

シリコン半導体ウエハ均一薄膜形成のためのガス流動制御手法の研究開発

菊田 和重 [北海道大学大学院工学研究科／助手]

近久 武美 [北海道大学大学院工学研究科／教授]

山口 天和 [株式会社日立国際電気]

背景・目的

半導体デバイスの集積度は年々高集積化しており、2005年には $0.065\mu\text{m}$ プロセスルールで製造するのが主流になると予想されている。これを達成するためには、半導体製造工程の成膜プロセスにおいてシリコンウエハ表面へのより薄く均質な成膜が必要であり、ウエハ面上に供給する原料ガスの流動および拡散の制御が非常に重要なものとなっている。多様化するデバイスやスループット向上に対応するためには、成膜に関与する希薄ガスの挙動を明らかにし、化学反応を含む成膜メカニズムとの関連を早急に明確にする必要がある。そこで本研究では、減圧場における希薄反応ガスの挙動を可視化実験および数値計算により明らかにするほか、希薄反応ガスの流動および拡散の制御手法を研究開発することを目的とする。

内容・方法

本研究開発においては、積層大口径シリコンウエハ面上への高速でかつ均一・均質な薄膜形成を目指す。生産性向上のために、ウエハ径は直径200mmのものから300mmのものへと半導体装置の移行が進もうとしている。その大口径ウエハに対応した高速成膜を可能にするためのガス供給手法の研究開発を行う。これまで経験に頼っていた成膜プロセスにおいて、成膜ガス供給方法の確立を目指し、減圧場における多様なプロセスを想定した希薄反応ガスの流動・拡散および各種成膜状態との関連を明確にする。

実験は数十Pa程度まで減圧可能な実機を模擬した実験装置を用いて、希薄反応ガスの流動可視化実験を行う。光源にはYAGレーザーを用い、酸化チタンによるトレーサー法により希薄ガスの流動可視化を行った。今回は、雰囲気圧力、反応ガス流量、反応ガス供給ノズル形状、排気方法などを変化させた場合のガス流動について可視化実験を行う。一方、汎用流動解析コードによる数値シミュレーションによりガス流動解析も併せて行い、成膜状態とガス流動・拡散および諸因子との関係を明らかにする。

結果・成果

希薄ガスの可視化実験では、可視化装置内への供給ガス量が毎分100cc程度と非常に微量であり、しかも300pa程度に減圧した場であるため可視化は容易ではなかった。本研究では四塩化チタンを装置の下方に微量噴霧し、発生したトレーサー粒子（酸化チタン）をノズル孔近傍に吸引させることにより

希薄なガス流動の可視化に成功した。積層されたウエハ間のガス流動について可視化を行ったが、ウエハ面上を流れるガスはノズルから噴射された後、ウエハ外周方向に広がって行き、ノズル近傍では大きな循環流を形成していることがわかった。これは大気圧下でよく見られる自由噴流の発達の仕方とは大きく異なっている。また、ウエハ中央付近の流れは非常に遅く、数mm/secのオーダーであった。一方、インナーチューブ内周に沿った流れは、これに比べて非常に速い流動となっていた。これらの結果から、減圧場でのガス流動は極低Re数流れとなり動粘性が非常に高くなるためウエハやウエハを支持する支柱などから大きな抵抗を受けて、大気圧下で見られるような噴流の発達の仕方とは大きく異なることが明らかとなった。

次に、このような減圧場におけるNavier-Stokes方程式に基づく流れの数値シミュレーションの妥当性について検討を行った。その結果、計算と可視化結果は良好に対応しており、300pa程度の減圧場においてもガス流動はNavier-Stokes方程式による連続体として扱えることが明らかとなった。なお、Kn（クヌッセン）数はウエハの積層間隔を代表長さとすると約0.0035と充分に小さく、このことからも妥当性を確認することができた。

一方、実機には積層ウエハと反応管の間にリングと呼ばれる石英部品が存在する。その効果を確認するために可視化実験および数値シミュレーションを行った。リングが存在しない場合には、ウエハの周縁部分において薄膜が特に厚く形成された。ウエハの周縁部に膜が厚く形成される要因としては、リングが存在しないためにウエハと反応管の間の隙間が大きく流動抵抗の少ない部分において、ガスが大量に流れていることが数値シミュレーションから確認できた。リングが存在する場合には、中央部分は若干厚く膜が形成されているものの、比較的均一な薄膜が形成されている。高速成膜を行わない数十pa程度の圧力での成膜時には、リングが無く同等の隙間が存在する場合でも面全体に均一な薄膜が形成される。このことから、圧力の高い高速成膜時には成膜は分子拡散支配にはなっておらず、流動の影響も大きいことがわかった。均一な薄膜形成を行うためには、反応容器内を比較的均一な流動抵抗としてウエハ面上にガスが供給されるように流動を制御する必要があると言える。

今後の展望

これまでの研究により、希薄ガスのウエハ面上での流動および装置内での流動の詳細については概ね明らかにすることができた。しかしながら、ガス流動・拡散および成膜状態の関係については明確にするところまでには至っていない。成膜状態は、ウエハ表面でのガスの流動・拡散のほか圧力、温度によって支配される気相・表面の化学種（原料ガス）の反応があり、それらが複雑に絡み合って決定される。

今後は、素反応を含めた詳細化学反応計算とこれらのガス流動・拡散解析結果を組み合わせた数値シミュレーションが必要であると考えられ、現在その準備を進めているところである。