装置を用い可視化する手法について説明した。トレーサー粒子に酸化チタンを用い、減圧雰囲気中に拡散させる方法を用いることにより可視化を可能にした。また、可視化実験に対応する計算モデルを作成し、PIV 計測による実験結果と定量的に比較し、計算の妥当性を確認した。また、ウエハ面上のガス流動について、ウエハが全く存在しない場合の流れや、ウエハ積層間隔を変化させた場合の流動、ガス流入口の形状を変化させた場合の流動に関して可視化し、数値計算と比較・検討した。

その結果、積層型減圧 CVD 装置内の反応ガスの流動は、ガス密度が極端に低下することにより Re 数の非常に小さな流れとなり、粘性の影響が強く現れることがわかった。ノズルより噴射されたガスは積層ウエハから大きな抵抗を受けて、ノズル近傍で循環流を形成し、ウエハの周囲方向へと広がって行き、ウエハ面内ではポテンシャルフロー（Hele Shaw 流れ）に類似した流れとなっていることがわかった。また、ノズルを2本用い、ノズル孔を対向させて配置した場合には、ガスは互いに衝突して運動量が小さくなり、循環流を極力小さくしながらウエハ面内に流れ込むので、ノズル1本の場合に比べウエハ面内に広く均一な流れを形成できた。これにより、ゴミ成分となる気相析出型パーティクルの発生を抑制しながら均質な成膜を行う手法を明らかにした。

第4章ではまず、リングボートの流れや成膜に対する影響について、数値計算を行い考察した。リングがない場合の高速成膜実験では、ウエハの周縁部は中央付近よりも極端に膜が厚く形成された。これを改善するためにリングボートを用いた際のガス流動についても数値シミュレーションを用いて検討を行った。

その結果、リングボートを使用した場合には、ウエハの周縁部に反応ガスが流れにくくなり、ウエハ中央部に、より多くのガスが供給されることも明らかとなったほか、成膜実験においてもウエハ面上の薄膜が均一化することが確認できた。

次にCVD装置内全体のガス流動を解くための原料ガスの気相化学反応を含めた計算モデルを作成し、ガス注入ノズルの位置や排気の位置を変化させた場合の流動を解き、成膜実験と比較することでガスの流し方による成膜傾向の違いを述べた。

その結果、下部に排気を設けたほうが反応室内の流動がスムーズになり、ウエハ面内にも積極的にガスが流入することがわかった。これにより、積層ウエハ高さ方向の膜厚均一性や、高速成膜にも有利であることを明らかとした。

第5章では、これまでの数値計算や成膜実験結果を踏まえ、パーティクル生成を抑制するための装置構造について考察した。パーティクルの発生原因として、原料ガス供給ノズル内のガス温度と圧力が高いことが原因であることが数値計算と実験結果から推測した。また、ノズル内の圧力はノズル径に大きく依存することが計算により明らかとなり、パーティクル発生を抑え

るためにはノズル径を大きくする必要があることを明らかとした。

また、装置全体の流動を数値計算により求め、パーティクル抑制に有効な装置の構造を考察した。その結果によると、積層ウエハ上段におけるパーティクル発生源は、ウエハ支持台の天板とインナーチューブの狭い隙間によるものと推測し、最適な寸法を決定した。また、上部排気の構造では、下部でのパーティクルの発生が懸念されることから、下部排気のほうがパーティクル抑制には有効であると結論付けた。

第6章は本研究の結論であり、得られた成果の概要を記述した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 近 久 武 美

副 査 教 授 武 田 靖

副 査 教 授 池 川 昌 弘

副 査 教 授 工 藤 一 彦

学 位 論 文 題 名

シリコンウエハ均一高速成膜のための 積層型減圧 CVD 装置内における熱・物質移動に関する研究

シリコンウエハの成膜プロセスでは、半導体集積回路の微細化に伴い、より高品位な成膜が要求されている。一方、生産性を上げるためにウエハは大口径化しつつあり、しかも加熱・冷却ならびに成膜時間の短縮が求められている。そのため、熱応力や均一成膜性の観点から、より厳しい条件のもとで従来以上の品質を確保する技術の開発が求められている。そこで本研究は、急速加熱・冷却のための温度制御手法について明らかにするほか、均一成膜のためのCVD構造を明らかにしたものである。

まず、積層ウエハの過渡状態における温度分布の実測ならびに数値シミュレーションを行い、面内温度偏差を許容値以内に保ちながら最短時間で加熱・冷却するための温度制御法について検討を行っている。その結果、350℃から600℃の温度帯ではシリコンウエハの透過率の大きな変化に起因してウエハ面内温度偏差は他の温度領域よりも100℃程度大きくなることを示している。また、この温度偏差を許容値内に保ち、急速加熱・冷却を行うにはウエハ周縁温度を所定温度に対してオーバーシュートさせ、同時にウエハ中央の温度をアンダーシュートさせるような温度制御法が有効であることを明らかにしている。さらに、その温度モニターには従来のセンサーでは不十分であり、シリコンチップを熱電対先端に取り付けた温度計側装置が有効であることを示している。

次に、高速成膜を行うには従来に比べて10倍程度の約300Pa程度に圧力を上げる必要があるが、こうした圧力条件では炉内の気体流動が大きく成膜分布に影響することを明らかにしている。しかし、このような比較的低压場の流れを可視化した研究はほとんどなく、さらに流体を連続体として扱った従来の数値計算法の有効性についても定かではない。そこで、300 Pa程度まで減圧できる可視化実験装置を試作して、模擬CVD装置内の気体流動の可視化を

試みている。減圧場では流れ中へのトレーサ粒子の混入が難しいが、四塩化チタンを減圧雰囲気中に拡散させる方法により可視化を可能にしている。可視化画像から得られるPIV解析による流速分布と数値シミュレーション結果とを対比した結果、両者はよく一致していることを確認している。また、積層型減圧CVD装置内の気体流動は、ガス密度が極端に低下することによりRe数の非常に小さな流れとなり、常圧場と大きく異なった高粘性流動場となっていることを明らかにした。そのために、ウエハの間隔やウエハを支える支柱は流動に対して非常に大きな影響を与え、それらを考慮した設計が重要なことを示している。

複雑な形状に対しても数値シミュレーションは流れをよく表現できることが明らかとなったので、共同研究先企業から提供された成膜厚さ計測結果と数値シミュレーションによる流れ解析との対比を行い、最適なCVD装置構造について検討を行っている。その結果、ウエハの外周にリングを設置するのが、ウエハ間内への気体流入を促進し、しかもウエハ中央部と外周部の膜厚差を無くする上で有効なことを明らかにしている。さらに原料ガスの気相化学反応を含めた計算モデルを作成し、ガス注入ノズルの位置や排気孔の最適配置を明らかにしている。

シリコンウエハ成膜ではパーティクルと呼ばれる反応ゴミ粒子の低減が重要となる。これは支柱とウエハの熱膨張差によって生じる亀裂から発生するほか、炉内の滞留領域やノズル内で生成される。特にノズル内の圧力が高いとパーティクルの生成が多くなることを明らかにし、適切なノズル口径条件を示している。また、反応ガスが滞留しない装置構造を提案し、実験においてその有効性を確認している。

これを要するに、著者は、シリコンウエハの高速・均一成膜のための温度制御法ならびに気体流動条件に関する新知見を得たものであり、熱流体工学ならびに半導体製造工学の発展に対して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。