

Studies on Diagnostics of Laser Produced Sn Plasmas for Extreme Ultraviolet Light Source Using Collective Thomson Scattering

佐藤, 祐太

<https://hdl.handle.net/2324/2236273>

出版情報 : Kyushu University, 2018, 博士 (工学) , 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 佐藤 祐太

論 文 名 : Studies on Diagnostics of Laser Produced Sn Plasmas for Extreme

Ultraviolet Light Source Using Collective Thomson Scattering

(協同的トムソン散乱法を用いた極端紫外光源用レーザー生成スズプラズマの診断に関する研究)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

Thesis Summary

次世代の半導体リソグラフィの光源として、波長 13.5 nm の極端紫外 (EUV) 光の実用化が求められている。EUV 光は発光効率の点から、スズ (Sn) をターゲット、CO₂ レーザーを生成用レーザーとしたレーザー生成プラズマ (Laser Produced Plasma: LPP) を光源としている。現状、実用化には EUV 光の出力が不足しており、変換効率の改善が急務である。EUV の放射は光源用プラズマの状態に大きく依存するため、変換効率の改善には Sn プラズマの状態の把握および制御が不可欠である。プラズマから放射される光スペクトルのピーク波長は、イオン価数 (Z) によって決定されるので、電子温度 (T_e) の制御が重要となる。また光量は電子密度 (n_e) に大きく依存する。先行研究によれば、光源用プラズマの最適な n_e , T_e , Z の値はそれぞれ、 10^{24} - 10^{25} m⁻³、30-50 eV、10-13 であると予測されている。しかし、これらのパラメータが実際に計測された報告はない。それは、直径約 300 μ m と微小で短命 (約 50 ns) な光源用 LPP の診断手法が確立されていないためである。このような背景のもと、本研究では、協同的トムソン散乱法を用いた EUV 光源用プラズマの診断システムを開発した。

トムソン散乱のスペクトルは、信号の強度とスペクトル幅が大きく異なる、イオン項と電子項から構成されている。電子項は波長分解および迷光除去の点で、比較的計測が容易である。しかし、プラズマからの自発光と比較して信号強度が小さく、検出が難しいという問題点がある。一方で、イオン項は自発光に比べて十分に大きい信号強度を有している。しかし、スペクトルのピーク間隔が約 200 pm と、電子項に比べて非常に狭い。さらに、ピークの間には計測用レーザーが受光系に直接入ってくることで発生する迷光があり、その強度は多くの場合、イオン項強度を上回る。そのためイオン項検出装置には 20 pm 以下の波長分解能と、レーザー波長を中心とした 40 pm 以下の波長幅を除去する迷光対策が要求される。本研究では、これらの問題を解決するシステムを開発し、イオン項を計測することで、高い変換効率を有する EUV 光源用プラズマのパラメータ構造を初めて明らかにした。ただし、この際に T_e とイオン温度 (T_i) は等しいと仮定した。また、さらに次の段階の診断手法の開発にも着手した。イオン項に加えて電子項を同時に検出することにより、 $T_e=T_i$ の仮定をすることなく、レーザー生成 Sn プラズマの n_e , T_e , T_i , Z の同時計測が可能となるシステムである。本論文はこれらの研究をまとめたものであり、以下の 5 章から構成されている。

第1章では本研究の背景や目的、本論文の構成について述べた。

第2章では協同的トムソン散乱法とレーザーによるプラズマ生成の原理について述べた。

第3章では開発したイオン項計測システムと、EUV光源用プラズマを診断した結果について述べた。スペクトル幅の狭いイオン項を計測するために、12 pmの波長分解能と、除去波長幅が28 pmで十分な迷光除去能を持つ分光器を開発した。診断対象であるEUV光源用プラズマは、プリパルスレーザーでSnの液滴ターゲットをミスト状に拡散させ、このミストにCO₂レーザーを照射することで生成された。計測システムの有用性を確認する最初の実験において、EUV光源用プラズマの診断がイオン項の計測により可能であることを初めて示した。また、開発したシステムの電子温度の検出下限が10 eVであることを確認した。

次に、高い変換効率を持つ光源用プラズマの診断を行った。CO₂レーザーの遅延時間を1.3 μs、2.0 μs、2.5 μsと変化させて実験を行った。それぞれの遅延時間での光源の変換効率は3.1%、4.0%、2.8%であった。開発した計測システムを生成したプラズマに適用することで、プラズマパラメータの二次元分布を求めることに成功した。CO₂レーザーの遅延時間は、 n_e と T_e の分布に大きく影響しており、高い変換効率を持つ光源用プラズマ(遅延時間が2 μs)では、広い空間範囲でEUV光放射に適した電子密度($n_e=(4-8) \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$)と電子温度($T_e \geq 25 \text{ eV}$)が同時に達成されていることを明らかにした。

第4章では、協同的トムソン散乱のイオン項と電子項を同時に計測するシステムの検討結果について述べた。電子項の信号強度はプラズマの自発光に比べて非常に弱いため、電子項のピーク位置を検出することに主眼を置いた。まず、Snの固体をターゲットとして生成したプラズマを対象としてイオン項の計測を行い、EUV光源プラズマのパラメータ領域にあるプラズマが形成されていることを確認した。次に、このプラズマの電子項計測を行った。ピークの信号強度が大きくなるよう散乱角を最適化した。またターゲットの配置とサイズを調整することで、検出器に到達する自発光の量を低減した。さらに、自発光と電子項の偏光特性の違いを利用して、自発光のみのスペクトルと電子項を含んだ自発光のスペクトルを同時に検出し、両スペクトルの差を取ることで電子項を抽出することも可能とした。これらにより、SN比が1を超える電子項のピークの検出に成功した。

第5章では、本研究で得られた成果を総括した。