

超短パルスレーザーを用いた電場の遠隔計測

Remote sensing of electric field using ultrashort laser pulses

藤井 隆^{1,2}, 鈴木 大樹², 山崎 修平², 江藤 修三¹, アレクセイ ジドコフ¹, 堀田 栄喜², 根本 孝七¹
Takashi Fujii^{1,2}, Daiju Suzuki², Shuhei Yamasaki², Shuzo Eto¹, Alexei Zhidkov¹, Eiki Hotta², Koshichi Nemoto¹

¹電力中央研究所, ²東京工業大学

¹Central Research Institute of Electric Power Industry, ²Tokyo Institute of Technology

Abstract: Since the excitation of molecules by electron collisions in the presence of an external electric field depends on the field strength, the emission of molecules in the ultraviolet range is expected to be sensitive to the field strength. We investigated the relationship between the external electric field and the fluorescence intensities of nitrogen molecule when the laser energy was changed. The increase of the fluorescence intensity started at the lower external electric field, down to ~ 2 kV/cm, with the higher laser energy.

1. はじめに

大気中における電場分布を、遠隔において非破壊で時間分解計測することができれば、雷現象等地球物理の研究や、電気設備の設計、診断、保護技術は一層発展すると考えられる。我々はこれまで、超短パルスレーザー誘起フィラメントプラズマ^[1,2]中窒素分子発光強度の外部電場依存性を利用した電場の遠隔計測を提案し、その基礎特性を測定してきた^[3-5]。

外部電場中においてフィラメントプラズマは紫外領域で発光する。電場中にプラズマが存在すると、電離、励起、再結合、付着等、大気中において様々な物理過程が生じるが、分子の電子-電子遷移を励起できる電子の数は外部電場強度と共に指数関数的に増加する。このため、外部電場中にプラズマが存在すると、分子のイオン化や励起が促進される一方、プラズマの再結合は緩和される。電子衝突によりプラズマは加熱され、プラズマからの紫外発光の強度と寿命は増加すると考えられる。従ってプラズマの紫外発光はプラズマが存在する空間における電場計測に有用である。

今回、フィラメントプラズマ中窒素分子発光強度の外部電場依存性の、レーザーエネルギー強度に対する特性を測定したので報告する。

2. 実験系

実験配置を Fig.1 に示す。高压電極には直径

60mm の球を用い、その先端から 130mm 離れた位置に直径 220mm の円盤を接地電極として設置した。パルス幅 70fs、繰り返し 10Hz の Ti:Sapphire レーザーパルスを、焦点距離 2m の凹面鏡を用いて集光し、フィラメントプラズマを生成した。レーザー光軸と高压電極との間隔は 5mm とした。高压電極には負極性直流電圧を最大-80kV まで印加した。

フィラメントプラズマからの発光は、高压電極から 1m の距離に設置したレンズによりコリメートした後、光ファイバを通して焦点距離 300mm の分光器 (Roper Scientific; SP-2358-P) により分光し、インテンシファイヤ付 CCD (ICCD) カメラ (Roper Scientific; PI-MAX: 1K-UV-MgF2) により受光した。

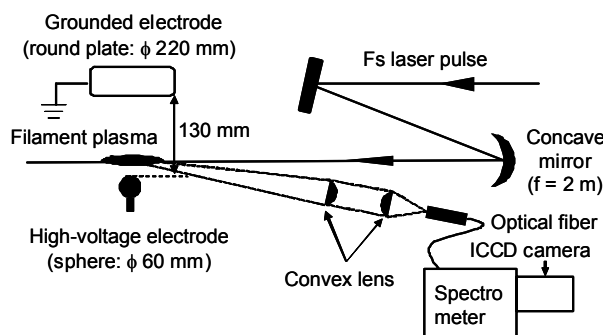


Fig. 1. Experimental setup.

