

## 不同电极结构下介质阻挡放电电离特征的试验研究

宋 鹏<sup>1,3</sup>, 张 维<sup>2</sup>, 陈 雷<sup>2\*</sup>, 王晓放<sup>1</sup>, 隆武强<sup>1</sup>

1. 大连理工大学能源与动力学院, 辽宁 大连 116023
2. 沈阳航空航天大学航空航天工程学院, 辽宁 沈阳 110136
3. 大连民族大学机电信息工程学院, 辽宁 大连 116605

**摘 要** 由于具有工作气压高、放电均匀等特点, 大气压介质阻挡放电成为近年来非平衡等离子体领域研究的主要技术。电极结构是电离特性的主要影响因素之一, 因此, 通过电极结构优化来改善电离特性, 对等离子体放电设备的应用领域拓展及性能优化至关重要。为改善大气压介质阻挡放电的电离特性, 产生高活性、高均匀性的低温等离子体, 基于自主设计的同轴介质阻挡放电装置进行了不同电极结构的电离试验及参数诊断; 在一个标准大气压、放电频率 11.4 kHz、放电峰值电压 5.4~13.4 kV 条件下进行了氩气电离试验; 采用原子发射光谱法(AES)对氩等离子体谱线的激发、分光进行了检测分析; 研究了螺纹电极、齿状电极、圆柱电极放电的特征光谱参数及外施电压对介质阻挡放电特征参数的影响。结果表明, 齿状电极放电所形成等离子体的放电强度更大且放电效果显著, 电子平均能量利用率低, 电子激励温度弱于圆柱电极; 圆柱电极放电强度较弱, 但易形成大面积均匀性等离子体; 大气压环境下电子激励温度不因外源电压的升高而单调递加, 这表明通道内微放电的主要特征并不依赖于外施电压的供给, 而是取决于电极结构、气体组份、气体压强; 增大外施电压仅能增加单位时间内微放电的数量, 经整合电子激励温度可达 3 500 K, 符合典型的低温等离子体特征。

**关键词** 大气压; 介质阻挡放电; 电极结构; 光谱诊断; 电子激励温度

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)02-0410-05

### 引 言

大气压介质阻挡放电作为低温等离子体源的重要分支, 具有适宜的化学反应、易调控的放电过程、可靠的能量利用率和稳定均匀的放电模式等诸多优势, 在点火助燃、污染物排放、材料表面改性、医学治疗等领域均有良好的应用潜力<sup>[1-2]</sup>。大气压介质阻挡放电融合了传热、传质、流动等过程, 改变了放电模式, 呈现出局部放电效果更显著、电子与其他粒子碰撞更加强烈等特性, 近年来相关研究得到了迅猛发展。董丽芳等<sup>[3]</sup>研究了 DBD 斑图动力学及其特性; Tropea 等<sup>[4]</sup>初次探索研究了介质阻挡放电气动激励延长了层流-湍流转捩的飞行时长; Keidar 等<sup>[5]</sup>研究了低温等离子体活性物质与癌细胞的相互作用; 陈思乐等<sup>[6]</sup>等采用低温等离子体技术来处理柴油机尾气, 利用其高能电子及活性物质实现污染物降解、转移; Nadia 等<sup>[7]</sup>研究了常压燃烧器中等离子体火

焰的相互作用机理。目前, 等离子体的非线性动力学分析、参数调控机制、大范畴均匀性及工艺技术开发等问题尚亟待解决。

在等离子体试验研究中, 对等离子体基本参量(电子密度、电子温度、化学活性物质)的诊断尤为关键。这些参量不仅能够直接反应等离子体形成过程的时空演变及空间效应<sup>[8-9]</sup>, 而且对优化等离子体设计工艺及产生机理起到决定性作用。目前, 发射光谱法、ICCD 图像法、Langmuir 探针法等被动诊断法占主导地位, 这些方法可以快捷捕捉到放电通道内等离子体的时空演变形态并分析参数种类及分布。在等离子体放电试验研究中, 电极结构对等离子体电离特性影响很大; 根据等离子体技术的具体应用领域, 采用合适的电极结构对电离效果的优化十分重要。然而, 目前尚未有此类试验研究的结果报道。

