

CVD および酸化膜形成プロセスにおける 縦型減圧半導体製造装置内の気体流動設計に関する研究

学位論文内容の要旨

半導体製造装置では、デバイスの微細化や膜厚均一性の向上等のプロセス制御技術はもとより、プロセス時間 (Turn Around Time) の短縮等の生産性向上が求められる。本研究ではポリ Si 膜形成ならびに酸化膜形成のための縦型減圧 CVD 装置を対象とし、良好なプロセス性能を維持したまま成膜速度を向上する手法について研究を行った。これまでに、成膜速度と膜厚均一性に関する僅かの報告はあるものの、膜厚均一性の向上法について十分な研究を行った報告は見当たらない。また、ウェハー表面における微細な段差部での膜の被着状態を表すステップカバレッジについて、分子流から粘性流の領域へ遷移する圧力条件において実験的に解析した研究報告は見当たらない。そこで、本研究では膜形成メカニズムを数値計算と成膜実験結果とを対比させながら明らかにし、比較的高圧なプロセス条件において良好な膜厚均一性を維持したまま成膜速度を向上する方法について検討した。一方、減圧酸化装置を対象とし、均一な酸化膜を形成するための装置条件について検討を行った。この場合、簡素化した気相反応式とオリジナルの表面反応式を用いた計算モデルを作成し、実験結果と対比を行うことによって、膜形成に寄与する主要因子を明らかにした。さらに、この計算モデルを用いて、ウェハー積層枚数の影響を受けずに均一な成膜を行うことができる反応炉構造について検討を行った。

論文は以下の 4 章で構成した。

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、本研究の目的および得られた結果の概要について論述した。

第 2 章では、縦型減圧 CVD 装置において、モノシラン (SiH_4) とホスフィン (PH_3) を用いる P ドープポリ Si 膜について、数値計算および可視化実験と成膜実験結果とを対比させながら、成膜速度を向上できる反応炉構造について検討を行った。実験の結果、プロセス圧力を高めると成膜速度が向上するが、ウェハー周縁部に極端に厚く膜が形成され、膜厚均一性が著しく悪化した。この対策として、ウェハー外周にリング状の平板を挿入した結果、膜厚均一性を大幅に改善できることが確認された。数値計算による解析の結果、リングの挿入は積層ウェハーとインナーチューブの間を通る縦方向の流れの流動抵抗となるために、積層ウェハー間により多くのガスを流入させるほか、厚く成膜する部分をウェハー周縁からリング外周にシフトさせる効果を持つことが明らかとなった。

次に、種々の炉内圧力条件において原料ガス流量を変化させ、成膜速度と膜厚均一性について実験を行った。その結果、数十 Pa 程度の比較的低い成膜圧力においては、原料供給量が成膜速度に及ぼす影響は小さいが、高圧条件においては原料供給が過少とならない程度に流速を遅くすることが成膜速度の向上に有効であることを示した。

さらに、成膜速度を高く維持しながらステップカバレッジ (段差被覆性) を向上するための条件について検討した。その結果、一般に Kn (クヌッセン数) が大きいほどステップカバレッジは良いが、圧力が高く Kn が小さくても原料ガスの流量を増加することでステップカバレッジの改善が可能であることを示した。

第3章では、酸素と水素を用いた縦型減圧酸化装置による等方性酸化プロセスについて、ウェハー積層条件に対する既存装置の特性 (膜厚が下流側で減少するローディング効果) や水素供給サブノズルの役割について実験的な解析を行った。また、ローディング効果を抑制するための反応炉構造を明らかにするために、気相反応と表面反応を考慮した計算モデルを作成し、断熱板領域の有無や真空耐圧のためのドーム部空間の影響等について、数値解析による検討を行った。その結果、流動抵抗の小さい断熱板領域とドーム部空間にガスが高速で流入することが反応に大きく影響していることが明らかとなった。この際、膜の形成に寄与すると考えられる O 原子濃度は、積層ウェハー上段領域と下段領域において高くなっており、この O 濃度の偏差が膜厚偏差の主要因であるものと推測された。これらの結果より、反応炉の上下部空間を無くすことがウェハー積層方向の膜厚均一性を得るために有効であることが示唆された。

