

発光分光計測による電子エネルギー分布関数診断にむけた 低気圧マイクロ波放電アルゴンプラズマの励起状態分布の解析

The excited-state distribution analysis of the low-pressure microwave discharge argon plasma
for electron energy distribution function diagnosis by optical emission spectroscopic measurement

都立産業技術研究センター¹, 東工大研究院² ○山下 雄也¹, 赤塚 洋²

TIRI¹, Tokyo Tech², ○Yuya Yamashita¹, Hiroshi Akatsuka²

E-mail: yamashita.yuya@iri-tokyo.jp

1. はじめに

電子エネルギー分布関数(EEDF)の発光分光計測(OES)による診断の実現が求められている。本研究では低温非平衡プラズマにおいて、EEDFが励起状態分布におよぼす影響を解析し、OESによる診断にむけた検討を行ったので報告する。

2. Langmuir プロブによる EEDF 測定

発振周波数 2.45 GHz, 圧力 $p = 133\text{Pa}$, 放電管半径 $r = 13\text{mm}$ のマイクロ波放電アルゴン表面波プラズマを対象に、非対称 Langmuir ダブルプローブ計測を行い Druyvesteyn 法[1]により Fig.1 (A)に示す EEDF を得た[2]。これより等価な電子温度 $T_e = 2\langle \epsilon \rangle / 3k_B = 5.06\text{ eV}$, 電子密度 $N_e = 3.45 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$ と算出された。なお図では EEDF $F(\epsilon)$ を, $2\pi(2k_B T_e/m_e)^{3/2} \int \sqrt{u} f(u) du = 1$ (ただし $u = \epsilon/k_B T_e$) で規格化[3]した電子エネルギー確率関数 (EEDF) $f(\epsilon) = F(\epsilon)/\sqrt{\epsilon}$ で示した。

3. 衝突輻射モデルに基づく励起状態分布解析

アルゴン衝突輻射(CR)モデル[3]は T_e, N_e , 原子温度 T_a , イオン密度 N_i, r, p および EEDF を入力として, 励起状態数密度 n_i 分布を求める原子過程モデルである。ただし i は準位番号[3]である。 $T_a = 500\text{ K}$, $N_i = N_e$ と仮定した。 T_e および N_e は上記 2. の結果を用いた。 EEDF は(A)上記 2. の実測値, (A)に等しい T_e, N_e を有する(B) Maxwell 分布および(C) Druyvesteyn 分布を仮定し, CR モデルにより reduced population density n_i/g_i を求めた (Fig. 2)。 n_i/g_i の標準偏差 $\sigma(n_i/g_i)$ により定義される EEDF に対する変動係数(coefficient of variation): $C_v(n_i/g_i) = \sigma(n_i/g_i)/\overline{(n_i/g_i)}$ を求めたところ Fig. 2 ● のとおりとなった。

4. 考察

$C_v(n_i/g_i)$ の準位依存性の結果から, 準位 ($3d^3[3/2]^{\circ}2+ [5/2]^{\circ}2,3) - 16s', p', d', f \dots$ (Racah 記号) において, EEDF の違いによる n_i/g_i のばらつき

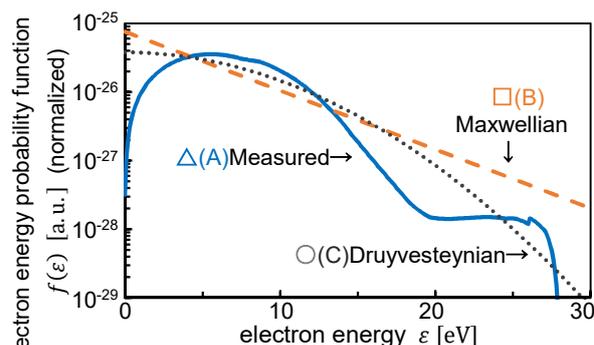


Fig. 1 The Electron energy probability function

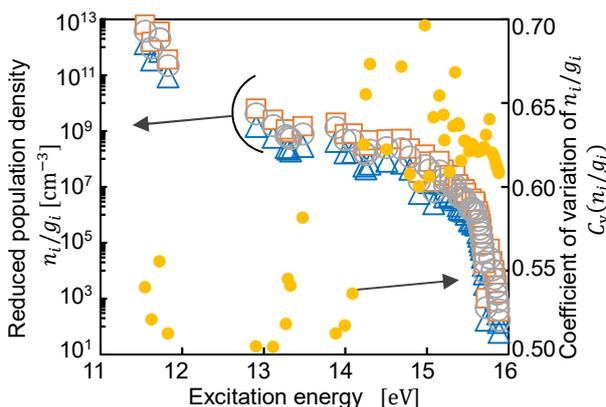


Fig. 2 The EEDF dependence of the excited-state distribution

が大きいことがわかる。これらの準位を用いることで EEDF 診断が行える可能性がある。なお, $C_v(n_i/g_i)$ が最も大きい $3d^3[3/2]^{\circ}1$ と次いで大きい $6s'[1/2]^{\circ}1$ はともに OES で n_i が直接計測可能な準位である。しかしながら OES で直接計測できない n_i もあるので, 定量的な EEDF 診断のためには, 多数本の発光線スペクトル強度を取得して CR モデルに基づいて逆算[2]する必要がある。 EEDF を未知変数パラメータ[4]とする診断モデルの体系的な解明が課題である。

参考文献

- [1] M.J. Druyvesteyn, Z. Phys. **64**, 781 (1930).
- [2] Y. Yamashita et al., Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 016004 (2019).
- [3] J. Vlček, J. Phys. D:Appl. Phys. **22**, 623 (1989).
- [4] R. Kashiwazaki et al., Jpn. J. Appl. Phys. **41**, 5432 (2002).