

针—板介质阻挡放电中电子能量空间分布研究

董丽芳, 嵇亚飞, 李永辉

河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002

摘要 测量了大气压环境下氩气空心针—板放电等离子体中原子与分子谱线强度的空间分布, 分析了等离子体中电子能量的空间分布。实验利用空心针—板放电装置, 得到了约 3 cm 长的放电等离子体弧。在 300 ~ 800 nm 范围内采集发射光谱, 发现了强度较高的 Ar I 谱线、N₂ 第二正带系谱线 $C^3\Pi_u(\nu' = 0) \rightarrow B^3\Pi_g(\nu'' = 0)$ 以及强度较弱的 O I 谱线。实验测量了 N₂ 谱线(337.1, 357.6 及 380.4 nm)、氩原子谱线(696.54, 763.51, 772.42 及 794.82 nm)和 O I 777.2 nm 谱线强度的空间分布, 结果表明: 氮分子谱线强度由弧根开始逐渐升高, 当距离弧根 12 mm 时强度达到最大值并开始下降; 氩原子谱线强度由弧根到弧梢逐渐降低; 氧原子谱线强度从弧根开始逐渐升高, 当距离弧根 6 mm 时强度达到最大值并开始下降。定性地讨论了等离子体弧中电子能量分布, 发现距离弧根为 6 mm 处电子能量最高, 而弧根处电子能量最低。

关键词 等离子体弧; 空间分布; 电子能量

中图分类号: O461.2; O433.4 **文献标识码**: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)12-3210-03

引言

近年来, 针板放电由于其在材料表面改性、灭菌消毒、臭氧合成及污染控制等领域广泛的应用前景引起了人们的极大兴趣^[1-4]。在材料表面改性中, 当针板放电产生的等离子体接触到材料表面时, 材料表面的化学键被较高能量的电子断裂后, 再与等离子体中其他粒子形成化合物, 从而使材料表面性质发生改变。由此可见, 在进行材料表面处理时等离子体中电子的能量大小是个很关键的因素; 如果电子能量太大则容易损伤材料, 太小则不能达到材料表面改性的目的。因此弄清楚等离子体弧中电子能量分布规律, 对其应用具有十分重要的意义。但是据我们所知, 对于等离子体弧中电子能量的分布研究少见报道。本工作利用空心针—板放电装置产生了大气压等离子体弧, 通过测量其上各点的 Ar I 谱线、N₂ 第二正带系谱线和 O I 谱线的相对强度, 得到了谱线强度的空间分布, 分析了等离子体中的电子能量分布。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示。空心不锈钢针的内、外径分别为 1 和 1.3 mm, 通过 50 Ω 的电阻接地。工作时氩气由质量流

量控制器控制并导入空心针。直径 8 cm 的圆柱形铜块作为另一电极, 其周围用绝缘塑料包裹, 通过一接线柱接交流电源的高压端, 其上端用厚度为 1.5 mm 的玻璃板覆盖。空心针末端到玻璃板的距离为 4.5 cm。交流电源的频率为 40 kHz, 其峰值电压在 0~12 kV 范围内连续可调。高压探头 (Tektronix P6015A, 1000Xd) 用来测量电压, 由数字示波器 (Agilent, DSO6054A, 500 MHz) 记录并储存。放电等离子体发出的光, 经焦距为 10 cm 的透镜会聚后由光纤导入光谱仪 (型号: ACTON SP-2785, 1 340 × 400 pixels), 通过计算机控制采集并存储。

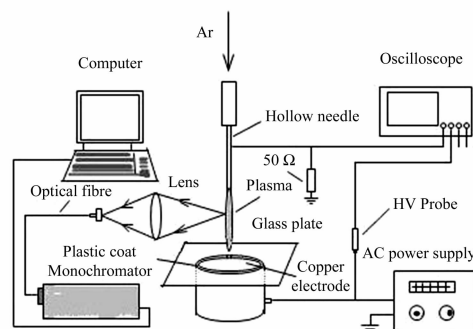


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

收稿日期: 2011-02-27, 修订日期: 2011-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(10975043)和河北省自然科学基金项目(A2010000185)资助

作者简介: 董丽芳, 女, 1963 年生, 河北大学物理科学与技术学院教授 e-mail: donglf@mail.hbu.edu.cn

2 结果与讨论

实验时向空心针中通入氩气且把气体流速控制在 $8.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 当外加正弦交流电压峰值为 7.5 kV 时, 针板间形成约 3 cm 长的等离子体弧, 如图 2 所示。

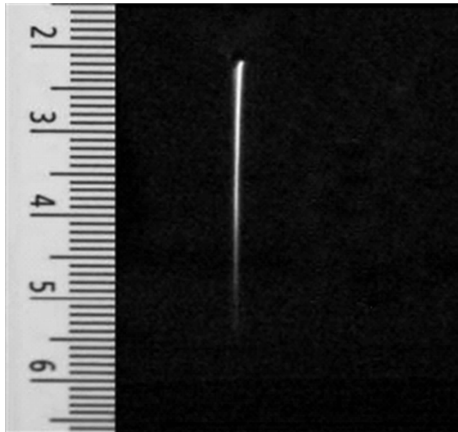


Fig. 2 The photograph of the plasma generated in hollow-needle-plate dielectric barrier discharge ($U=7.5 \text{ kV}$)

