

氏名（本籍）	井上 真里（和歌山県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第58号
学位授与日付	平成25年3月26日
専攻	システム工学専攻
学位論文題目	マルチマイクロホローカソード放電中の電子の挙動解明とその薄膜プロセス応用に関する研究
学位論文審査委員	(主査) 教授 土谷 茂樹 (副査) 教授 瀧 寛和 教授 伊東 千尋 伊藤 昌文（名城大学）

## 論文内容の要旨

### 1章 序論

近年プラズマプロセスでは、ナノメートルスケールでの微細化加工や大画面化が求められ、プラズマ中の粒子の密度や温度によるプラズマプロセスの制御が非常に重要となっている。特に複合金属原子ターゲットを用いるスパッタリングプロセスではプラズマ中に複数の金属原子が混在するため、これら複数の金属原子の同時モニタリングが必要となる。そこで、一度に複数の金属原子のモニタリングが可能となる小型な吸収分光光源のマルチマイクロホローカソードランプ (multi-Micro Hollow Cathode Lamp: multi-MHCL)を開発してきた。マルチマイクロホローカソード放電は10 kPa程度の圧力領域における放電であるため、1~数百 Pa程度のホローカソード放電 (Hollow Cathode Discharge: HCD)や数十 kPa~大気圧程度のマイクロホローカソード放電 (Micro Hollow Cathode Discharge: MHCD)とは、原子のスペクトルプロファイル、並進温度や衝突頻度、絶対密度のプラズマ特性が異なる。しかし、この圧力領域におけるMHCD内の原子挙動はほとんど解明されていない。そこで、本研究では、数 kPa~10 kPa程度の圧力領域におけるMHCD中の原子挙動の解明を行った。そして得られた知見を基にmulti-MHCLを光源として用いた吸収分光法によりスパッタリングプロセス中の複数の金属原子の絶対密度の同時測定を行い、これらと成膜した薄膜特性の結果との関連性について検討した。

### 2章 プラズマ診断技術と実験装置

プラズマプロセスにおけるプラズマ中の粒子の温度や密度などの挙動を計測することは、プラズマの状態を知る上で非常に重要である。2章では、プラズマ診断技術で用いられる発光分光法と吸収分光法の測定原理について説明した。発光分光法で得られるスペクトル波長から、プラズマ中の原子の定性分析が行える。またスペクトル線の発光強度の変化を測定することにより基底状態の原子数の相対量の変化を推測できる場合がある。吸収分光法は、ランベルト・ベールの法則によりプラズマ中の粒子の絶対密度を求める手法である。光源の入射光とプラズマを透過した光の減衰率からプラズマ内の粒子の絶対密度を求めることができる。また実験で用いたmulti-MHCLの構造についても説明した。そしてダイオードレーザを用いた吸収実験装置とmulti-MHCLを用いた吸収実験装置の構成について述べ、吸収実験で得られたスペクトルプロファイル測定の結果から原子の並進温度、衝突頻度と絶対密度の算出法についても述べた。

### 3章 multi-MHCL中の原子の挙動

ダイオードレーザ吸収分光法を用いて、数 kPa~10 kPa程度の圧力領域で作動するマルチマイクロホローカソード放電中の原子挙動の解明を行った。具体的には、放電ガス原子である準安定 He 原子と陰極から放出された金属原子である準安定 Pb 原子のスペクトルプロファイル、並進温度、衝突頻度と絶対密度といったプラズマ特性を明らかにした。その結果、ガス圧力5~10 kPaにおける準安定 He 原子のスペクトルプロファイルは $\Delta v_l / \Delta v_b = 0.15 \sim 0.86$ のフォークトプロファイルであることが分かった (図1)。得られた吸収スペクトルプロファイルから、並進温度、圧力広がり係数そして絶対密度は、それぞれ $830 \pm 70 \sim 410 \pm 50$  K、 $0.26$  MHz/Pa、 $(8.2 \pm 0.3) \times 10^{13} \sim (6.2 \pm 0.4) \times 10^{13}$  cm<sup>-3</sup>と算出することができた。この結果より、ガス原子の並進温度は300 KのMHCDより高く、圧力広がり係数は0.18、0.14 MHz/PaのMHCDより大きく、そして絶対密度はHCDとMHCDの中間に位置することが分かった。

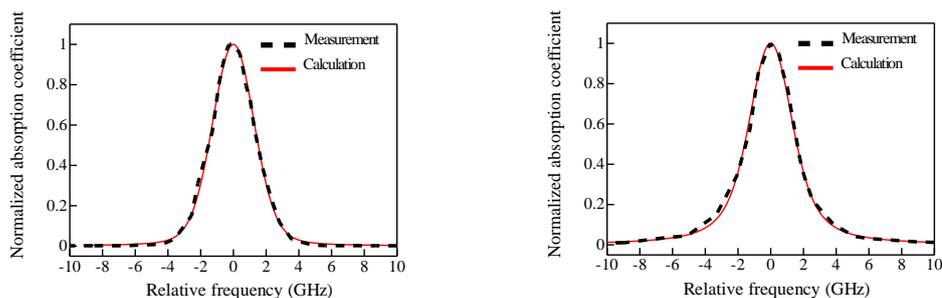


図1 準安定 He 原子の吸収スペクトルプロファイル (左図 5 kPa, 右図 10 kPa).

