

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(理学), 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 (Science), 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)	要約
Type(English)	Outline

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

東京工業大学 総合理工学研究科
創造エネルギー専攻
袖子田 竜也

核融合中性子や X 線・強磁場あるいは高速荷電粒子の生成などを目的とした場合、高温かつ高密度であるプラズマ、つまり『高エネルギー密度プラズマ』はそれらの生成源として有効な手段の一つである。Mather-type のプラズマフォーカス方式は同軸構造を持つプラズマガンであり、約 50 年前に核融合分野で考案された。高エネルギー密度プラズマの生成手段として長年に亘り、主に基礎科学の分野で研究開発が進められてきた。プラズマフォーカス装置は、他のプラズマ発生装置と比較して小型であり、低コストで簡便でありながらエネルギー密度の高いプラズマを形成できるという特長を有している。一方で、放電現象を利用することに起因する電極や支持構造材の損耗、偏った放電やプラズマ挙動に起因する不均一性などによって、プラズマの再現性や装置寿命を向上できないという欠点があった。これらが従来のプラズマフォーカス装置の産業応用に対する課題となり、実用化を妨げていた。逆説的に言えば、プラズマフォーカス装置において繰り返し動作能力の向上や装置の長寿命化が促進できれば、半導体露光用の光源としてあるいはイメージング用の中性子源などへの工学応用が拡大すると期待できた。

マルチ電極を有する対向プラズマフォーカス方式はこれらの欠点を克服するために2008年に考案され、継続的に研究開発が進められてきた。当初は半導体製造に用いる次世代露光技術として注目されている極端紫外光 (EUV : Extreme Ultra-violet) を発する光源を目指すべく研究開発が推進された。次世代露光向けには、波長13.5nmの極端紫外光 (EUV光) が求められ、特に安定的で高強度のEUV光を連続的に出力することが要求されていた。高出力のEUV光を得るためにはプラズマを生成し、それを多価イオンの状態に維持する必要がある。そして多価イオン状態を維持するためには、プラズマ密度が $10^{18} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 程度、プラズマ温度が10~90eV程度の高密度で高温のプラズマが必要である。プラズマ光源の発光材料としては、波長13.5nmのスペクトル純度が高いリチウムが有力候補の一つであった。しかしながらリチウムは放射光密度が低いため、現在の露光用光源のプラズマ媒質としてはあまり利用されていなかった。一方で、対向プラズマフォーカス方式のプラズマ光源では、高エネルギー密度プラズマを長時間保持し、リチウムを2価イオンの状態 (水素様) に長時間維持することが可能であると期待された。そのため、対向プラズマフォーカス装置においてプラズマ媒質としてリチウムを使用することで、波長13.5nmのEUV発光を高出力で得ること、さらにリチウムの2価イオンからスペクトル純度の高いEUV特性光を得ることが望まれ、その基礎的な実験が進められてきた。さらには、対向プラズマフォーカス方式を用いたプラズマ光源の実用化を目指すため、基礎特性の全体的な把握および高出力化や

安定化、さらには長寿命化に対する可能性評価が望まれていた。そして産業応用に向けて、プラズマ媒質供給方法の精度と材料利用効率の向上、デブリの抑制、エネルギー変換効率の向上とそれに伴う消費電力の低減などの課題克服が求められていた。プラズマフォーカス装置の応用先は半導体露光分野に限られるものではなく、EUV領域の光を利用したイメージング用の光源として、また高フルエンスの中性子を必要とするイメージング用中性子源としても有望視されていた。放電型のプラズマ装置として工学分野への応用を幅広く展開するためには、高出力に加えて高効率で安定な動作が可能で、しかも電極やスイッチング素子をはじめとする基幹構造部品が長寿命であることが要求された。よって対向プラズマフォーカス装置を産業応用する上で重要なポイントは、以下のように要約できた。

- ・ 対向プラズマフォーカスの基本的な挙動や放射基礎特性を明らかにすること
- ・ 高エネルギー密度プラズマの長パルス化の可能性を明らかにすること
- ・ 放電に伴う未利用な電磁エネルギーを回生し、基本的な効率を改善すること
- ・ 電源から高エネルギー密度プラズマへの電磁エネルギーの移動、さらには放射エネルギーへの変換過程を調べ、装置のパワーフローを定量的に明らかにすること
- ・ レーザーアブレーションにより供給したプラズマの挙動とフォーカス（マルチ）電極のトリガー特性を明らかにすること
- ・ 電極部の絶縁回復時間と電極への熱負荷を定量的に評価し、繰り返し動作の基本的な限界を明らかにすること
- ・ 単純化モデルによる検討考察を行い最大利用可能な光源出力を見積もるとともに出力の改善への指針をえること

以上の背景の下に、高エネルギー密度プラズマ生成の高効率化と高平均出力化を目指した上記の研究開発課題への取り組みが推進された。新たに考案し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において、繰り返し動作の再現性や装置寿命の向上などについて課題解決することが検討されてきた。さらに多チャンネル放電動作の再現性の向上を目的として導入したのが、レーザーアブレーションによるトリガー方式である。従来の沿面放電始動方式では放電が径方向に局在するとともに、放電始動におけるジッターが大きいという課題があった。低ジッターで複数チャンネルの電極で同時に放電始動させるには、レーザートリガーの手段が有効である。複数のレーザーアブレーションによって、径方向に対称性のあるプラズマ媒質を供給し、初期プラズマの偏りを低減することが可能となる。

プラズマ媒質の供給方法についても改善の余地があった。これまでは中心電極の中間部分に設けたプラズマ媒質をレーザーアブレーションによって供給し、放電始動と初期プラズマ生成が行われてきた。しかし連続的な放電の繰り返しによって電極が加熱し、それに伴ってプラズマ媒質の状態が変化してしまうため、電極とは独立した場所でのプラズマ媒質供給が必要であった。これらの課題を解決し、平均出力向上を目指す必要が生じていた。

また同時に、プラズマ源としての産業応用の可能性についても議論が必要であった。応用先の要求に対応して、対向プラズマフォーカス装置の可能性を見極めとともに、工学応用に向けた課題とその対策を検討する必要性が生じていた。

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。

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検討した。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チャンネルの電極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保持性能に優れたプラズマ形成が可能であることが分かった。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、媒質供給の均質化や時間制御が可能であり、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可能であることを示唆した。さらに、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。

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

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と各種の計測系を備えた光源システムを構築し、プラズマや発光の特性値測定を試みた。実験結果を基に理論的な考察を加え、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の考案当初から、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、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。

以上