

## Atomic process and radiative transfer in plasmas of Sn to rare earth elements

佐々木 明  
Akira Sasaki

量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所

Kansai Photon Science Institute, National Institutes for Quantum Science and Technology

極端紫外(EUV: Extreme Ultra-Violet)光を用いた半導体リソグラフィ技術が実用化されたことで、レーザー生成プラズマを用いたEUV光源に対して、高い関心が持たれるようになった。現在使われている波長13.5 nmの光源の性能の向上や、将来のさらなる微細化のための短波長光源の開発の可能性が検討されている

我々は、光源として用いられるスズや希土類などの原子番号の大きな原子のプラズマ中の原子過程のモデリングを行い、発光スペクトル、効率を予測するシミュレーションの研究を行っている[1]

EUV光は、プラズマ中に生成するスズや希土類原子の10価前後のイオンが放出する、4d-4f遷移などのUTA (Unresolved Transition Array) と呼ばれる準連続スペクトルに起因する。それぞれのUTAが多数の微細構造スペクトルから構成されるとともに、プラズマ中には多数の内殻、多重励起状態が生成する

このようなプラズマの特性をモデル化するためには原子エネルギー準位や、輻射や電子衝突による電離、励起過程の反応速度定数のデータが必要である。一方、プラズマ中の原子過程は複雑であるが、観測されるスペクトルはしばしば数本のUTAから構成され、その波長や強度は原子番号、イオン価数に対して規則的に変化することも知られている[2]。つまり、モデルを構築するためには、理論計算及び実験で得られた知識を総合することが重要である

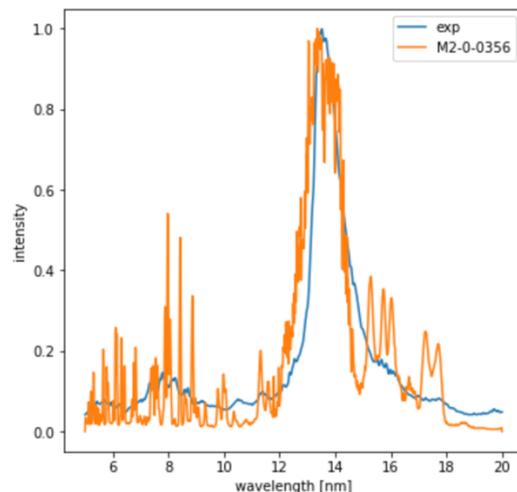
本研究では、プラズマ中に生成するイオンとその励起状態の組み合わせを、原子物理(エネルギー準位)の計算と、非相対論的電子配置の記号処理を組み合わせで予測し、それを用いた衝突輻射モデルを用いてプラズマの温度、密度に対するイオンアバンドランス、レベルポピュレーションを求めた。さらに大きさを持つプラズマに対して、エスケーププロバビリティーの方法で輻射遷移確率の低下をモデル化して衝突輻

射モデルにフィードバックし、原子過程、放射スペクトルへのオパシティの効果を取り入れた。その結果、(図)に示すように、理論計算はプラズマの光学的厚みに従うUTAの幅とバックグラウンドレベルの増加、スペクトルピークにおけるディップの生成などの特徴を再現するようになった。また電子ビームイオン源(EBIT: Electron Beam Ion Trap)などによる精密な分光観測の結果でUTAの波長を校正することで、理論計算の結果は実験と良く一致するようになった

謝辞 本研究が科研費(21H04460)及び松尾財団の支援を受けて行われたことに感謝します

## 参考文献

- [1] A. Sasaki, et al. J. Appl. Phys. 107, 113303 (2010)  
[2] A. Sasaki, et al. AIP Advances, 12, 025309 (2022).  
[3] R. Schupp, et al. Phys. Rev. Appl. 12, 014010 (2019).



(図) 実験[3]と理論計算で求められた、レーザー生成スズプラズマの発光スペクトルの比較