

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

氏名	つだ のり お
学位の種類	津田 紀 生 ¹
学位記番号	博士 (工学)
学位授与年月日	博 乙 第 5 号
学位授与の要件	平成11年12月21日
論文題目	学位規定第3条第4項該当
論文審査委員	XeCl エキシマレーザにより生成された 高圧アルゴンプラズマに関する研究 (主査) 教授 山田 諄 ¹ 教授 築島隆繁 ¹ 教授 内田悦行 ² 教授 渡辺茂雄 ³

論文内容の要旨

XeCl エキシマレーザにより生成された高圧アルゴンプラズマに関する研究

大出力レーザ光による高気圧気体中の電離現象の研究は、レーザ誘雷実験や高圧ギャップスイッチのレーザ光による制御等の観点から実用的な面で重要であり多くの研究が行われている。特に、光子エネルギーが気体の電離エネルギーに比べて小さいにも関わらず、高出力レーザ光による気体の絶縁破壊は急速に進展することが観測されており、多光子吸収機構をはじめとする種々の絶縁破壊機構が提案され実験と比較されている。従って、この分野は学問的にも重要な一分野となっている。

先駆的な研究として、大出力ルビーレーザ光(694.3nm)を用いて高圧アルゴンガス中に生成したプラズマの性質が詳細に調べられており、多光子吸収ならびに逆制動放射過程が光子エネルギーの吸収と放電破壊の進展に重要な役割を果たしていることが指摘されている。

高出力レーザ光による気体の絶縁破壊現象の全体像を解明するためには種々のエネルギーの光子エネルギーのビームを用いて実験をすることが必要であ

ることは言うまでもない。本研究は、紫外線領域(308nm)で発振する大出力の XeCl エキシマレーザ光を高気圧(≤150気圧)のアルゴンガス中に集光照射して得られた実験結果ならびに理論計算結果をまとめたものである。

レーザビームをターゲット気体の中心部に導くために光学系が用いられている。10気圧以上の高気圧気体中では、光学系の焦点において絶縁破壊が起こり、生成したプラズマは、その後レーザビームに沿って焦点の前後に成長する事が観測された。特に、高圧レーザプラズマの実験において前方へ成長する現象は本研究で初めて観測されたもので、この現象に対し新しい成長モデルを提案し、実験結果とほぼ一致する事を示した。本論文は、6章で構成され、以下にその概要を述べる。

第1章「序論」では、過去に行われてきたレーザプラズマに関する実験の歴史について解説し、本論文の背景について述べ、本研究の目的を明らかにしている。

第2章「レーザプラズマ成長の実験結果」では、波長308nm、最大出力17MWの紫外線領域で発振するXeClエキシマレーザ光を高圧アルゴンガス中に集光照射する事によって生成されたプラズマ成長の様子を時間分解能10psのストリークカメラを用いて観測した結果が述べられている。プラズマは最初焦点において発生し、焦点前方及び後方に成長する。後方プラズマは時間の経過と共に成長速度が遅くなったが、前方プラズマは時間と共に成長速度が

1 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)
2 愛知工業大学 情報通信工学科 (豊田市)
3 愛知工業大学 電気工学科 (豊田市)

速くなりレーザーパルス照射中に成長が止まるなど、前方と後方で成長機構が異なることが確認された。また、プラズマ半径方向の大きさを測定することにより、前方において自己収束が起きていることを確認した。また、実験に使用したレーザー光の強度分布や集光レンズの焦点距離の変化による、後方プラズマ成長の違いについて述べた。

第 3 章「レーザープラズマの電離過程」では、レーザー光を集光照射する事によって生成されたプラズマの二つの電離過程についての理論と計算結果が述べられている。即ち、紫外線レーザー光によって生成されたプラズマは、可視光の場合と同じく多光子電離は主に初期電子の生成に関与し、その後逆制動放射過程を経て加速された電子が、次々と電離を引き起こすカスケード電離によって、絶縁破壊が生じている事が確認された。また、破壊時間の圧力やレーザーパワー依存性を調べ、実験結果と理論計算結果を比較検討している。

