

半導体プロセス用高密度プラズマ源の開発

1. はじめに

プラズマの応用分野の代表として、核融合と並びプラズマプロセスがある。プラズマプロセスをひと言で述べると、プラズマを用いて材料を積む(製膜)、削る(エッチング)、改める(表面改質)ことである。材料の加工が目的であるから、ガスの温度は常温に近いことが望まれ、プラズマとしては電離度が低く(数%程度)、電子のエネルギー(電子温度)は高いが、中性粒子の温度が低いことが求められる。このようなプラズマは低温・非平衡プラズマと呼ばれ、高温・平衡プラズマである核融合プラズマとは性質が大きく異なる。低温・非平衡プラズマの活躍の場は近年、材料加工に留まらず、医療、バイオ、環境、宇宙ロケット推進などの分野で拡大している。

しかし、なんといっても主役は半導体プロセスである。現在、半導体製造の前工程においてプラズマプロセスは不可欠な基盤技術となっている。ここでは量産の観点から、大口径ウエハに対応可能な大面積で高密度なプラズマを均一かつ再現よく生成することが求められる。そのために、これまで多種多様なプラズマ源が開発されてきた。たとえばプラズマ励起周波数で分類すると、直流(DC)、容量結合(CCP)、誘導結合(ICP)、表面波、ヘリコン波、ECR(2章で詳述)などが挙げられる。それぞれ一長一短あり、アプリケーションに対して使い分けがなされている。その詳細は文献(1)などを参照されたい。本稿では筆者が主に携わってきたECRプラズマについて述べる。

2. ECRプラズマ

ECRとは電子サイクロトロン共鳴(Electron Cyclotron Resonance)の略で、波動励起による磁化プラズマの一種である。すなわち、プラズマに外部から0.1T程度の磁場を印加すると、荷電粒子は磁場強度に応じた周波数でサイクロトロン運動を行う。

一方で外部からマイクロ波を入射すると、マイクロ波は磁化プラズマ中を固有モードで伝搬する。磁場に平行に伝わる波は主に右回り偏波として伝わり、電子のサイクロトロン周波数と同期させることで、共鳴加熱(ECR加熱)が生じる。そこでは電子がマイクロ波パワーを共鳴吸収し、その結果高密度プラズマが生成される。このとき、コ

イルに流す電流を調整して発散磁場を形成することで、大面積プラズマを容易に生成することができる。加えてプラズマ生成に波動現象を利用するため、局所的な加熱が可能であり、それを利用してプラズマ中の電子密度・電子温度分布を制御できることも、他のプラズマ源と比べて優位な点である。

3. 窒化プロセスへの応用

半導体のゲート絶縁膜の代表的な作製法として、アルゴン窒素混合プラズマをシリコン基板表面に照射し、極薄膜を成長させる方法がある。その際、気相中で窒素原子を多量に生成し、原子状窒素を直接基板に堆積させると高品質の膜が得られることがわかっている。しかし、窒素分子の結合エネルギーは9.76eVと大きく、通常のプロセスプラズマの電子温度では、窒素分子を解離させ窒素原子を十分に供給することは困難である。本研究では、ECRプラズマ中の波動による電子加熱に注目し、高域混成共鳴(UHR)を利用して10eVをはるかに超える高い電子温度領域を基板付近に作り出すことに成功した⁽²⁾。

図1に装置写真と概略図を示す。UHRは磁場に垂直に伝搬する波動による電子の共鳴加熱であり、通常ECRプラズマでは生じない。しかし、磁場配位を工夫してプラズマを壁から浮かせ真空層を作ることで、マイクロ波(2.45GHz)が基板近傍まで伝搬できるようになり、モード変換を経てUHR加熱が可能となる。これにより、図2に示されるように電子温度の局所の上昇が生じ、結果高密度窒素原子のもとでの窒化膜作製が実現できると考えられる。なお、UHR加熱の位置は磁場配位を変えることで容易に移動させることが可能である(図3)。

4. おわりに

半導体プロセス用高密度プラズマ源としてECRプラズマを取り上げ、窒化プロセスへの応用例を示した。他の方法として窒素分子の解離には電子ビームを用いることが挙げられるが、大面積プロセスには不向きである。本稿で取り上げたECRプラズマでは、磁場を用いて大面積化が容易に図られる。また、同一プラズマ中に電子サイクロトロン共鳴と高域混成共鳴を発生させ、高密度プラズマによる窒素原子の高効率生成を実現する方式はきわめ

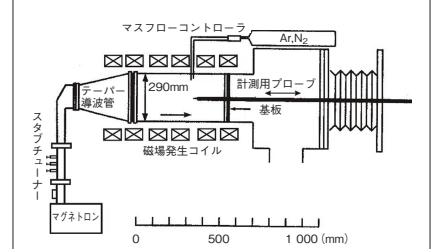
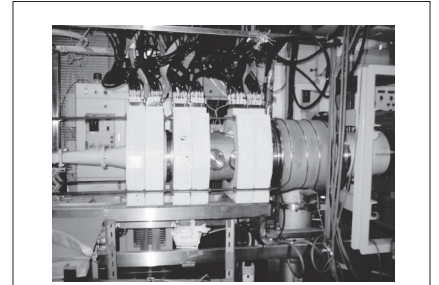


図1 ECRプラズマ装置

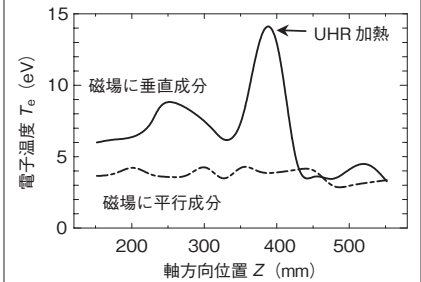


図2 電子温度分布

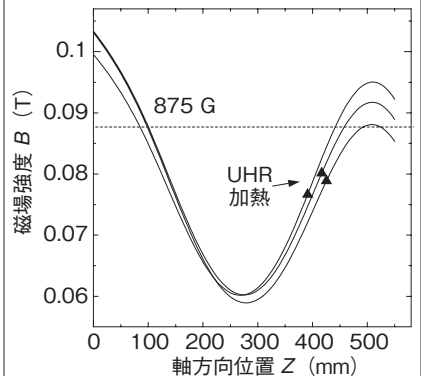


図3 磁場配位によるUHR加熱位置制御

てエネルギー使用効率のよい方法で、初めての試みである。

(原稿受付 2010年1月22日)

[牟田浩司 岐阜大学]

●文献

- (1) プラズマ・核融合学会編, プラズマの生成と診断, (2004), コロナ社.
- (2) Muta, H., Thang, D. H. and Kawai, Y., Characteristics of the electron temperature in the downstream regions of N₂/Ar ECR plasmas, *Thin Solid Films*, 506-507 (2006), 541-544.