本文采用自主研发的 DBD 等离子体发生装置, 进行了电离特性实验研究, 分析了电极结构对电离特性的影响规

收稿日期: 2018-04-01, 修订日期: 2018-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409158, 51509035), 辽宁省自然科学基金重点项目(20170540693)资助

作者简介: 宋 鹏, 1978 年生, 大连理工大学能源与动力学院高级工程师 e-mail: 279972560@qq.com

\* 通讯联系人 e-mail: yuruntianqi@163.com

律;调节外施电源输出电压,以原子发射光谱法为手段对  $T_e$  进行了诊断。

## 1 实验部分

### 1.1 装置及参数

本研究采用的实验装置如图 1 所示。其中,等离子体发生器采用自主设计的同轴电极介质阻挡放电装置,接地电极的材质为紫铜,直径为 20 mm、长度 150 mm,外电极采用铜网形状连接高压接线端,介质层选用厚度为 2 mm 的石英玻璃,其直径为 30 mm、长度 200 mm,放电间隙为 3 mm;采用南京苏曼公司产 CPT-2000K 微秒脉冲型低温等离子体电源为电极供电,放电电流电阻采样阻值为 50  $\Omega$ ,主要用于测量放电时电流的瞬时值, Tektronix-TDS1002 型数字示波器被用来采集电压、电流及放电频率等参数;氩气(浓度为 99.99%)由氩气瓶供给;采用 AvaSpec-ULS2048 型光纤光谱仪捕捉光谱信息,经计算机储存并记录。

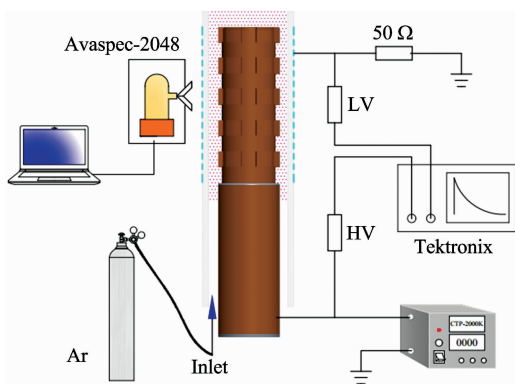


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

研究所选接地电极具体形状及结构如图 2 所示,研究中分别采用螺纹、齿状、圆柱三种电极结构。三组电极的长度为 150 mm、外径为 20 mm、有效放电长度为 75 mm,螺纹电极螺距 1.5 mm、牙深 2 mm,最大放电间隙 5 mm;齿状电极齿的径向与横向排布均为 6 组,每一齿高度为 2 mm、长宽均为 5 mm、齿间距为 5 mm,最大放电间隙 5 mm;圆柱电极

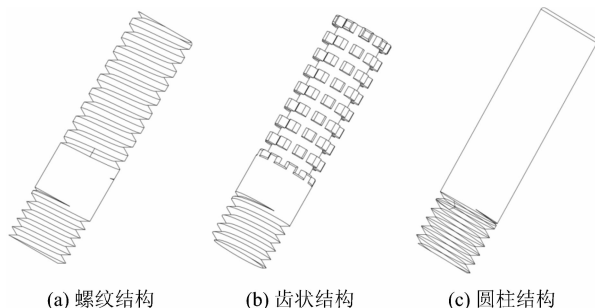


图 2 接地电极结构图

Fig. 2 The grounding electrode structure

- (a): Threaded electrode; (b): Toothed electrode;  
(c): Cylindrical electrode

标准对比电极,放电间隙尺度均匀且为定值 3 mm。

### 1.2 数据处理

实验前,使用汞灯对光谱仪的波长分辨率和波长精度进行标定,并使用钨灯对光谱仪的光谱相对响应进行标定,用经标定的光谱仪在石英观测窗口捕捉并存储系列 Ar 等离子体谱线。由于介质阻挡放电等离子体光谱的复杂性,无关电路系统产生的电场、磁场和气流流动常常会引起光谱的变动,因此必须对所得光谱信息进行数据汇总、分析及平滑处理。Ar 等离子体光谱处理流程为:数据预处理(尽可能消除光谱噪声振动、挑选波长与谱区范围及光谱数据平滑等)→前处理(对谱线的一些重要参量进行解析)→数据计算(采用 EES 软件进行快速辅助计算)。光谱处理流程图如图 3 所示。

