

極端紫外および軟 X 線光源用多価電離プラズマの 協同的トムソン散乱計測 - 点光源を空間分解計測する -

Collective Thomson scattering for EUV and soft-Xray light source plasmas

九大総理工 ○富田 健太郎, 佐藤 祐太, 深田 来夢, 伊藤 文崇, , 内野 喜一郎

Kyushu Univ. ○Kentaro Tomita, Yuta Sato, Raimu Fukada, Fumitaka Ito, Kiichiro Uchino

E-mail: tomita@ence.kyushu-u.ac.jp

シリコン半導体デバイスのさらなる微細化をコスト面から支えるためには、高スループットの露光装置が不可欠であり、EUV 露光光源（波長 13.5 nm）の高出力化が強く望まれている。EUV 露光用の光源は、高温・高密度のプラズマである。レーザー生成方式や放電生成方式といった発生方式の違いはあるものの、スズやキセノンといった高い質量数の原子を、10 価程度に多価電離して得られる。プラズマを光源として使用するため、その最適化には電子密度 (n_e) や電子温度 (T_e) といった基礎パラメータを制御し、最適なイオン価数 (Z) を達成することが重要となる。しかし一般に微小 (< 1 mm)、短命 (< 100 ns) な光源プラズマの n_e, T_e, Z を十分な時間空間分解能で計測するには困難が伴う。多価電離レーザー生成プラズマの n_e, T_e, Z 計測では、協同的トムソン散乱法 (collective Thomson scattering) を用いた研究結果が多くある。協同的トムソン散乱スペクトルからは、 n_e, T_e, Z の他に、イオン温度 (T_i) やドリフト速度 (v_d)、マッハ数などを、時間空間分解で取得でき、その有用性はよく知られている。一方、そこでの計測対象は、主にレーザー慣性核融合研究や高エネルギー物理研究のためのものであり、極めて高温 ($T_e > 1$ keV)、高密度 ($n_e > 10^{26} \text{ m}^{-3}$) のものが中心である。これに対し EUV 光源プラズマは、予想される n_e, T_e は桁違いに低く ($n_e = 10^{24} - 10^{25} \text{ m}^{-3}$, $T_e = 30 - 50$ eV)、これまで十分に計測が行われた例はない。この場合の協同トムソン散乱計測は、主に T_e が低いことにより、計測レーザーによるプラズマの加熱や、スペクトル幅の狭小化が問題となる。計測レーザーにより発生する迷光の除去も大きな課題である。迷光対策が従来の協同トムソン散乱より困難な理由は、ターゲット (固体・液体) の問題だけでなく、真空チャンバーが小型になることも関連している。我々はこれらの問題に、高い波長分解能と優れた迷光除去性能を有した分光器を開発することで対処してきた。過去には炭素ターゲットを用いた予備実験を通じ、計測システムの動作確認や、プローブレザーによるプラズマ擾乱回避方法について基礎研究を行ってきた¹⁾。その後、実用化に近い形式のプラズマ (炭酸ガスレーザー + ミスト状スズターゲット) のトムソン散乱計測を行う機会を得て、高効率光源用プラズマの構造を実験的に明らかとすることを試みた^{2,3)}。トムソン散乱計測の結果、商用化に耐えうる高い変換効率 (4%) となるプラズマ生成条件では、高い EUV 発光強度 (高い Emissivity) が、プラズマ中心ではなく、むしろ周辺部で達成されていることが明らかとなった⁴⁾。

[1] K. Tomita *et al.*, *Appl. Phys. Express* **6**, 076101 (2013)

[2] K. Tomita, Y. Sato *et al.*, *Appl. Phys. Express* **8**, 126101 (2015)

[3] Y. Sato, K. Tomita *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 036201 (2017)

[4] K. Tomita, Y. Sato, S. Tsukiyama, *et al.*, *Scientific Reports* **7**, 12328 (2017)