

大気圧非平衡プラズマの連続スペクトル発光分光計測のその後の展開—電子エネルギー分布関数の測定

Optical emission spectroscopy of non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas—measurement of electron energy distribution function

東工大 大西 広, 山崎 文徳, 箱崎 喜郎, 竹村 将沙樹, 根津 篤, ○赤塚 洋

Tokyo Tech., H. Onishi, F. Yamazaki, Y. Hakozaiki, M. Takemura, A. Nezu, and ○H. Akatsuka

E-mail: hakatsuk@zc.iir.titech.ac.jp

[はじめに] 本発表では、第40回応用物理学会論文賞受賞論文[1]を紹介するが、既に第20回プラズマエレクトロニクス賞受賞により論文紹介を行なったので[2]、当該研究論文のその後の展開成果を講演する。即ち、連続スペクトル発光分光計測により、大気圧非平衡プラズマの電子エネルギー分布関数(EEDF $F(\epsilon)$, ϵ は電子エネルギー)を求める解析手法の開発研究について、最近の成果を報告する。

[実験] 図1のような2重石英管放電装置により大気圧非平衡 Ar プラズマを生成し、絶対較正済測定系で発光分光計測を実施した。その結果、図2のような連続スペクトルが得られ、これを解析する[1-3]。

[理論的解析] 実用的な低温大気圧非平衡プラズマの放つ連続スペクトルは、ほぼ電子-原子制動放射によるもので、その分光放射率 $\epsilon_{ea}(h\nu)$ は以下のようになることが既に示されている[1]。

$$\epsilon_{ea}(h\nu) = \int_{h\nu}^{\infty} R(h\nu, \epsilon) f(\epsilon) d\epsilon, \quad (1)$$

h は Planck 定数、 ν は光子振動数、 $R(h\nu, \epsilon)$ はカーネル関数で

$$R(h\nu, \epsilon) = \frac{N_a \alpha}{3\pi^2 h} \left(\frac{2}{m_e c^2} \right)^{3/2} (h\nu)^2 \left(\epsilon - \frac{h\nu}{2} \right) \sqrt{\epsilon - h\nu} Q_{ea}^m(\epsilon) \quad (2)$$

で与えられる。 N_a は標的原子密度、 α は微細構造定数、 m_e は電子質量、 c は光速、 $Q_{ea}^m(\epsilon)$ は標的原子の運動量移行断面積である。式(1)は第1種 Volterra 積分方程式であるが、計測可能な波長範囲、即ち式(1)左辺の分光放射率 $\epsilon_{ea}(h\nu)$ の引数の範囲は $h\nu_{\min} \leq h\nu \leq h\nu_{\max}$ に限られるため、方程式も不完全 Volterra 積分方程式となり、一般的ソルバーは使用できない。そこで目的関数である Fitness パラメータを最小化する様、EEDF $f(\epsilon)$ を電子エネルギー空間中に離散化して求める手法を、機械学習の1手法として考案した[3]。

[結果及び考察] 以上の結果として、大気圧非平衡 Ar プラズマの EEDF 測定結果を、電極間印加電圧をパラメータとして、図3に示す。結果として、 $\epsilon = 2.8$ eV 付近に折れ曲がりを持つ2温度 Maxwell 分布に近い形が得られた。バルク成分は $T_e \approx 0.26 - 0.29$ eV 程度、テール成分は $T_e \approx 2.2 - 3.0$ eV 程度であった[4]。

なお、式(1)からわかる様に、この方法では電子エネルギーに関し低エネルギー側 $\epsilon < h\nu_{\min}$ の範囲については何らの情報も得られない。また高エネルギー側 $\epsilon > h\nu_{\max}$ では、電子情報は得られるものの被積分関数の値 $R(h\nu, \epsilon) f(\epsilon)$ が相対的に小さく、 $h\nu_{\min} \leq \epsilon \leq h\nu_{\max}$ の範囲に比べると、その精度が乏しくなることが判明し、図3程度の離散化が妥当な計算設定条件であることも見出された[4]。

[1] H. Onishi, F. Yamazaki, Y. Hakozaiki, M. Takemura, A. Nezu, and H. Akatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. **60**, 026002 (2021).

[2] 大西 広, 山崎 文徳, 箱崎 喜郎, 竹村 将沙樹, 根津 篤, 赤塚 洋, 第83回応用物理学会秋季学術講演会, 21a-B200-2 (2022).

[3] T. van der Gaag, H. Onishi, and H. Akatsuka, Phys. Plasmas, **28**, 033511 (2021).

[4] T. van der Gaag, A. Nezu, and H. Akatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. **61**, 076004 (2022).

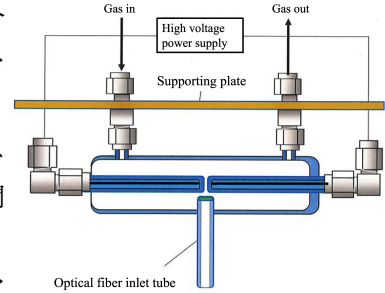


図1 大気圧非平衡プラズマ生成装置[1]. ©(2021) IOP

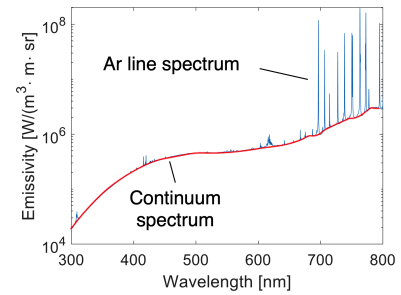


図2 連続スペクトル計測結果. 赤線は線スペクトルを消去したもの[3]. ©(2022) IOP

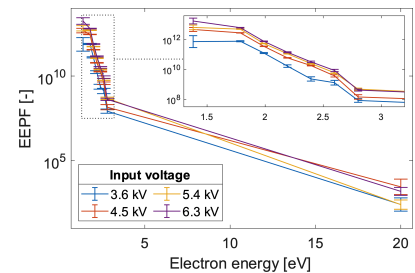


図3 電子エネルギー確率関数 $f(\epsilon)$ の計測結果[4]. ©(2022) IOP