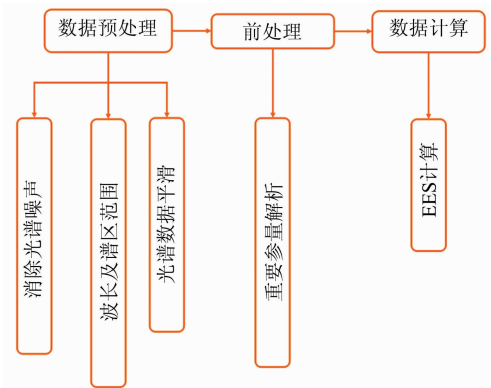


图 3 光谱处理流程图

Fig. 3 Flowchart of spectral processing

## 2 结果与讨论

### 2.1 电学特性

保持放电频率在 11.4 kHz,实验初始电离的电压值为 5 kV 与气隙电离电压经验公式计算结果相一致。

在同轴放电过程中忽略边缘影响,外加电压在气隙空间的电场强度表达式为

$$E_g = \frac{U}{r} \times \left( \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{\xi_g}{\xi_d} \ln \frac{R_3}{R_2} \right)^{-1} \quad (1)$$

式中,  $\xi_g$  为 Ar 介电常数,  $\xi_d$  为石英玻璃介电常数,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  分别为内电极半径、石英层内外半径,  $r$  为放电间隙与同轴电极轴心之间的距离。以最小放电间隙 3 mm 为标准,计算放电间隙距轴心距离为 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 和 1.3 cm 的五个径向点的电场强度如图 4 所示。其中图 4(a)为圆柱结构的电场强度,图 4(b)为螺纹及齿轮结构的近似电场强度。结果显示,外施电压在微放电通道中产生的外电场与电压成线性增长关系,随着放电间隙距轴心距离的增大,外电场强度减小且增长趋势变缓;外施电源提供给螺纹及齿轮结构的电场强度低于圆柱结构的场强。这种电场强弱分布直接影响着电子、离子及自由基的分布与运动路径。

### 2.2 光谱学特性

选取放电峰值电压为 11.4 kV、放电频率为 11.4 kHz 条件下的 Ar 等离子体的特征光谱信息如图 5 所示,图 5(a), (b)和(c)分别为螺纹结构、齿状结构、圆柱结构接地电极形

成的 Ar 等离子体特征谱线。如图所示, Ar 等离子体谱线的波长范围在 680~800 nm 之间, 当波长在 696.54 nm 时谱线强度值最大, 此时称 Ar I 696.54 为中心波(灵敏线); 齿状电极放电所释放的谱线强度最强, 圆柱状电极形成光谱的强度最弱, 这是由于氩气流经齿状电极时在凹陷处形成一个压

力降低区, 齿状电极和螺纹电极放电类似于柱网放电, 从而使得电离效果更佳。依据光谱谱线的波长确定 Ar 等离子体中对应激发态的能级分布 ( $2P_1, 2P_2, 2P_3, 2P_5, 2P_6, 2P_7$ ); 依据谱线的特定波长和波峰相对强度来计算电子温度。

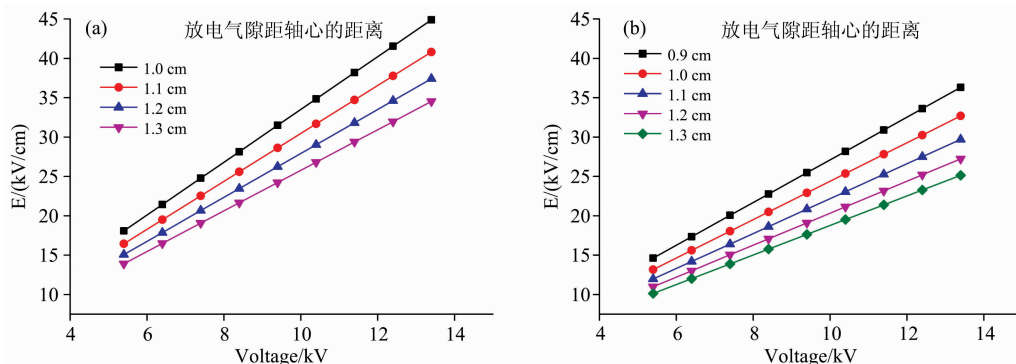


图 4 放电气隙内电场随外施电压的变化关系

(a): 圆柱结构; (b): 螺纹及齿轮结构

Fig. 4 Relationship between electric field in the discharge air gap and the external applied voltage