第 4 章「レーザープラズマの物性」では、高圧ガス中に紫外線レーザー光によって生成されたプラズマの密度、温度等の理論的評価並びに測定結果が述べられている。レーザー干渉法を用いて位相差の変化から求めた電子密度の最大値の圧力依存性等を明らかにした。その結果、150 気圧で集光レンズの焦点における光強度が $2 \times 10^{16} \text{ W/m}^2$ の時、電子密度は 10^{27} m^{-3} に達していることを明らかにした。また、密度分布を測定し、分布が前方と後方で異なる理由について述べた。一方、電子密度の理論計算を行い、実験結果と定性的に一致している事を示した。

電子温度は、プラズマの発光を分光測定することにより線スペクトル強度比から求め、 10^5 K 程度である事を明らかにした。また分光測定の結果からプラズマは一価に電離しており、局所熱平衡状態であることを確認し、温度分布は、焦点で最も高く前方と後方でほぼ対照的に分布し、距離と共に減少した。連続光強度の波長依存性から測定した電子温度は、線スペクトル強度比から求めた値よりやや小さい値を示した。

第 5 章「レーザープラズマの成長機構」では、まず後方プラズマ成長については理論計算を行い、可視光の時と同じ成長メカニズム breakdown wave と radiation supported shock wave で成長していることを明らかにした。前方へのプラズマ成長は、本実験では初めて観測された結果の為、forward

breakdown wave という成長モデルを新たに提案し理論計算を行った。forward breakdown wave は breakdown wave の一種で、前方におけるレーザー光の自己収束効果を考慮したものである。このモデルを用いて理論計算した前方プラズマ成長は、時間と共に成長速度が速くなる等、実験結果と定性的に一致した。しかし、前方プラズマ成長の大きな特徴であるレーザーパルス照射中に突然成長が止まる現象はこの成長モデルでは表せなかった。そこで、後方に成長したプラズマによる吸収の影響を考慮するように上記の forward breakdown wave を修正し、理論計算を行った。この改良モデルは、前方プラズマ成長の特徴である、時間と共に成長速度が速くなり、その後レーザーパワーがプラズマ中を通過中に後方プラズマに吸収され成長が止まる現象を良く表している事を示した。

第 6 章「結論」は、前章までに議論してきた事項を整理し、150 気圧までの高圧アルゴンガス中に生成されたプラズマの物性及び成長機構について要約し、今後の課題について言及した。

論文審査結果の要旨

この論文は、高圧アルゴン気体中にエキシマレーザー光を集光照射したとき発生する高密度プラズマの物性について論述している。大出力レーザーの出現以来、レーザーによる気体の絶縁破壊、レーザーとプラズマの相互作用やレーザー核融合の研究等が盛んに行われている。気体とレーザー光の相互作用に関する研究は、主に 1 気圧以下の低い圧力領域で行われており、1 気圧以上の高圧領域における研究は、レーザー誘雷、破壊のしきい値を求める実験、可視光領域で発振するルビーレーザー光を用いた高圧プラズマの研究が行われている程度である。可視レーザーを用いた高圧プラズマに関する研究から、比較的簡単に高密度プラズマが生成できることが分かっている。それは、新しい極限プラズマとして物性的に興味深い点が多い。又レーザープラズマは高速で成長するため、レーザープラズマブリッジ・ギャップスイッチへの応用などが考えられる。しかし、1 気圧以上の高圧領域におけるレーザープラズマの研究は、可視レーザーを用いたものが中心で、紫外線レーザーを用いた研究はほとんど行われていない。紫外線レーザーは光子 1 個あたりの

