

# 大气压下辉光放电的产生

孙岩洲, 邱毓昌, 谢建民

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

## GENERATION OF GLOW DISCHARGE AT ATMOSPHERIC PRESSURE

SUN Yan-zhou, QIU Yu-chang, XIE Jian-min

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**摘要:** 阐述了产生大气压下辉光放电的几种方法。在直流电场中,通过改变阴极的结构,抑制了辉光放电向弧光放电的过渡,从而实现大气压下辉光放电;在交流电场中,利用介质阻挡层和高频激励源,可获得稳定均匀的大气压下辉光放电。

**关键词:** 辉光放电; 微洞阴极; 介质阻挡放电; 非平衡态等离子体

中图分类号: O461

文献标识码: A

**Abstract:** Some methods of generating atmospheric-pressure glow discharge are described. In DC electrical field, by means of changing the structure of cathode, the glow-to-arc transition is prevented, and the glow discharge is stabilized. In AC electrical field, the stable homogeneous glow discharge will appear by using dielectric barrier layer and high-frequency power source.

**Key words:** glow discharge; micro-hollow cathode; dielectric barrier discharge; nonequilibrium plasma

## 1 引言

近年来大气压下辉光放电的研究受到关注,这种放电有着广泛的工业应用前景,如材料处理、有机物降解、灭菌消毒、放电光源以及臭氧生成等<sup>[1-3]</sup>。放电所用的外部激励源可采用直流、交流以及脉冲等多种类型电源,电极的形状也可有一些变化。大气压下辉光放电的一个技术关键是抑制其向弧光放电的过渡,而这种过渡主要是从辉光放电的阴极区开始并发展的,因此可以采用特殊的阴极电极抑制之。对于交流放电,采用绝缘介质插入放电空间而形成的介质阻挡放电也可有效地抑制向弧光放电的过渡,但在较低频率电源作用时,介质阻挡放电呈现为多通道不均匀的微放电,而采用较高频率(数 kHz 以上)电源时,介质阻挡放电可呈现为均匀的大气压下辉光放电。

## 2 大气压下直流辉光放电的产生

低气压下的辉光放电易于获得,例如日常使用的荧光灯。但在高气压下,放电机制会出现变化,因为气体放电的电流密度和气压的平方成正比,所以随气压增大,电流密度迅速增大,阴极压降也随之增加,这就使得撞击阴极的正离子的能量增加。正离子能量的增加提高了阴极的温度,阴极除了碰撞电离外还会出现热电离,这使阴极发射出大量的电子;电子发射的增加又增大了电流密度,这又进一步促使了阴极的发热,形成了正反馈,从而导致辉光放电向弧光放电的过渡。

### 2.1 直流高电阻镇流放电

减小放电的电流密度和降低电极阴极的温度是抑制辉光放电向弧光放电过渡的有效方法。因此,可采用多针串联电阻的阴极<sup>[4]</sup>,见图 1。

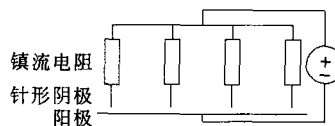


图 1 电阻镇流放电结构示意图

图 1 中阴极被分为多个针形电极,并在每个针形电极中串联一个高电阻起镇流作用。电阻值越高越有利于放电的稳定,但这将增大功率损耗,造成过热,因此阻值的选择要适当,也可采用水溶液电阻以利于散热,或采用稳流调节器件代替电阻。放电的电流密度被限制在  $10 \text{ mA/cm}^2$  以下,以防止向弧光放电过渡,放电空间的电子浓度约为  $10^{10}$  (个· $\text{cm}^{-3}$ ) 数量级<sup>[4]</sup>。这种结构可用在横流电激励  $\text{CO}_2$  激光器中<sup>[5]</sup>,若采用脉冲电场和直流电场配合进行预电离,可将电子浓度提高到  $10^{12}$  (个· $\text{cm}^{-3}$ ) 数量级。