3. 実験結果

分光計測により得られた、波長 337.1nm における窒素分子の第2正帯 ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$) の発光スペクトルを Fig.2 に示す。この時、レーザーエネルギーは 180mJ であった。印加電圧が 0kV の時に比べて -80kV の場合、発光強度が明らかに増加していることが分かる。レーザーエネルギーを 90mJ、135mJ、180mJ と変化させた時の、発光強度の印加電圧依存性を Fig.3 に示す。図中の電場強度 E は、高压電極に最も近いフィラメント位置における値 (以下、フィラメント位置での電場強度と呼ぶ) であり、

$$E = -U_0 D / (2R^2) \quad (1)$$

により求めた。ここで、 U_0 は印加電圧、 D は球電極の直径、 R は球電極中心からの距離である。

図より分かるように、発光強度は外部電場に対して指数関数的に増加した。さらに、レーザーエネルギーを増加すると全体的に発光強度が増加し、それに伴い、より低い電場において発光強度の増加が開始していることが分かる。レーザーエネルギーが 90mJ の時には、窒素分子の発光強度は、フィラメント位置での電場強度が 7.3kV/cm ($U_0 = -30kV$) まではほとんど変化が観測されなかったが、レーザーエネルギーが 180mJ の時には、電場強度が 2.4kV/cm ($U_0 = -10kV$) 以上において、発光強度の増加が開始することが示された。これは、フィラメントプラズマにより供給される初期電子数が増加したためと考えられる。

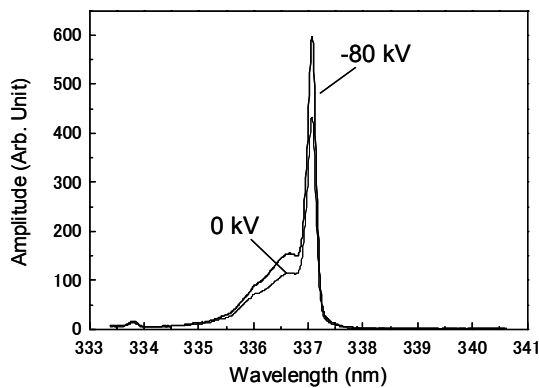


Fig. 2. Fluorescence spectra of N_2 molecules in the vicinity of filament plasma at the applied voltage of 0kV and -80kV.

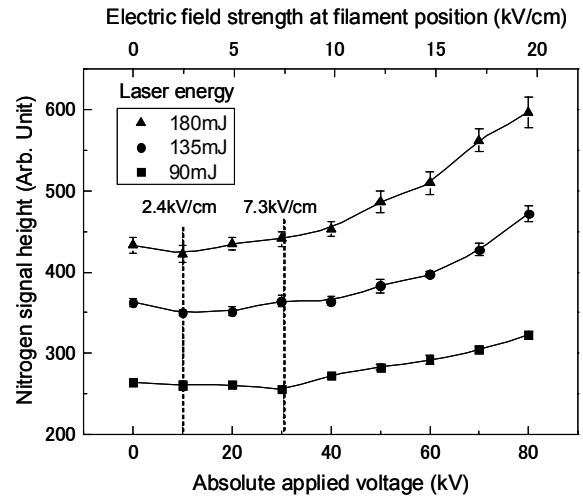


Fig. 3. Applied voltage dependence of N_2 fluorescence intensity when the laser energy is changed.

4. まとめ

超短パルス高強度レーザーにより誘起されるフィラメントプラズマを外部電場中に生成し、プラズマの発光スペクトルの計測を行った。窒素分子の発光強度は外部電場に対して指数関数的に増加した。さらに、レーザー強度を増加することにより、外部電場が 2.4kV/cm 以上において、発光強度の増加が開始することが示された。

参考文献

- [1] A. Braun et al, "Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air", *Opt. Lett.* **20**, pp. 73-75 (1995).
- [2] A. Couairon and A. Mysyrowicz, "Femtosecond filamentation in transparent media", *Phys. Rep.* **441**, pp. 47-189 (2007).
- [3] 杉山 他、第27回レーザーセンシングシンポジウム予稿集、pp. 40-41、2009.
- [4] K. Sugiyama et al., "Laser-filament-induced corona discharges and remote measurements of electric fields", *Opt. Lett.* **34**, pp. 2964-2966 (2009).
- [5] K. Sugiyama et al., "Submicrosecond laser-filament-assisted corona bursts near a high-voltage electrode", *Phys. Plasmas* **17**, 043108 (2010).