

レーザープラズマEUV光源の原子過程、流体力学モデリング

佐々木明

量研機構

次世代半導体リソグラフィ技術やX線顕微鏡などの実現を目的として行ってきたEUV光源のモデリングの研究について述べる。波長13.5nmの光源の性能向上や、将来の短波長光源の実現のためには、シミュレーションによって、プラズマの温度、密度分布の時間発展や放出されるスペクトルを再現し、それをもとにプラズマの条件を最適化することが重要と考えられている。

原子過程シミュレーションでは、HULLACコード[1]によって求めた原子エネルギーレベル、輻射遷移確率などの原子データをもとに衝突輻射モデルを構築し、プラズマの温度、密度に対する価数の計算を行った。BiからSnまでの原子を対象に、Pd様イオンを生成し、4d-4f UTA(Unresolved Transition Array)遷移の3.97から13.5nmまでのEUV発光を得るために必要な電子温度を系統的に検討し、電子密度 $10^{21}/\text{cm}^3$ において、Snでは12eVであるがBiでは529eVまで高くなることを示した[2]。

波長13.5nmのレーザープラズマ光源の高出力、高効率化のためには、ドロップレットターゲットをピコ秒プリパルスレーザーで照射して粒子に破碎することが重要である。それによって生成した粒子の雲のような状態は、電気伝導性などにおいて特異な性質を持ち、レーザー光のエネルギーを良く吸収すると考えられる。このような粒子の雲の物性の解析と、EUV光源の特性の評価のために用いることができる流体力学モデルの研究を行っている。

流体力学シミュレーションの研究では、メッシュを物質の分布に応じて動的再配置するアルゴリズムを組み込んだ、2次元ラグランジ流体シミュレーションコードの開発を進めている。すなわち、気相中に粒子が存在する状態、液相中に気泡が存在する状態を扱えるようにし、そして、ターゲット物質の微小な領域において熱平衡状態が成り立つことを仮定し、ファンデルワールス状態方程式に基づき、複数のセルの集合において、その平均的な温度、密度に対して気液の分布が正しくなるよう、質量とエネルギーを再配分する方法によって、相転移現象を扱い、粒子や気泡が発生する過程を扱えるようにした。このようなモデルを用いて、加熱されたスズドロップレットが沸騰し、拡散する条件でのテスト計算を行い、ドロップレット中にまず微小な気泡が現れ、それが成長して物質は粒子になって分散する結果を得た。ターゲット中の気相の領域が支配的になると、それまで静止していた物質が急激に膨張し始める臨界的な特性を示すことがわかった。

References

- [1] A. Bar-Shalom, et al. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 71, 169 (2001).
- [2] A. Sasaki, et al. AIP advances, 6, 105002 (2016).