



## 応用物理学会春季学術講演会 注目講演プレスリリース

2023年 3月 13日

トモグラフィック発光分光計測によるアルゴン誘導結合プラズマの電子温度・電子密度の空間分布診断  
Diagnosis of Spatial Distribution of Electron Temperature and Electron Density of Argon  
Inductively Coupled Plasma by Tomographic Optical Emission Spectroscopic Measurement

### 大規模集積回路に欠かせないプラズマプロセス 電子温度・電子密度の3次元空間分布を計測

東工大<sup>1</sup>、アルバック<sup>2</sup>

山下 雄也<sup>1</sup>, 土居 謙太<sup>2</sup>, 清田 哲司<sup>2</sup>, 浅川 慶一郎<sup>2</sup>, 細谷 宗太郎<sup>1</sup>, 菊地 航行<sup>1</sup>, 根津 篤<sup>1</sup>, 赤塚 洋<sup>1</sup>

#### 【発表概要】

- ・ トモグラフィック発光分光計測と衝突輻射モデルに基づいた解析により、プラズマの電子温度・電子密度を3次元空間分布として診断する方法を確立
- ・ これまで明らかではなかった、プラズマプロセスにおける、反応容器内の圧力・電力の変化と、電子温度・電子密度の3次元空間分布相関性を定量化
- ・ プラズマプロセスにおける異常検知システム、プラズマシミュレーションの高精度化に貢献

東京工業大学 工学院電気電子系 山下雄也氏（大学院博士後期課程学生）、赤塚洋准教授ら、および株式会社アルバックによる研究グループは、トモグラフィック発光分光計測と衝突輻射モデルに基づいた解析によって、プラズマプロセスにおける電子温度・電子密度の3次元空間分布の定量診断に世界で初めて成功した。本研究は、今後のプラズマエレクトロニクス発展、また、産業界においては半導体プロセスの歩留まり向上に大きく寄与するプロセス開発を促すことが期待される。

## 【詳細】

### 半導体加工に欠かせない「プラズマプロセス」

物質における第4の状態とも表現されるプラズマ（※1）は、現代のエレクトロニクスを根本から支える、半導体製造技術に幅広く応用されている。たとえばスマートフォンやパソコンの心臓部である半導体チップの大規模集積回路における超微細加工や、太陽電池、液晶テレビに代表される、透明な導電性の薄膜「透明導電膜」の合成に、プラズマを用いた加工技術「プラズマプロセス」は欠かせない。

本研究はより高度で精密なプラズマプロセスの確立に貢献する研究だ。現在は、エッチング（※2）をはじめとした、半導体集積回路のプロセスにはプラズマが幅広く使われている。設計通りの適切な加工を行うためには、プラズマ装置において投入電力や圧力などのパラメータを制御し、最適な加工条件を見出す必要がある。「しかし現在は、どの程度の電力・圧力にすれば、どのような加工ができるか、その相関関係があまり明らかになっていません。よって半導体プロセスにおける加工条件の最適化に課題があります」と山下氏は語る。

実際の生産現場では、プラズマ装置の電力や圧力を何十通りにも変えて試験加工を行い、さらに物性を評価することで加工条件の最適化を行っているため、非常に多くのコストと手間がかかっている。

「半導体加工で使うプラズマでは、電子が反応の進行に重要な役割を果たします。プラズマを制御するには、電子のエネルギーを示す電子温度、そして単位体積あたりの電子数を示す電子密度が重要な指標になります。本研究では、電子温度・電子密度の3次元空間分布を診断する方法を確立しました。プラズマ加工の条件を最適化し、歩留まり向上に貢献することが期待できます」と山下氏は語る。

### 世界初、プラズマの電子温度・電子密度の3次元空間分布診断

本研究では、ドライエッチング装置を模擬した実験装置「誘導結合プラズマ装置」によってアルゴン（Ar）プラズマを生成した。発生したプラズマを装置に設けた計18個のレンズにより同時観測し、発光スペクトル（※3）の分光放射輝度（※4）を計測（図1）。視線ごとの分光放射輝度に対して「分光トモグラフィ計算」が行われた。実験で取得した分光放射輝度の視線依存性の値から、プラズマ寸法に対するレンズ位置に基づき、分光放出係数（※5）の3次元空間分布を計算によって求めた。

そして各座標における分光放出係数を、プラズマ中における原子分子過程（※6）の数理モデルである「衝突輻射モデル」に基づいて解析を行った。これにより、プラズマを制御する上で重要な指標である、電子密度・電子温度を、プラズマを乱さず非接触に診断することに成功した。また、