### 2.2 直流微洞等离子阴极放电

辉光放电向弧光放电的过渡是从阴极区开始并

发展的,一般辉光放电的阴极区具有较大的电场强度,从而使正离子得到加速。消除或改变阴极区也可抑制弧光放电的产生,这可通过辅助放电形成微洞阴极来实现<sup>[6]</sup>,见图2。

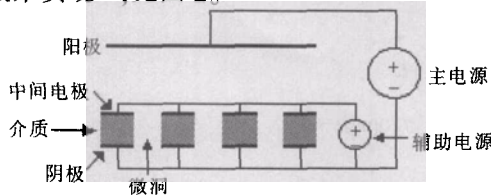


图2 微洞阴极放电结构示意图

发生在微洞中的辅助放电形成了主放电的等离子体阴极,为主放电提供电子源。当辅助放电电流大于主放电电流时,中间电极主要作为辅助放电的阳极;当辅助放电电流小于主放电电流时,主放电的电子源仅由等离子体阴极发射提供已经不够,还要由中间电极参与主放电过程,此时中间电极也成为主放电的阴极。虽然辅助放电回路增加了设备费用,但可为形成稳定的辉光放电创造条件。

### 3 大气压下交流辉光放电的产生

采用固体绝缘介质插入放电空间而形成的介质阻挡放电已被广泛应用,这种放电最初被用来制造臭氧,目前在废气处理、光源照明等工业领域也有很好的应用前景。介质阻挡放电的结构见图3(a)。

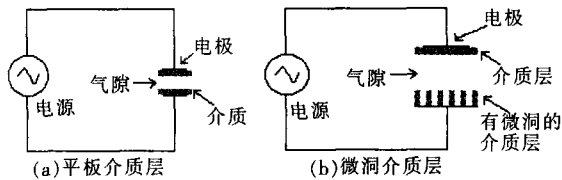


图3 介质阻挡放电结构示意图

#### 3.1 介质阻挡均匀辉光放电

电源频率及电极结构等因素对放电有着重要影响,通常介质阻挡放电呈现为多通道不均匀的微放电。近来,日本的研究者在介质和平板电极间加入细铁丝网,从而在工频电源和空气条件下获得均匀的辉光放电<sup>[5]</sup>,美国和法国的学者采用较高频率(数kHz以上)电源在氦气、氮气及空气中,也获得了均匀的辉光放电<sup>[11,7]</sup>,清华大学的研究者也用工频电源配合高阻材料实现了大气压下氦气中均匀辉光放电<sup>[8]</sup>。法国研究人员采用10kHz电源在氦气中,使用CCD照相机快速曝光的放电发光图像观察到均匀的放电发光区覆盖在电极的表面<sup>[9]</sup>,见图4,从图中看不到不均匀的细丝。

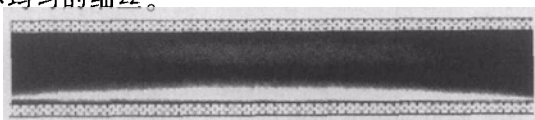


图4 曝光时间为10 ns的介质阻挡放电图像

高频电压下辉光放电的一个特点是每半个周期仅有1个放电电流脉冲<sup>[10]</sup>,氦气中电流脉冲持续约数 $\mu\text{s}$ ,而在氮气中持续约数百 $\mu\text{s}$ ,都远大于细丝微放电的ns级脉冲。因为辉光放电较细丝微放电均匀稳定,所以这种放电等离子体可用于对材料进行处理,它对材料的损害比微放电小。

#### 3.2 交流微洞介质阻挡放电

对于介质阻挡放电,改变介质层材料或形状,会使放电发生变化,一种在介质层形成微洞放电的方法见图3(b)<sup>[4]</sup>。

当采用高频(数kHz以上)电源时,微洞中会出现明亮的辉光放电并扩散到整个气隙空间。与上述平板介质阻挡辉光放电相比,此时放电更加强烈,放电电流持续时间可达数十 $\mu\text{s}$ ,并且计算表明,此时放电空间的电子浓度约为 $10^{12}$ (个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ )数量级,而平板介质阻挡辉光放电时空间的电子浓度仅为 $10^{10}$ (个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ )数量级<sup>[10]</sup>。

