

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	対向プラズマフォーカス装置を利用した高エネルギー密度プラズマの形成と極端紫外光放射特性に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	袖子田竜也
Author(English)	Tatsuya Sodekoda
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10528号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:堀岡 一彦,奥野 喜裕,赤塚 洋,長谷川 純,河村 徹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10528号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	創造エネルギー	専攻	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名： Student's Name	袖子田 竜也		指導教員 (主)： Academic Advisor(main) 堀岡 一彦 教授
			指導教員 (副)： Academic Advisor(sub)

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

本研究は、対向プラズマフォーカス方式を採用した高エネルギー密度プラズマ形成過程を明らかにするとともに、形成されるプラズマを新型の短波長光源として利用する際の基本特性を明らかにすることを目的として実施した。さらには、この一対の同軸型プラズマフォーカス方式の電極群を対向配置させた高エネルギー密度プラズマ発生装置を、高繰返し能力と高平均出力を有する放電型プラズマ光源として産業応用するために、必要となる重要な要素技術の抽出と高平均出力化への指針策定を目指した。プラズマ源としてのプラズマダイナミクスやプラズマ素過程を考慮した特性評価による光源装置としての高性能化・完成度向上とともに、実験装置という基礎研究段階から産業応用が可能な実用機のレベルへと繋げるための指針を得ることを目指した。

まず、対向プラズマフォーカス方式を採用した放電プラズマ装置において、多チャンネルのパルス放電を連続的かつ繰り返して動作させるために、レーザートリガー方式の導入によるプラズマ媒質供給方法を提案した。これにより媒質供給の均質化や時間制御が可能となり、マルチチャンネル電極を基本構造とするプラズマ源動作の再現性向上が期待された。そのためマルチチャンネル電極を有する対向プラズマフォーカス方式の試験装置を構築し、レーザーアブレーションプラズマによる多チャンネル放電の制御性を明らかにする実験を行った。アブレーションプラズマによって始動された 2×6 チャンネルの外部電極に流れる電流を同時計測して評価した結果、放電始動のジッターは±50ns の範囲に収まることを示した。さらには、レーザートリガー方式により放電の時間制御が可能であり、相互に独立したマルチチャンネル電極との組み合わせによって、電極軸の方位角方向に偏りが少なく閉じ込め性能に優れたプラズマ形成が可能であることを示した。これらの実験結果は、対向プラズマフォーカス装置へのレーザートリガー方式の導入によって、マイクロ秒級の寿命を持つ高エネルギー密度プラズマを再現性良く形成できることを示していた。

また対向プラズマフォーカス光源を連続動作させるためには、プラズマ媒質として使用しているリチウムを安定的に供給することが一つの重要な課題であった。均質で再現性の高い初期プラズマ生成に向け、プラズマ媒質の供給方法を改良し、ジュール加熱や放電プラズマによる電極への熱負荷の影響を避けることが必須であった。そして、媒質供給方法の改良提案とともに、改良による特性変化の確認評価を実施する必要がある。そのため、媒質供給方法について実験確認と理論的考察の両面から検討を行い、連続で安定な動作の実現性提示を目指した。電極と独立したプラズマ供給源を用いて動作確認実験を行った結果、従来の電極上に媒質を設置した場合と比較してプラズマからの発光強度に遜色はなく、電極外供給方法でも多チャンネル放電始動と高エネルギー密度の放電プラズマ生成が十分に可能であることが分かった。この結果は、放電やプラズマの影響を受けない独立した位置から、プラズマ媒質の安定供給が可能であることを示していた。

レーザートリガー方式の活用やプラズマ媒質の独立供給などの改良を加えた上で、プラズマ源としての基礎特性把握を目的とした試験評価を実施した。レーザーアブレーション特性、初期プラズマの挙動、収束プラズマの特性、放射される極端紫外光の特性などについて、実験確認と理論的分析の両側面からの検討を行った。単パルスやダブルパルスあるいは連続パルス動作が可能な試験装置を構築し、放電電流や発光強度を観測する各種の計測器を利用して、プラズマや発光の特性値の測定を試みた。実験結果を基に理論的な考察を加えて相互にフィードバックすることで、動的な加熱過程を伴うプラズマ源挙動の理解促進に向けた検討を行った。結果として、対向プラズマフォーカス装置からは基本的に長パルスで非常に高出力な発光が得られることが分かった。また、高いスペクトル純度と高いエネルギー効率を有する光源であり、実用化に向けた高繰り返し動作に対しても有利な点が多いことを明らかにした。