同診断法に基づいて、プラズマ装置に与える電力・圧力が、発生されるプラズマの電子温度・電子密度に及ぼす関係（図2）を明らかにした。「これまで相関関係が明らかではなかった、プラズマ装置において電力や電力の変化が、どのように電子温度や電子密度へ影響を及ぼすかを定量化することができました。これらの数値は、プラズマ加工のメカニズム解明にも貢献すると考えられます」（山下）

プラズマの発光スペクトルを一視点から計測している先行研究は多い。しかし、現在の半導体のプロセスでは、歩留まりを上げるために、シリコンウェハ（※7）のサイズが大口径化している。すると、シリコンウェハの中心部と端では、起きている反応が違ってくるため、一視点による計測では正確な診断はできない。また、発光スペクトルの3次元空間分布を算出する技術であるトモグラフィを用いた先行研究はあるものの、非常に複雑な原子分子過程が無視されていた。このように、原子分子過程を詳細に考慮し、さらにプラズマの3次元空間分布診断を実現した研究は先行例がなかった。そのため、電子温度や電子密度を正確に求めることができず、プラズマプロセスにおける課題となっていた。「私たちが長年進めてきた、プラズマ原子分子過程に関する研究成果を基礎として、トモグラフィック分光計測結果を解析することで、より確からしい電子温度、電子密度診断を実現した」と、同大学の赤塚准教授は語る。

## 応用は異常検知システムとプラズマシミュレーションの高精度化

「本研究を計測のツールとして応用すれば、プラズマプロセスにおける異常検知システムが検討できます。つまり、実加工中に観察を行うことで、異常な反応を検知し、最終加工を行う前にその異常を排除するようなツールです」と山下氏は同研究の今後の展望を話す。

さらに、本研究によって得られる電力依存性・圧力依存性による電子温度・電子密度を導入した「プラズマシミュレーション」を行うことで、従来型の繰り返し実験に依存する加工条件の最適化のコスト削減などに具体的に貢献できるという。同研究の共同研究先であるアルバックの土居謙太氏は「プロセス条件の最適化、プロセス結果に与える直接的要因である、電子温度・電子密度を知れることで、より根拠を持ったプロセス開発が可能になる」と話す。

また、土居氏は、「異常検知については、実機搭載していけば、異常の予兆を検知できるようになる可能性がある。異常をとらえることができれば、装置の運用をより合理的に行うことができるだろう」と将来における期待を語った。

## 【注釈】

※1 **プラズマ** 気体中に生ずる放電現象。気体の中で放電を生じさせると、電気エネルギーにより、原子・分子から電子が引き離される。これにより、電子、正イオン、原子・分子という3種類の粒子が共存する状態が、プラズマである。なお、プラズマではない通常の気体では、原子・分子のみが存在する。

※2 **エッチング** 半導体製造工程のひとつ。半導体では、基板上的薄膜に回路パターンを転写することで回路を形成するが、その際の不要部分の薄膜を除去する工程をエッチングという。プラズマは、「ドライエッチング」で使われている。

※3 **発光スペクトル** 原子や分子が、高いエネルギーの状態から、低いエネルギー状態へと遷移する際に放出する光の、波長と強さ。発光スペクトルを解析することで、原子や分子のエネルギー状態を定量的に求めることができる。

※4 **分光放射輝度** 窓から発せられる光の強さと波長の依存性（スペクトル）を、窓の面積と光の広がり角あたりの物理量によって表したもの。レンズの視線上に存在する、プラズマの分光放出係数を足し合わせた値である。

※5 **分光放出係数** プラズマが発する光の強さと波長依存性（スペクトル）を、プラズマの体積と光の広がり角あたりの物理量によって表したもの。プラズマは3次元的広がりがあるので、分光放出係数は位置依存性がある。

※6 **原子分子過程** 電子・正イオン、原子・分子が相互に衝突する反応のこと。プラズマ中では、これらの衝突を通じてエネルギーのやりとりが行われ、加工に用いられる反応に至る。