首先采集了 $300 \sim 800 \text{ nm}$ 范围内的等离子体弧的发射光谱, 如图 3 所示。发射谱中除了很强的氩原子谱线、较强的氮分子第二正带系谱线外, 还出现了较弱的 O I 777.2 nm 谱线和 OH 谱带。

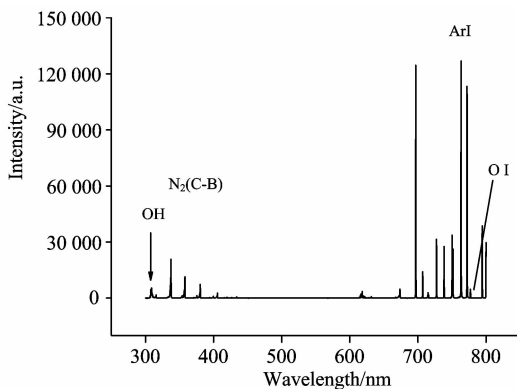
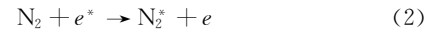
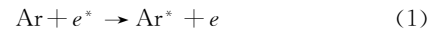


Fig. 3 An optical emission spectrum of hollow-needle-plate discharge at argon flow rate of $8.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ and applied voltage $U=7.5 \text{ kV}$

接着测量了 Ar I 谱线、第二正带系以及 O I 谱线沿等离子体弧的空间分布, 结果如图 4 所示。由图可见: Ar I 谱线强度由弧根到弧梢逐渐减小; N_2 第二正带系谱线由弧根开始逐渐增强, 当距离弧根为 12 mm 时达到最大值后开始下降; O I 谱线强度由弧根开始逐渐升高, 当距离弧根为 6 mm 时强度达到最大值后开始下降。

氩原子与氮分子谱线的产生是由高能电子与基态氩原子和氮分子碰撞, 使它们的基态获得能量跃迁到激发态, 由激发态再跃迁到基态或亚稳态的同时释放出光能。激发过程可用下式表示



氧原子谱线则是由高能电子先离解氧分子产生氧原子, 然后高能电子再与氧原子碰撞使氧原子跃迁到激发态, 激发态氧原子跃迁回基态或者亚稳态的同时释放出光能。激发过程可用下式表示

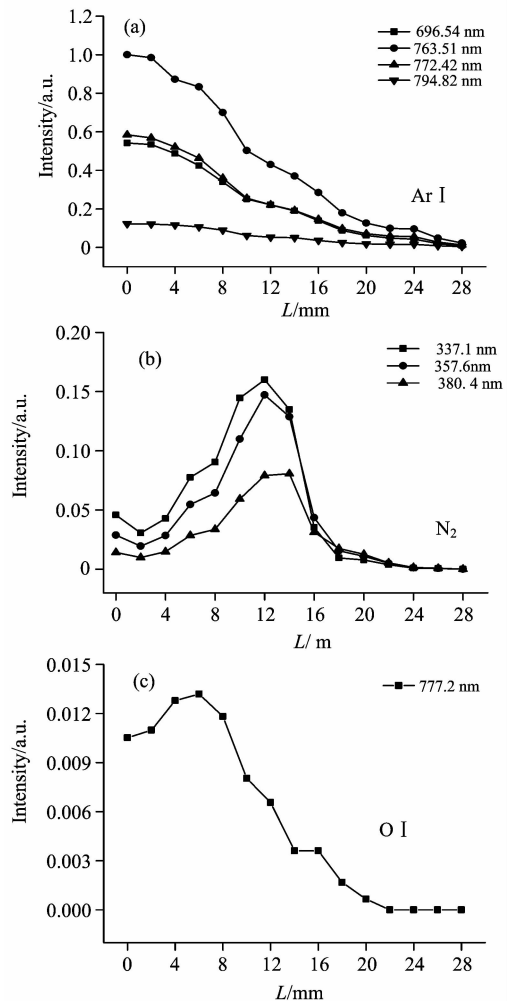
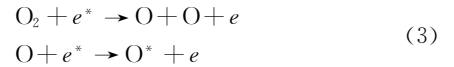


Fig. 4 Emission intensity of N_2 , Ar I, and O I as the function of distance from arc root

众所周知, 原子或分子谱线的强度与上能级粒子数成正比, 而上能级粒子数与碰撞截面成正比, 碰撞截面与电子能量有关。由文献[5]和[6]可知, 当电子能量分别为 $13 \sim 15 \text{ eV}$ 和 $17 \sim 18 \text{ eV}$ 时, 氩原子和氮分子碰撞激发截面最大, 此时对应的氩原子和氮分子上能级粒子数最多, 谱线强度最大。由文献[7]可知当电子能量为 $17 \sim 18 \text{ eV}$ 时氧原子碰撞激发截面最大, 此时对应的氧原子上能级粒子数最多, 由于解离氧分子所需电子能量为 8.4 eV , 所以当电子总能量为 $25 \sim 26 \text{ eV}$ 时氧原子谱线强度最大。根据以上数据分析可以得到激发氩原子所需电子能量最小, 激发氮分子所需电子能