基礎研究に加えて、対向プラズマフォーカス光源の高繰り返し動作を目指して、エネルギーを回収・再利用型電源を開発した。実証運転を行った結果、電源のエネルギー回生率が90%以上であることを明らかにするとともに、1kHzの繰り返し運転を実現した。放電生成方式のプラズマ変換効率は基本的に高く、電源から高エネルギー密度プラズマへの総合変換効率を飛躍的に高くできることを示した。回生型電源で駆動されるプラズマ装置の総合変換効率の向上は、光源の運転に必要な電力を削減できるばかりでなく熱負荷や電極損耗をも抑制するため、長期に亘る連続運転を可能にする。また、放電プラズマ生成に伴う中心電極への熱負荷は300mJ/shotと評価でき、繰り返し動作の上限と適切な冷却システムを有する長寿命の電極設計に向けた重要な指針を得た。

また対向プラズマフォーカス方式を採用したプラズマ光源の産業応用の可能性検討にも取り組んだ。半導体製造における露光プロセスでは、次世代露光光源として波長13.5nmの極端紫外光(EUV)の利用が期待されている。そのため、対向プラズマフォーカス装置を考案した2008年当初から、EUV露光向けとして従来に無い高効率で高出力のEUV光源として実用化の可能性が検証され、本研究でも継続して調査と検討を行った。またイメージングの分野で期待されている小型で高フルーエンスの中性子源への適用可能性についても調査した。基礎研究の結果は、安定なプラズマ放電とデブリの少ない高エネルギー密度プラズマ生成が長時間に亘って可能であることを示しており、極端紫外光源にとどまらず、高イールドの中性子源をはじめとする連続的な高繰り返し運転を必要とするパルス放電型の高エネルギー密度プラズマ生成装置に対して、本研究を通じて開発した要素技術が有効であることを示していた。

以上のように、対向型プラズマフォーカス電極、マルチ放電チャンネルのレーザートリガー、および電極から独立したプラズマ媒質供給源を基本的な要素技術として持ち、エネルギー回生型パルス電源で駆動されるプラズマ生成システムは、高平均出力の高エネルギー密度プラズマを高効率で生成できることを示した。このようなプラズマ発生システムは、プラズマ供給媒質や入力パワーレベルを上げることによって、高輝度でさらに短い波長領域の光や高フルーエンスの中性子などを発生させることが可能であると予想され、高エネルギー密度プラズマの産業応用が飛躍的に広がると期待された。

備考：論文要旨は、和文2000字と英文300語を1部ずつ提出するか、もしくは英文800語を1部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： 創造エネルギー 専攻  
Department of  
学生氏名： 袖子田 竜也  
Student's Name

申請学位(専攻分野)： 博士 (工学)  
Academic Degree Requested Doctor of  
指導教員(主)： 堀岡 一彦 教授  
Academic Advisor(main)  
指導教員(副)：  
Academic Advisor(sub)

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In this study, the counter-facing plasma focus (CFPF) device was investigated in order to reveal the basic properties and to obtain the guideline for high average power output as a plasma light source. The method of CFPF was designed for producing high energy density (HED) plasma with long pulse width, high efficiency and high average output power. In this research, the verifications of the important elemental technologies were promoted aiming for the industrial application of CFPF device.

The CFPF device had a pair of plasma focus electrodes which was operated with a counter-facing configuration. The focus electrodes consisted of 6-cathodes surrounding a center anode drove multi-channel discharges. To realize the stable and repetitive operation, the laser trigger system was introduced and experimented. The light emitting material such as lithium was ablated by laser beams, and supplied simultaneously for multi-channel electrodes with inductively insulated power supply. The experimental results showed multi-channel discharges were occurred with low time difference. Also the results proved HED plasma with long pulse width of  $\mu\text{s}$  order was generated with sufficient reproducibility.

One of the prior issues was stable material supply for repetitive operation in CFPF device. Though lithium was installed on center anodes in conventional method, it is necessary to improve it for removing influences such as joule heating on electrodes and heat load from HED plasma to lithium. The outside and independent material supply method was devised and introduced in CFPF experimental device. Experimental results with operation using new supply method showed output power were equal or greater than that of conventional method. These results meant multi-channel discharges could start almost simultaneously and HED plasmas could be generated substantially even using the material supply out of electrodes, namely, from the unconcerned position of the electric discharge.

Moreover, basic properties such as characteristics of laser ablation, initial plasma, HED plasma and emitted lights were investigated with both of experimental and analytic approaches. Also the experiments for realizing the repetitive operation such as energy regeneration, thermal estimation of electrodes and electric recovery time were carried out. Taking into account of these results, fundamentally the output power from HED plasma was considerably high during a long time up to  $\mu\text{s}$ . In addition, lights could be emitted with high spectrum purity, high energy efficiency from the plug to plasma and repetition capability of

more than 1kHz. It is clarified that CFPF device had much advantages for high repetition operation in practical use.

In summary, CFPF device could be introduced laser trigger system with multi-channel discharges and method of plasma material supply out of electrodes, and could be driven using energy regeneration power supply system. Experimental and analytic results indicated it was possible to produce HED plasma with high average output and high efficiency. Moreover, it was expected to generate the lights with smaller wavelength or the particles such as neutron with high flux when inlet energy could be increased. It was also expected that possibility of industrial application of HED plasma would be raise remarkably in various fields.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).