

EUV光源用スズから希土類プラズマの衝突輻射モデルの収束計算

佐々木 明

量研 関西研

EUV(Extreme Ultra-Violet:極端紫外)リソグラフィが実用化され、今後の半導体素子の微細化を目指し光源の高出力化、短波長化のために、スズから希土類プラズマのスペクトルを予測できるモデルの研究が行なわれている[1]。

スズのEUV発光スペクトルは、10価前後のイオンの4d-4f、4p-4d遷移などで、多数の微細構造遷移が集まって作られたUTA(Unresolved Transition Array)から放出される[2]。スズイオンの基底状態には4d軌道に複数の電子があり、それが一つずつ励起されて作られる多数の内殻、多重励起状態もまたEUV発光に寄与する。従って、そのスペクトルを予測するためには、これらの状態を適切に取り入れた衝突輻射モデルを用いることが重要である。

本研究では、まずスズイオンの原子状態が、非相対論的電子配置で表されることを仮定し、多くのポピュレーションを持つと考えられる励起エネルギーが低い状態とその一電子励起状態の組を含むモデルを構築する方法の研究を行なった。レーザー生成プラズマのような高密度状態では、電子が逐次エネルギーの高い励起状態に遷移するはしご状励起が電離に寄与し、低密度状態では電子捕獲と緩和による二電子性再結合の寄与が大きく、これらをモデルに取り入れる必要がある。

本研究では、まずイオンの励起状態のエネルギーをHULLACコード[3]で計算し、次にそのうちの決められた数をエネルギーの低いものから選び、それをコアと考えて可能な軌道に一電子を付与し、もとのイオンより価数が1少ないイオンの励起状態のグループを作るという手順でモデルを構築した。この方法を用いると、コアと考える状態の数、あるいは励起状態のレベルのグループ数によってモデルを一意が決まる。そしてグループ数を増やしてイオン価数、輻射損失の収束を得ることで、適切なモデルを求めることができると考えた。

また、収束計算を行うために、レート方程式をマルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)法で解く手法を取り入れることにより[4]、計算の性能を上げ、 10^4 個以上のレベルを含むモデルで、EUV光源用スズプラズマで想定される温度密度 ($T_e=10-50\text{eV}$, $n_i=10^{18-20}/\text{cm}^3$) の範囲での収束計算を行い、適切なモデルを求めた。

参考文献

- [1] <https://euvlitho.com/source-workshop/2022-source-workshop/>
- [2] G. O' Sullivan, et al. J. Opt. Soc. Am. 71, 227 (1981).
- [3] A. Bar-Shalom, et al. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf, 71, 169 (2001).
- [4] A. Sasaki, et al. High Energy Density Phys. 9, 325 (2013).