(a): Cylindrical electrode; (b): Threaded and toothed electrode

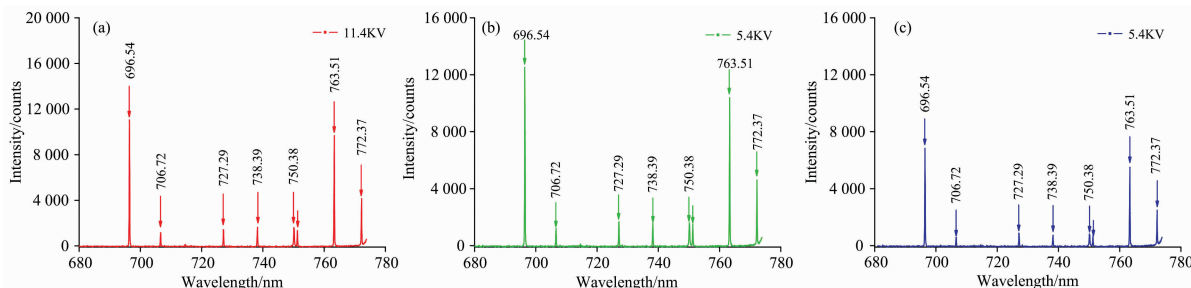


图 5 在电压为 11.4 kV 下氩等离子体特征发射光谱信息

(a): 螺纹结构; (b): 齿状结构; (c): 圆柱结构

Fig. 5 Characteristic emission spectrum information of argon plasma under the voltage of 11.4 kV

(a): Threaded electrode; (b): Toothed electrode; (c): Cylindrical electrode

以实验所采选的电极为参量绘制 Ar I 696.54 中心波随外施电压变化的特征谱线图如图 6 所示。图示可知三组电极放电谱线中心波随电压变化呈现先增长、后逐渐变缓的趋势。这表明随着外施电压增大到一定值后, 微放电通道内高

速电子向高压电极移动并附着在介质层上形成反向内部场强。此时内部反向场强减弱、并抵消外部场强, 电子碰撞频率得到减缓、使得激发态氩原子退激, 所释放的光子数量趋于稳定; 齿状电极放电中心波强度值最大, 圆柱电极放电谱线的中心波强度值最小。

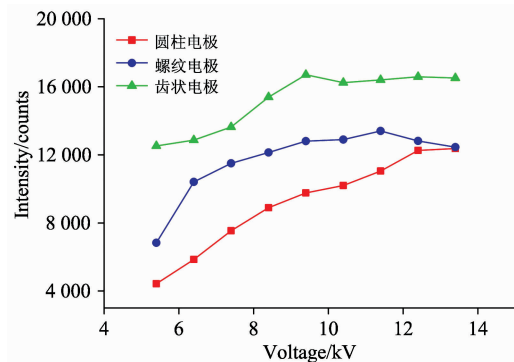


图 6 中心波随外施电压变化的特征谱线图

Fig. 6 Characteristic spectral lines of central wave changed with external applied voltage

### 2.3 电子激励温度

综合上述处理方法以及实验数据的分析, 采用 Boltzmann 法分析并计算 Ar 等离子体的电子激励温度。为降低实验误差, 选取的谱线能级差要求尽可能大。依据谱线选取原则, 选取最大与最小能级的谱线 13.48 和 13.15 eV 各一条, 挑选中心能级的两条谱线分别为 13.17 和 13.3 eV 共四条谱线, 所选谱线具备整体性、可靠的拟合性、低误差等特征。所选谱线具体特性参数为 706.72 nm ( $2p_3 \rightarrow 1s_5$ ), 750.38 nm ( $2p_1 \rightarrow 1s_2$ ), 763.51 nm ( $2p_6 \rightarrow 1s_5$ ), 772.37 nm ( $2p_7 \rightarrow 1s_5$ )。选择圆柱状电极放电特征参数为例对其拟合获得 Boltzmann 图如图 7 所示。图示 Ar 等离子体谱线对应的数据点都均匀分布在 Boltzmann 关系线的两侧, 一元线性拟合程度较高; 随着电压的升高, 拟合直线趋于向上偏移趋势。