量较大,解离氧分子并激发氧原子所需的电子能量最大。从图 4(a)可以看出氩原子谱线强度由弧根到弧梢逐渐减弱,说明能量在 13~15 eV 范围内的电子数目在减少。图 4(b)中氮分子谱线强度由弧根开始逐渐增加,当距离弧根为 12 mm 时强度达到最大然后开始下降,说明能量在 17~18 eV 范围内的电子数目由弧根逐渐增加,到 12 mm 时电子数目达到最大然后开始下降。在图 4(c)中氧原子谱线强度先增加后减小,说明能量在 25~26 eV 范围内的电子数目由弧根开始逐渐增加,当距离弧根为 6 mm 时数目达到最大后随着距离的增加具有高能电子数目开始下降。以上分析表明:弧根处电子能量最低,距离弧根 6 mm 处电子能量最高,距离弧根 12 mm 处能量介于两者之间。

3 结 论

研究了大气压环境下氩气空心针—板放电等离子体中的

原子空间分布。利用空心针—板装置得到了长度大约为 3 cm 的放电等离子体弧。实验采集了波长在 300~800 nm 范围内的发射光谱,发现了强度较大的 Ar I 谱线、N₂ 第二正带系谱线 $C^3\Pi_u(\nu' = 0) \rightarrow B^3\Pi_g(\nu'' = 0)$ 以及强度较弱的 O I 谱线、OH 自由基的谱带。实验选取并分析了 337.1, 357.6 和 380.4 nm 氮分子谱线和 696.54, 763.51, 772.42 和 794.82 nm 四条氩原子谱线以及 777.2 nm 的 O I 谱线的强度,得到了这些谱线强度的空间分布。实验发现:氮分子谱线强度由弧根开始逐渐升高,当距离弧根 12 mm 时强度达到最大值并开始下降;氩原子谱线强度由弧根到弧梢逐渐降低;氧原子谱线强度从弧根开始逐渐升高,当距离弧根 6 mm 时强度达到最大值并开始下降。由谱线强度的空间分布定性地讨论了等离子体弧中电子能量分布规律,发现弧根处能量最低,距离弧根为 6 mm 处电子能量最高。本结果对于大气压非平衡等离子体在材料处理和理论研究方面具有一定的指导意义。

References

- [1] Kogelschatz U. IEEE Trans. Plasma Sci., 2002, 30(4): 1400.
- [2] Mangolini L, Orlov K, Koort shagen U, et al. Appl. Phys. Lett., 2002, 80(10): 1722.
- [3] HE Xiang, SUN Feng-lou, ZHOU Wu-qing(何翔, 孙奉委, 周武庆). Journal of Materials Science & Engineering(材料科学与工程学报), 2008, 26(4): 570.
- [4] ZHU Yi-min, KONG Xiang-peng(朱益民, 孔祥鹏). High Voltage Engineering(高压电技术), 2006, 32(1): 57.
- [5] Haugsjaa P O, Amme R C. J. Chem. Phys., 1970, 52(9): 4874.
- [6] Finn T G, Doering J P. J. Chem. Phys., 1976, 64(11): 4490.
- [7] Itikawa Y, Ichimura A. J. Phys. Chem. Ref. Data, 1990, 19(3): 637.

Study on Spatial Distribution of Electron Energy in Hollowneedle-Plate Dielectric Barrier Discharge

DONG Li-fang, JI Ya-fei, LI Yong-hui

College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China

Abstract In the present work, the spatial distributions of spectrum intensity of molecule and atom in the plasma generated in hollowneedle-plate discharge in atmosphere were measured, and the spatial distribution of electron energy in plasma was analyzed. A plasma about 3cm long is generated by using a hollowneedle-plate discharge device. By collecting optical emission spectrum from 300 to 800 nm, it was found that the spectrum consists of strong Ar I lines, strong second positive band system of N₂, and weak O I line. The spatial distributions of spectrum intensity of Ar I (696.54, 763.51, 772.42, and 794.82 nm), band N₂ (337.1, 357.6, and 380.4 nm), and O I 777.2 nm were measured. The Ar I lines decreased gradually from the arc root. The N₂ lines increased gradually from the arc root and declined when they reached a maximum at 12 mm away from the arc root. The intensity of O I increased from the arc root and declined when it reached a maximum at 6 mm away from the arc root. The spatial distribution of electron energy in plasma was analyzed qualitatively from the spatial distribution of spectrum intensity given above. It was found that the electrons located at 6 mm away from the arc root have high energy, while they have low energy at arc tip.

Keywords Plasma arc; Spatial distribution; Electron energy

(Received Feb. 27, 2011; accepted Jun. 28, 2011)