次に、数 kPa~10 kPa の圧力領域における準安定 Pb 原子のスペクトルプロファイルは、 $\Delta\nu_i/\Delta\nu_j=0.65\sim 1.34$  のフォークトプロファイルであることが分かった (図2)。得られた吸収スペクトルプロファイルから、並進温度、圧力広がり係数そして絶対密度は、それぞれ  $820\pm 100\sim 610\pm 100$  K、 $0.22$  MHz/Pa、 $(9.0\pm 0.5)\times 10^{11}\sim (4.6\pm 0.4)\times 10^{11}$  cm<sup>-3</sup> と算出することができた。金属原子の並進温度は  $400\sim 600$  K の HCD より高く、圧力広がり係数は  $0.18, 0.14$  MHz/Pa の MHCD より大きく、そして絶対密度は HCD より 2 桁程度小さいことが分かった。以上より、数 kPa~10 kPa の圧力領域におけるガス原子と金属原子は、HCD や MHCD とは異なった並進温度、圧力広がり係数、そして絶対密度の挙動を示し、この圧力領域におけるガス原子と金属原子の挙動を明らかにすることの重要性を示した。

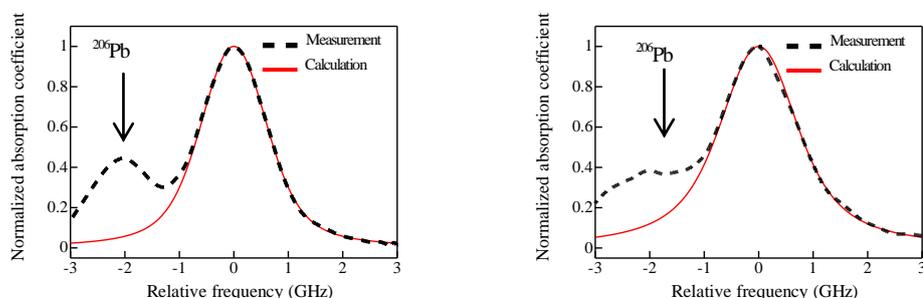


図2 準安定 Pb 原子の吸収スペクトルプロファイル (左図 5 kPa, 右図 7.4 kPa).

#### 4章 multi-MHCL を用いた吸収分光法による酸化インジウム亜鉛薄膜の成膜プロセスの解析

3章で明らかにした準安定 He 原子と準安定 Pb 原子のスペクトルプロファイルと温度の解明により、multi-MHCL を光源として用いた吸収分光法による酸化インジウム亜鉛 (Indium zinc oxide : IZO) 成膜スパッタリングプロセス中の In および Zn 原子の絶対密度の同時測定に成功した。それらの結果と成膜した IZO 薄膜特性から気相中の金属原子密度比と薄膜特性の関連性を明らかにし、気相中の In/Zn 比を膜質評価の指標とすることを示した。

#### 5章 結論

本研究において、ダイオードレーザ吸収分光法により未だ解明されていなかった数 kPa~10 kPa の圧力領域における MHCL 内のプラズマ特性を解明した。この圧力領域では、HCD や MHCD とは異なったプラズマ特性があることが分かった。そして、multi-MHCL を光源として用いてスパッタリングプロセス中の複数の金属原子の絶対密度測定を行い、成膜した薄膜特性と気相中の金属原子の挙動の関連を明らかにした。本研究で得られた知見は、MHCD のプラズマ特性の理解をより深めるものであり、また multi-MHCL によるスパッタリングプロセス中の金属原子のモニタリングは、薄膜の成膜プロセス用プラズマの制御を行う有効なツールと成り得ることを示した。

## 論文審査の結果の要旨

論文内容について審査し、博士論文として必要な条件を満たしていると認められた。

マイクロローカソード (MHCL) はプラズマ吸収分光計測用に新たに開発された放電光源で、従来の放電光源とは異なる圧力領域 (数 k~10kPa) で放電する。本論文は同圧力領域における MHCL 内のプラズマ特性を明らかにした点、および multi-MHCL を光源としスパッタプロセス中の複数金属原子の絶対密度測定を行って成膜薄膜の特性とプラズマ中の金属原子の挙動との関連を明らかにした点に特徴がある。multi-MHCL は今後様々なプラズマプロセスの精密制御への応用が期待され、同光源の基礎的特性を明らかにした本研究は学術的価値を有すると同時に、実用面への応用展開が可能である点において有用であり、学位論文に値すると認められた。

なお、予備審査での指摘事項は、修正・改善されていることを確認した。また、公聴会で使用したいくつかの図面の論文への追加と論文文章に若干の推敲が必要なことが指摘された。

## 最終試験の結果の要旨

公聴会・最終試験を 2013 年 2 月 7 日に実施した。論文の内容及び関連する事項についての試問を行った結果、質疑応答が適切であり、最終試験に合格と判定した。

論文審査及び最終試験の結果を総合的に検討し、博士学位授与に値すると判断した。