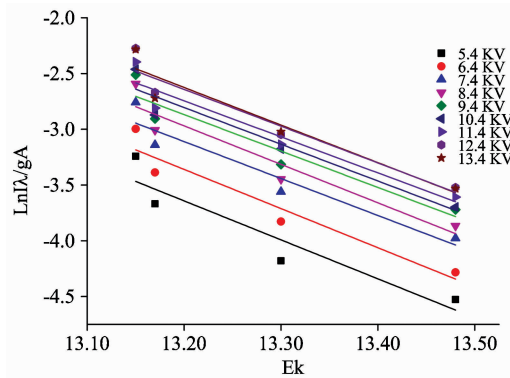


图 7 氩等离子体玻尔兹曼拟合直线图

Fig. 7 Boltzmann linear fitting of argon plasma

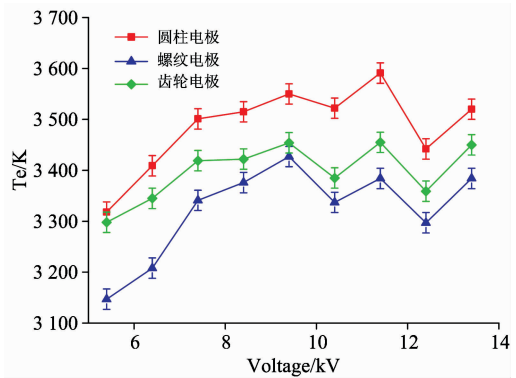


图 8 放电峰值电压、电极形状与电子激励温度三者之间的走势关系

Fig. 8 The relationship between peak voltage, electrode shape and electron excitation temperature

大气压下放电频率为 11.4 kHz, 放电峰值电压由 5.4 kV 增长到 13.4 kV(间隔 1 kV), 共九个档次。选取圆柱状、齿状、螺纹状接地电极进行电离实验, 以拟合直线斜率为基础, 经 Boltzmann 计算关系式整理最终得到放电峰值电压、电极形状与电子激励温度三者之间的走势关系如图 8 所示。由图可知, 当电离电压位于 5.4~9.4 kV 之间时, 随着外源电压的增加电子激励温度呈增长趋向。大气压介质阻挡放电中, 一定区间内随着峰值电压的增大放电功率增加、且放电做功主要耦合给电子, 因此电子平均能量增加(即电子激励温度增大); 在外施电压为 10.4 和 12.4 kV 两个工况下, 电子激励温度出现谷值, 这表明随着外施电压增大, 微放电通道内高速电子向高压电极移动并附着在介质层上形成反向内部场强, 此时内部反向场强减弱、并抵消外部场强, 致使电子平均能量损耗, 电子激励温度降低。综上所述, 对常用放电频率下的介质阻挡放电, 随着外施电压的增大电子激励温度不总是呈现增长趋势, 这一结果与等离子体电子温度仅依赖于放电气压、几何模型尺度以及电离气体等因素、而与放电功率及外加电压无直接关系的结论相吻合。

如图 8 所示, 圆柱电极放电的电子激励温度整体呈现较高态势, 齿状电极放电次之, 螺纹电极电子激励温度呈现最低态。三组电极电离效果随着外施电压升高其走势趋于一致。这是由于三组电极最小放电气隙均为 3 mm, 圆柱状电极整体呈现 3 mm 的最小电离间隙, 等离子体迸发高速电子与中性原子产生较强的非弹性碰撞, 此时电子平均能量相对

其他电极而言显现为最大值, 因此圆柱电极电子激励温度最高; 齿状电极与螺纹电极最大电离气隙均为 5 mm, 之所以齿状电极电子激励温度偏高是由于氩气流经电离间隙时在齿状电极的凹口处产生一个瞬时的气压降低区, 这一特性改变了等离子体的电离特征尺度, 根据帕邢定律可知低气压条件下放电, 电离效果显著且电子激励温度增大。

### 3 结论

以自主研发的 DBD 装置进行大气压下氩气电离, 采用局域热平衡模型, 以光电技术为诊断手段分析了电极结构对大气压同轴介质阻挡放电特征参量的影响, 以及电子激励温度随外施电压的变化特性。主要结论如下:

(1) 在最小放电间隙一致时, 齿状电极产生低温等离子体强度较大, 电离效果显著, 电子平均能量利用率偏低; 圆柱电极形成谱线强度偏低, 但可以产生均匀稳定的低温等离子体。

(2) 微放电通道内电子激励温度并不随着外施电压的升高而递增, 其电子激发温度并不取决于外加电源通路, 而是依赖于气体压强、放电几何模型以及放电种类, 增大外部电压尺度只增加放电间隙内电荷的数量。

### References

- [1] Popov N A. Plasma Sources Science and Technology, 2016, 25(4): 043002.
- [2] WU Yun, LI Ying-hong(吴云, 李应红). High Voltage Engineering(高压技术), 2014, 40(7): 2024.
- [3] DONG Li-fang, YANG Jing, ZHU Ping, et al(董丽芳, 杨京, 朱平, 等). High Voltage Engineering(高压技术), 2015, 41(2): 479.
- [4] Duchmann A, Simon B, Tropea C, et al. AIAA Journal, 2014, 52(2): 358.
- [5] Keidar M. Post Communist Economies, 2015, 24(3): 033001.
- [6] CHEN Si-le, XU Gui-min, MU Hai-bao, et al(陈思乐, 许桂敏, 穆海宝, 等). High Voltage Apparatus(高压电器), 2016, 52(4): 22.
- [7] Nadia M, Ravichandra R, Paul W, et al. 56th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018, 10: 7325.
- [8] Lin K M, Hu M H, Hung C T, et al. Computer Physics Communications, 2012, 183(12): 2550.
- [9] Nagaraja S, Yang V, Adamovich I. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(15): 155205.

# Experimental Study on Ionization Characteristics of Dielectric Barrier Discharge with Different Electrode Structures

SONG Peng<sup>1, 3</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, CHEN Lei<sup>2\*</sup>, WANG Xiao-fang<sup>1</sup>, LONG Wu-qiang<sup>1</sup>

1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China

2. Aerospace Engineering Institute, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

3. College of Electromechanical & Information Engineering, Dalian Minzu University, Dalian 116605, China

**Abstract** Because of high working pressure and uniform discharge, atmospheric dielectric barrier discharge (DBD) has become the main technology of non-equilibrium plasma discharge in recent years. Electrode structure is the key factor in the ionization characteristics. Therefore, optimizing the electrode structure to improve ionization characteristics is very important for the development of plasma discharge equipment and the optimization of its performance. In order to enhance the ionization characteristics of dielectric barrier discharge at atmospheric pressure, high activity, low temperature plasma uniformity, coaxial dielectric barrier discharge device has been designed based on the ionization characteristics test and parameter diagnosis. Experimental researches on the effect of electrode structure of three grounding electrode on the spectral parameters were carried out by using photoelectric technology, and argon ionization tests were carried out under the conditions of a standard atmospheric pressure, discharge frequency 11.4 kHz and varied discharge peak voltage increasing from 5.4 to 13.4 kV (with 1.0 kV interval). Atomic emission spectroscopy (AES) was used to detect and analyze the excitation and splitting spectra of argon plasma, and the influence law and effect of electrode shape and applied voltage on the characteristic parameters of dielectric barrier discharge were obtained. The influence of the spectral parameters of threaded electrode, toothed electrode and cylindrical electrode, as well as the applied voltage on the characteristic parameters of DBD were studied. The results showed that the discharge intensity of the plasma of tooth shaped electrode is greater and the discharge effect is significant. The average energy utilization ratio of the electron is low, and the electron excitation temperature is weaker than that of cylindrical electrode. Under testing voltage conditions, the electron excitation temperature does not increase with the increase of applied voltage. It indicates that the main features of the micro discharge channel do not depend on the applied voltage supply, but depends on the electrode structure, gas composition and gas pressure. The increase in applied voltage only increases the number of micro discharge in unit time. The integration of electronic excitation temperature can reach up to 3 500 K, which accords with the typical characteristics of low temperature plasma.

**Keywords** Atmospheric pressure; Dielectric barrier discharge; Electrode structure; Spectral diagnosis; Electron excitation temperature

(Received Apr. 1, 2018; accepted Aug. 29, 2018)

\* Corresponding author