※7 **シリコンウェハ** 高純度のシリコンから切り出される、円形の板。半導体の基板材料であり、製造工程では、シリコンウェハ上に回路パターンを形成する。

## 【図】

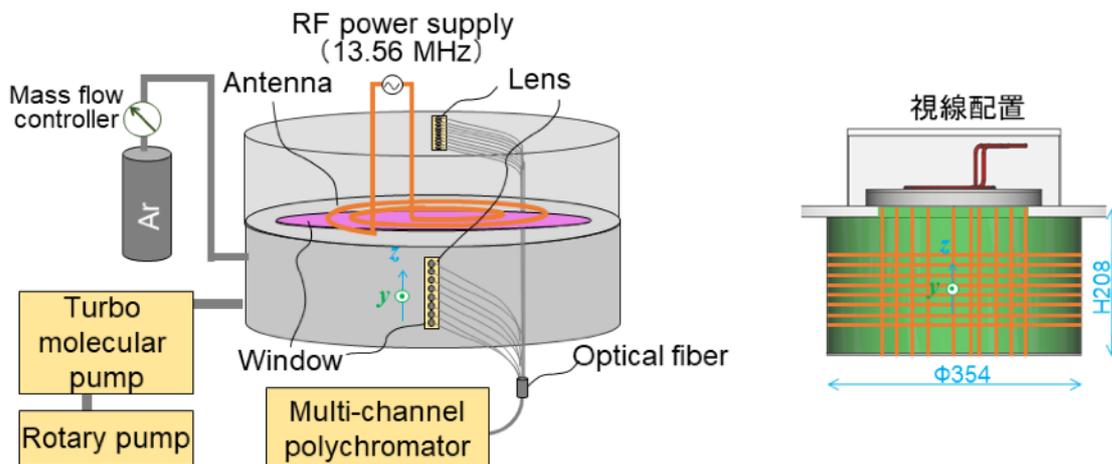


図1 誘導結合プラズマ装置（左）で発生したプラズマを、装置の側面と上面に設置した18個のレンズ（右）を介して「マルチチャンネル分光器」で観測。これにより視線ごとの分光放射輝度の視線依存性を計測した。

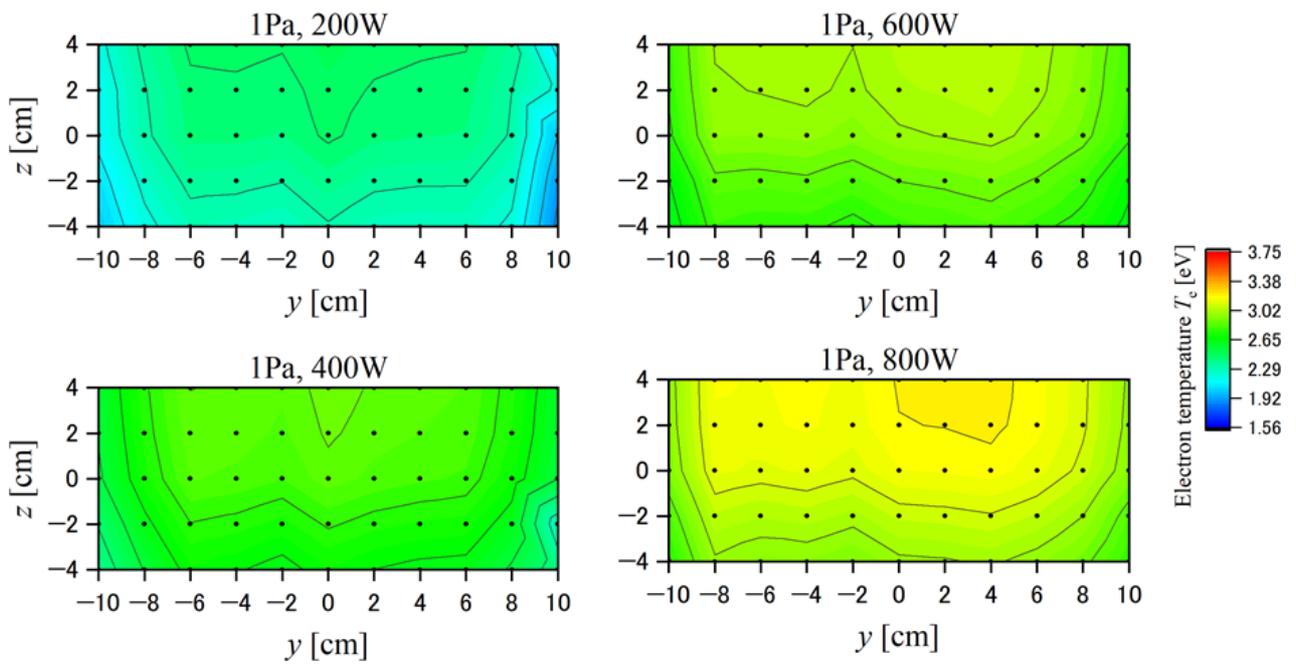


図2 電子温度の空間分布の電力依存性の診断結果。電力増加につれて、電子温度が上昇した。これは、誘導電磁界強度の増加によるドリフト速度増加によるものと考えられる。また、電子温度は、 $y$ 軸方向に非対称な分布を呈した。これは、アンテナの形状に起因するものと考えられる。