

低気圧酸素プラズマ中の励起状態密度分布に与える電子エネルギー分布関数の影響

Effect of EEDF on the Excitation Kinetics of Low-Pressure Discharge Oxygen Plasma

今野潤哉, 根津篤, 松浦治明, 赤塚洋

Junya KONNO, Atsushi NEZU, Haruaki MATSUURA, Hiroshi AKATSUKA

東工大原子炉研

Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology

本研究では、酸素プラズマ中の励起状態生成消滅のカイネティクス、および励起状態の数密度に着目する。そして、特に電子エネルギー分布関数 (EEDF) の影響について考察する。すなわち、電子衝突励起速度係数は電子温度 T_e の関数として記述すべきでなく、EEDF の関数である事の重要性を確認したい。そこで、定常放電時における以下の8種類の状態の数密度について生成消滅の反応モデリングを行う。すなわち、 $O_2(X^3\Sigma_g^-)$, $O_2(a^1\Delta_g)$, $O_2(b^1\Sigma_g^-)$, O^- , O_3 , O_2^+ , $O(^3P)$, $O(^1D)$ である。ここでの入力値は、放電気圧 P , ガス温度 T_g , 電子密度 N_e , 及び換算電界 E/N である。本研究では [1, 2] にない、 T_g を調節して与えられた $P, N_e, E/N$ と矛盾の無い様にした。

図 1 に、 $T_g = 0.15$ eV, $P = 1.0$ Torr とした時の計算結果を示す。本研究の酸素プラズマの EEDF は高エネルギーテールが Maxwell よりも枯渇するような分布となっている。テールとバルクをわけるエネルギーはおおよそ 7–8 eV であり、このエネルギー付近で酸素分子振動励起状態の生成断面積が大きい値を取る事が原因であると考えられる。図 2(a)-(b) は、酸素プラズマ中の各原子分子種のプロットであるが、(a) では、 $O_2(X^3\Sigma_g^-) + e^- \rightarrow O(^3P) + O(^1D) + e^-$ の反応速度を電子温度 T_e の関数として与えた。上式の T_e は電子平均エネルギーの 2/3 倍とした。一方 (b) では Boltzmann 方程式の解としての EEDF を用いて反応速度係数を求めた。(a) では、 $O(^1D)/O(^3P) \simeq 0.013 - 0.014$ となり、類似の実験研究 [3] と比較しても小さい値で、良い結果と言えない。(b) では $O(^1D)/O(^3P) \simeq 0.032 - 0.035$ と類似の実験研究とも矛盾の無い値となり、EEDF の理論検討における重要性が理解される。さらに、(b) の場合、低換算電界 ($E/N = 90$ Td) 放電時に、電子密度と負イオン密度が同一オーダーになるような事例も計算で捉えられているが、(a) ではそのような結果は導かれぬ。電子の高エネルギー成分が図のように低 E/N で急激に枯渇するため、このような結果が導かれるのであり (高エネルギーが多いと逆過程も進むため釣り合いが崩れ、電子数が多いかのような結果が得られてしまう) EEDF を個別に計算する事の重要性を示している。

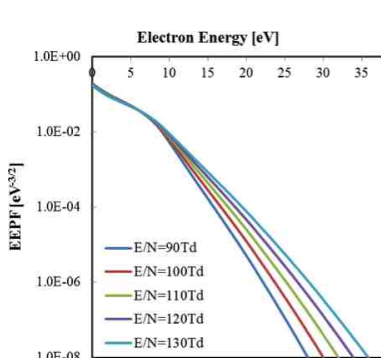


図 1 Boltzmann 方程式の解としての酸素プラズマ EEDF。

$T_g = 0.15$ eV, $P = 1.0$ Torr.

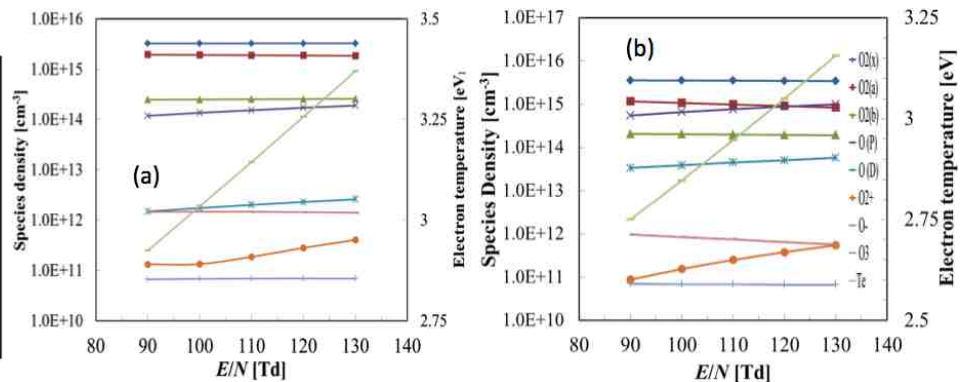


図 2 換算電界の関数としての各原子分子種の数密度計算結果。(a) は $O_2(X^3\Sigma_g^-) + e^- \rightarrow O(^3P) + O(^1D) + e^-$ の速度係数を T_e の関数として求め、(b) では EEDF を用いて求めた。 $T_g = 0.15$ eV, $P = 1.0$ Torr.

- [1] T. Sakamoto, H. Matsuura, and H. Akatsuka, J. Adv. Oxid. Technol. 10 247 (2007).
- [2] Y. Ichikawa, T. Sakamoto, H. Matsuura, and H. Akatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. 49 106101 (2010).
- [3] T. Kitajima, T. Nakano, and T. Makabe, Appl. Phys. Lett, 88 091501 (2006).