

トモグラフィック発光分光計測とAr衝突輻射モデルにもとづく CF₄/O₂/Arプラズマの診断 —他原子種の励起状態分布が診断結果に及ぼす影響

○山下 雄也^{1,2}, 土居 謙太³, 清田 哲司³, 叶 宇晨¹, 菊地 航行¹, 島谷 和希¹, 何 文涛¹,
羽生 陽向¹, 櫻井 彩貴¹, 根津 篤¹, 赤塚 洋¹

¹東京科学大, ²学振特別研究員DC, ³アルバック

<https://akatsuka.zc.iir.titech.ac.jp/>

1. 背景 分子性混合プラズマの原子分子過程は複雑である. そのため, 衝突輻射(CR)モデルの作成が難しく, 発光分光計測による温度・密度診断の実践を阻害する. かかる問題を解決すべく, 我々は最近, 混合プラズマ中の特定の原子種の原子分子過程のみに着目し, 当該原子種のCRモデルを用いることで, 電子温度 T_e , 電子密度 N_e , 一般化電子エネルギー分布関数のパラメータ γ を診断する方法を提案した[1]. 本報告では, 装置パラメータが, 各種原子種の励起状態数密度におよぼす依存性を検討した. さらに, それらが提案方法による診断結果に及ぼす影響を, 実験的に検討したので報告する.

2. 実験 誘導結合プラズマ装置 (アリオス製, チャンバ内寸 $\phi 355 \times H 211.8$ mm (最大部), 発振周波数 13.56 MHz (誘導結合アンテナ), 12.5 MHz (基板バイアス), ステージ外径291mm) により, CF₄/O₂/Arプラズマを生成した. 基板直上12mmの水平面内を視線とするよう, レンズ付ファイバを34本配置した. マルチチャネル分光器 (堀場製作所製UV-M135A, 焦点距離135 mm, スリット波長幅1.47 nm, 測定波長間隔0.576 nm) により大気側窓面における分光放射輝度 $L_{\text{air}}(\lambda)$ の視線依存性を測定した. 装置パラメータは, 全圧 $p = 0.8 - 3$ Pa, O₂割合= 4.8 - 20 %, Ar割合= 0 - 33 %, 高周波有効電力 $P_a = 250 - 400$ W (誘導結合アンテナ), $P_b = 0 - 100$ W (基板バイアス)と変化させた[1].

3. 解析 $L_{\text{air}}(\lambda)$ から, 窓面フレネル反射および視線屈折を考慮[2]し, 真空側窓面における分光放射輝度の視線依存性を算出した. 次に, 逐次再構成法[3]による分光トモグラフィ計算[4]により分光放出係数の位置分布を求めた. 分光放出係数から線スペクトルを機械的に分離・同定した[1]. 本研究では輝線同定アルゴリズムを改良した. 具体的には, C, F, O, Arの各中性原子の文献値を参照した. また, 分光器の波長分解能および文献から求めた隣接輝線の波長間隔を勘案して, 独立輝線とみなすしきい値を設けた. これにより, 分子性混合プラズマにおける輝線同定能力の改善を試みた. さらに, 各原子種の励起状態数密度分布の位置分布 n_i を計算した. 加えて, Arについて, 前記実験結果から求めた n_i とAr CRモデル[5]により計算した n_i とをフィッティングし, T_e , γ , N_e の空間分布を得た[1].

4. 結果と考察 本例において独立した輝線として分離・同定できた原子種はAr, Fであった. 図1に, それらの励起状態数密度の一例を示す. 装置パラメータに対する n_i 依存性は, 講演にて示す. 本実験系では, OおよびCは, 独立輝線として分離して観測できないことが明らかになった. それらは隣接輝線の波長が近接しており, 改良同定アルゴリズムの優位性が示唆される. 装置パラメータに対する T_e , γ , N_e の診断結果は, 紙面の都合上割愛する. 講演では, Fの n_i 分布が診断結果に及ぼす影響とともに, 論ずる.

謝辞 本研究は, JSPS科研費 JP23KJ0884の助成を受けた.

参考文献

- [1] 山下雄也ほか, 第85回応用物理学会 秋季講演会予稿集, 07-118 (2024).
- [2] Y. Yamashita, et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **94**, 083503 (2023).
- [3] D. R. Ferreira: <https://github.com/diogoff/istok-tomography>
- [4] Y. Yamashita, et al., *J. Vac. Sci. Technol. A*, **42**, 023003 (2024).
- [5] J. Vlcek, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **22**, 623 (1989).

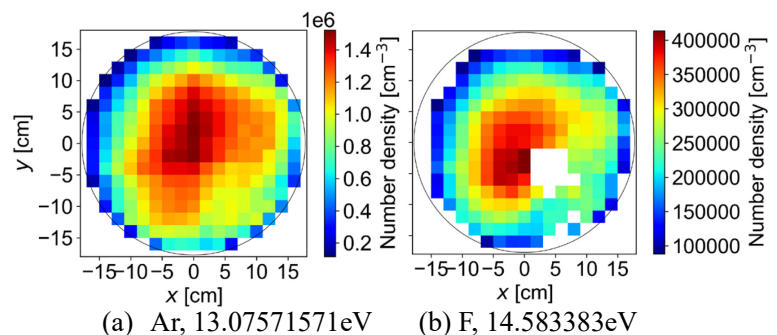


Fig.1 The dependence of excitation number density on position at $p=1$ Pa, $P_a = 400$ W, $P_b = 0$ W, CF₄: O₂: Ar = 28.5: 1.5: 1.2 sccm.