### 4 结语

相比于低气压下的辉光放电,大气压下辉光放电省略了低气压的产生和密封系统,简化了工艺流程,易于得到工业应用。大气压下的辉光放电可产生低温等离子体(非平衡态等离子体),放电时既有物理反应又有化学反应,因此需结合多种方法,如数学模拟计算、物理光学电学实验及化学分析,才可充分认识放电机理,合理控制放电时产生的粒子浓度、能量和反应过程,从而为实际应用提供依据。

### 参考文献:

- [1] T C Montie, et al. An Overview of Research Using the One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (OAUGDP) for Sterilization of Surfaces and Materials [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2000, 28(1): 41-50.
- [2] 史庆军, 顾彪, 邓祥. 常压辉光放电的建立及其特性实验研究[J]. 佳木斯大学学报, 2001, 19(2): 125-129.
- [3] M Kogoma, et al. Raising of Ozone Formation Efficiency in a Homogeneous Glow Discharge Plasma at Atmospheric Pressure [J]. J Phys D: Appl. Phys., 1994, 27(9): 1985-1987.
- [4] E E Kunhardt. Generation of Large-volume Atmospheric-pressure Nonequilibrium Plasmas [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2000, 28(1): 189-200.
- [5] 魏在福, 程兆谷, 查鸿逵, 等. 高功率横流CO<sub>2</sub>激光器大体积放电研究[J]. 光学学报, 1994, 14(7): 673-677.
- [6] A H Mohamed, et al. Direct Current Glow Discharge in Atmospheric Air [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2002, 30(1): 182-183.
- [7] N Cherardi, et al. Mechanisms Controlling the Transition from Glow Silent Discharge to Streamer (下转第46页)