エネルギーが大きく、可視光に比べて効率良くプラズマを生成できると考えられる。

こうした状況を背景に、本研究は150気圧までの高圧アルゴンガス中に紫外線領域で発振するXeClエキシマレーザ光を集光照射し、生成されたプラズマの物性や成長機構の解明等物性的研究を行っている。紫外線レーザ光を高圧気体中に集光照射すると、可視レーザを用いたときと異なり、プラズマは光軸後方ばかりでなく前方にも成長することを初めて観測した。これらの実験結果を説明するため、プラズマの物性を明らかにし、新たに forward breakdown wave と名付けた成長機構に関するモデルを提案し、実験と良く一致することを確かめている。

本論文は、6章で構成されている。

第1章「序論」では、過去に行われてきたレーザプラズマに関する実験の歴史について解説し、本論文の背景について述べ、本研究の目的を明らかにしている。

第2章「レーザプラズマ成長の実験結果」では、波長308nmの紫外線領域で発振する最大出力17MWのXeClエキシマレーザ光を集光照射する事によって生成されたプラズマの成長の様子をストリークカメラを用いて観測している。後方プラズマは時間の経過と共に成長速度が遅くなったが、前方プラズマは時間と共に成長速度が速くなりレーザパルス照射中に成長が止まるなど前方と後方で成長機構が異なることを明らかにしている。また、プラズマの半径方向の大きさを測定することにより、前方において自己収束が起きていることを確かめている。更に、レーザ光の強度分布や集光レンズの焦点距離を変えた時のプラズマ成長の違いについて述べている。

第3章「レーザプラズマの電離過程」では、レーザ光を集光照射する事によって生成されたプラズマの電離過程について理論計算を行っている。その結果、紫外線レーザ光によって生成されたプラズマは、可視光の場合と同じく多光子電離は主に初期電子の生成に関与し、その後逆運動放射過程を経て加速された電子が、次々と電離を引き起こすカスケード電離によって、絶縁破壊が生じている事を確認し、破壊時間の圧力やレーザパワー依存性を調べ、実験結果と理論計算結果を比較検討している。

第4章「レーザプラズマの物性」では、高圧ガス中に紫外線レーザ光によって生成されたプラズマの

物性について述べている。レーザ干渉法を用いて電子密度の圧力依存性を測定し、150気圧で集光レンズの焦点における光強度が $2 \times 10^{15} \text{W/m}^2$ の時、電子密度は 10^{27}m^{-3} の高密度に達していることを明らかにした。また、密度分布を測定し、分布が前方と後方で異なる理由について述べている。一方、電子密度の理論計算を行い、実験結果と定性的に一致している事を確かめている。電子温度は、プラズマの発光を分光測定することにより、連続光強度と線スペクトル強度比から求め、 10^6K 程度である事を明らかにした。更に分光測定の結果から、プラズマは一側に電離しており、局所熱平衡状態であることを確認し、温度分布は、焦点で最も高く前方と後方でほぼ等しい事を明らかにしている。

第5章「レーザプラズマの成長機構」では、後方プラズマ成長の理論計算を行い、可視光の時と同じ成長メカニズム breakdown wave と radiation supported shock wave で成長していることを確かめている。前方への成長機構に関し、新たに forward breakdown wave という成長モデルを提案し、理論計算を行っている。forward breakdown wave は breakdown wave の一種で、前方における自己収束の効果を考慮したものである。このモデルを用いて理論計算した前方プラズマ成長は、時間と共に成長速度が速くなる等、実験結果と定性的に一致したが、前方プラズマ成長の大きな特徴である、レーザパルス照射中に突然成長が止まる現象は、この成長モデルでは表せなかった。そこで、後方プラズマ成長による吸収の影響を考慮するように成長モデルを修正し、理論計算を行っている。このモデルは、前方プラズマ成長の特徴である、時間と共に成長速度が速くなり、その後レーザパルス照射中にも関わらず成長が止まるという現象を良く表し、高圧ガス中に紫外線レーザによって生成されたプラズマの成長メカニズムを解明している。

第6章「結論」は、前章までに議論してきた事項を整理し、150気圧までの高圧アルゴンガス中に生成されたプラズマの物性及び成長機構について要約し、今後の課題について言及している。

以上、本論文を審査した結果、博士論文として適格であると判定した。

(受理 平成12年3月18日)