一方、ウェハー面内の膜厚均一性を向上するためにはウェハー間の気体流速を増加させることが有効であり、これにはウェハーと反応チャンバ内壁の間の隙間を、原料ガス供給側で狭く、排気側で広くなるような構造とすることが有効であることがわかった。また、原料ガスである酸素と水素は、そのまま反応チャンバに供給するよりも事前に分解反応させてから供給した方が、成膜の均一性向上に対して有効であることが示された。

第4章は本論文の結論であり、得られた結果の概要を記述した。

以上、本研究において縦型減圧 CVD 装置および縦型減圧酸化装置について、それぞれ高速均一成膜法とローディング効果を抑制するための反応炉構造を明らかとした。

学位論文審査の要旨

主査 教授 近久 武美
副査 教授 工藤 一彦
副査 教授 池川 昌弘

学位論文題名

CVD および酸化膜形成プロセスにおける 縦型減圧半導体製造装置内の気体流動設計に関する研究

半導体製造装置では、デバイスの微細化や膜厚均一性の向上等のプロセス制御技術はもとより、プロセス時間の短縮等の生産性向上が求められる。本研究はポリ Si 膜形成ならびに酸化膜形成のための縦型減圧 CVD 装置を対象とし、良好なプロセス性能を維持したまま成膜速度を向上する手法について研究を行ったものである。なお、これまでに成膜速度と膜厚均一性に関する僅かの報告はあるものの、分子流から粘性流の領域へ遷移する圧力条件において、数値計算と実験とを対比しながらステップカバレージ等を含めた詳細な解析を行った研究報告は見当たらない。

まず、縦型減圧 CVD 装置において、モノシラン (SiH_4) とホスフィン (PH_3) を用いる P ドープポリ Si 膜について、数値計算および可視化実験と成膜実験結果とを対比させながら、成膜速度を向上するための反応炉構造について検討を行った。実験の結果、単にプロセス圧力を高めただけでは成膜速度は向上するものの、ウェハー周縁部に極端に厚く膜が形成され、膜厚均一性が著しく悪化することが確認された。この対策として、ウェハー外周にリング状の平板を挿入し、さらに支柱の配置ならびにウェハーを支えるピン近傍のリング間隙を工夫し、最終的に膜厚均一性を大幅に改善することに成功した。また、種々の炉内圧力条件において原料ガス流量を変化させ、圧力と流量の最適条件について明らかにした。さらに、この間の現象に関して数値計算を用いて解析し、流動・拡散・反応に関する主要な因子を明らかにした。

一方、成膜速度を高く維持しながらステップカバレージ (段差被覆性) を向上するための条件について検討した。その結果、一般に Kn (クヌッセン数) が大きいほどステップカバレージは良いが、圧力が高く Kn が小さくても、原料ガスの流量を増加することでステップカバレージの改善が可能であることを示した。

次に、酸素と水素を用いた縦型減圧酸化装置による等方性酸化プロセスについて、ウェハー積層条件に対する既存装置の特性 (膜厚が下流側で減少するローディング効果) や水素供給サブノズルの役割について実験的な解析を行った。また、ローディング効果を抑制するための反応炉構造について

検討を行った。

数値解析では、大規模計算メッシュ条件で反応や流動を解析できるようにするために、多数の素反応を5本の主要反応で記述し、さらに独自に作成した簡単な表面反応モデルを加え、実験との対比を行った。その結果、今回提案した気相および表面反応モデルによって、実用可能な計算時間内で良好に実験結果を表現し得ることが確認された。次にこの数値解析法を用いて、ローディング効果の少ない反応炉構造について解析を行った。その結果、反応炉の上下部空間の形状、ノズル配置位置、およびウェハーと反応チャンバ内壁の間の隙間を適切に設計することが、ウェハー間の気体流速を増加させ、良好な膜厚均一性を得るために有効であることが示された。さらに、原料ガスである酸素と水素は、そのまま反応チャンバに供給するよりも、事前に分解反応させてから供給した方が、成膜の均一性向上に対して有効であることが示唆された。

以上、本研究により縦型減圧CVD装置および縦型減圧酸化装置について、それぞれ高速均一成膜を行うための手法とローディング効果を抑制するための反応炉構造を明らかにした。また、実用可能な時間内で解析し得る数値計算モデルを提案し、本現象のメカニズムを明らかにした。

これを要するに、著者は縦型減圧半導体製造装置内の気体流動設計に関する新たな提案を行うとともに、高速・高品質な半導体成膜技術に関する新知見を得たものであり、半導体成膜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。