## 参考文献:

- [1] 董超, 李瑞阳, 黄焯, 等. EHD 强化换热研究中的重要问题——电场特性的影响规律[J]. 能源研究与信息, 2001, 17(1): 36-44.
- [2] H Kalman, E Sher. Enhancement of Heat Transfer by Means of a Corona Wind Created by a Wire Electrode and Confined Wings Assembly[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(3): 265-282.
- [3] P H G Allen, T G Karayiannis. Electrohydrodynamic Enhancement of Heat Transfer and Fluid Flow [J]. Heat Recovery System & CHP, 1995, 15(5): 389-423.
- [4] S M Marco, H R Velkoff. Effect of Electrostatic Fields on Free Convection Heat Transfer from Flat Plates [R]. American Society of Mechanical Engineers(Paper), No.63-HT-9, 1963.
- [5] H R Velkoff, R Godfrey. Low Velocity Heat Transfer to a Flat Plate in the Presence of a Corona Discharge in Air[J]. Journal of Heat Transfer, 1979, 101(1): 157-163.
- [6] R J O'brien, A J Shine. Some Effects of an Electric Field on Heat Transfer from a Vertical Plate in Free Convection [J]. Journal of Heat Transfer, 1967, 89(1): 114-116.
- [7] M E Franke. Effect of Vortices Induced by Corona Discharge on Free-convection Heat Transfer from a Vertical Plate [J]. Journal of Heat Transfer, 1969, 91(2): 427-433.
- [8] M E Franke, L E Hogue. Electrostatic Cooling of a Horizontal Cylinder[J]. Journal of Heat Transfer, 1991, 113(3): 544-548.
- [9] 陆志琳, 郑基立, 吴志平, 等. 利用强电场增强自然对流换热 [A]. 中国工程物理学会传热传质学术会议[C], 合肥, 1984.
- [10] M Ohadi, D A Nelson, S Zia. Heat Transfer Enhancement of Laminar and Turbulent Pipe Flow Via Corona Discharge[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34(6): 1175-1187.
- [11] B L Owsenke, J Seyed-Yagoobi, R H Page. Experimental Investigation of Corona Wind Heat Transfer Enhancement through Wire-plate Corona Discharge[J]. Transaction of ASME, Journal of Heat Transfer, 1995, 117(2): 309-315.
- [12] B L Owsenek, J Seyed-Yagoobi. Theoretical and Experimental Study of Electrohydrodynamic Heat Transfer Enhancement through Wire-plate Corona Discharge [J]. Journal of Heat Transfer, 1997, 119(4): 604-610.
- [13] M E Franke, P R C Hodge. Corona Wind Cooling of Horizontal Cylinders in Air [A]. Proceeding of the ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference[C], Maui, 1995.
- [14] Bhattacharyya, Souvik, Peterson, et al. Corona Wind-augmented Natural Convection Part 1: Single Electrode Studies [J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2002, 9(5-6): 209-219.
- [15] Bhattacharyya, Souvik, Peterson, et al. Corona Wind-augmented Natural Convection Part 2: Multiple Electrode and Flow Visualization Studies [J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2002, 9(5-6): 221-228.
- [16] Wangniparnto Santi, Tiansuwan Jirawan, Sujin Jiracheewanun, et al. Air Side Performance of Thermosyphon Heat Exchanger in Low Reynolds Number Region: with and without Electric Field [J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(14): 1791-1800.
- [17] A Yabe, Y Mori, K Hijitata. EHD Study of the Corona Wind between Wire and Plate Electrodes [J]. Americans for International Aid and Adoption Journal, 1978, 16(1): 340-345.
- [18] A Yabe, Y Mori, K Hijitata. Heat Transfer Augmentation Around a Downward-facing Flat Plate by Nonuniform Electric Fields [A]. Proceedings of the 5th International Heat Transfer Conference[C], National Research Council of Canada, 1978.
- [19] Tada Yukio, Takimoto Akira, Ueda Daisaku, et al. Heat Transfer Enhancement in a Convective Field with Corona Discharge [J]. Transactions of JSME, Part B, 1991, 57(533): 223-228.
- [20] J Seyed-Yagoobi. Theoretical and Experimental Study of Electrohydrodynamic Heat Transfer Enhancement through Wire-plate Corona Discharge [J]. Transactions of the ASME, 1997, 119(2): 604-610.
- [21] Shoostari Amir, Ohadi Michael, H R Franca Francis. Experimental and Numerical Analysis of Electrohydrodynamic Enhancement of Heat Transfer in Air Laminar Channel Flow [A]. 19th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium[C], San Jose, USA, 2003.
- [22] A Yabe, H Maki. Augmentation of Convective and Boiling Heat Transfer by Applying an Electrohydrodynamical Liquid Jet [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1988, 31(2): 407-417.
- 作者简介: 王丰华(1973-), 女, 河南洛阳人, 博士研究生, 从事绝缘状态监测方面的研究。
- (上接第 42 页)
- Discharge in Nitrogen [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2001, 29(3): 536-544.
- [8] 王新新, 李成裕, 蒲以康, 等. 用 50Hz 工频电压产生大气压下辉光放电[J]. 高电压技术, 2002, 28(S1): 39-40.
- [9] F Massines, et al. A Comparison of Polypropylene-surface Treatment by Filamentary Homogeneous and Glow Discharge in Helium at Atmospheric Pressure [J]. J Phys D: Appl. Phys., 1998, 31(24): 3411-3420.
- [10] U Kogelschatz. Filamentary, Patterned, and Diffuse Barrier Discharges[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2002, 30(4): 1400-1408.
- 作者简介: 孙岩洲(1972-), 男, 在读博士生, 讲师, 主要从事高电压技术及气体放电等工作。电话: 029-2668626。