

交流单针-板介质阻挡放电等离子参数空间分布研究

李永辉 董丽芳

(河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002)

摘要 通过氩气和空气中交流针-板介质阻挡放电的光谱,研究了在外加电压正半周流注放电的等离子发光强度、谱线宽度、电场强度在放电通道内从针到板的空间分布情况,分析了介质板的存在对等离子参量空间分布的影响。通过对氩气放电光谱中 763 nm 和 772 nm 两条谱线强度研究发现,沿着放电通道从针到板等离子发光强度在针尖附近先增大后减小,在平板电极附近又迅速增大。通过研究氩气放电中 696.54 nm 谱线的展宽发现,谱线宽度在平板电极附近最大。通过空气放电光谱中氮分子离子线(391.4 nm)和氮分子谱线(394 nm)的强度比,计算了放电通道中电场强度的分布,发现沿着放电通道从针到板电场强度先减小后增大。研究发现,介质板的存在对于放电等离子参数的空间分布有着重要影响。

关键词 光谱学;等离子光谱;针-板放电;谱线宽度;电场强度

中图分类号 O461.2; O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0430001

Study of Plasma Parameter Distribution in Alternating Current Needle to Plate Dielectric Barrier Discharge

Li Yonghui Dong Lifang

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

Abstract The optical emission spectra are measured during the positive half cycle in a sinusoidal driven needle to plate dielectric barrier discharge in argon and air, and the spatial distributions from needle to plate in the discharge channel of plasma luminous intensity, spectrum width and electric field intensity are investigated. The effect of the dielectric plate on the plasma parameters is also analyzed. According to the intensities of two lines of 763 nm and 772 nm of argon discharge spectrum, it is found that the intensity from needle to plate increases first and then decreases around the needle, while it increases rapidly around the plate. The distribution of spectrum width (696.54 nm) is investigated, and the spectrum width increases to maximum around the plate. The distribution of electric field is obtained by calculating the intensity ratio of the nitrogen molecular ion line of 391.4 nm to nitrogen molecular line of 394 nm in air discharge spectrum, the electric field strength decreases first and then increases along the discharge channel. The results show that the dielectric plate plays an important role in the distribution of plasma parameter.

Key words spectroscopy; plasma emission spectrum; needle to plate discharge; spectrum width; electric field strength

OCIS codes 010.1290; 300.2140; 300.3700; 300.6350

1 引 言

介质阻挡放电(DBD)是产生低温等离子体的一种重要手段,目前被广泛应用于臭氧产生、材料处理

等领域^[1-3]。DBD 放电一般包含大量放电单元,为了研究单个放电单元的性质,很多研究者对针-板放电进行了研究^[4]。2003 年, Radu 等^[5]在针-板电极

收稿日期: 2013-11-11; **收到修改稿日期**: 2013-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(10975043, 11175054)、河北省自然科学基金(A2010000185)、廊坊市科技局项目(2012011021, 2012011030, 2012011026)

作者简介: 李永辉(1978—),男,博士研究生,主要从事介质阻挡放电方面的研究。E-mail: liy_hui@163.com

导师简介: 董丽芳(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事介质阻挡放电斑图方面的研究。

E-mail: donglf@hbu.edu.cn(通信联系人)

中发现了辉光放电,因此大部分研究者将研究重点放在针-板放电模式研究上。2012年,俞哲等^[6]研究发现交流(AC)驱动的针-板 DBD 放电正半周期为流注放电,负半周期为电晕放电或者辉光放电。虽然人们对于针-板放电进行了大量研究,但是对于针-板放电等离子微观特性却知之甚少。等离子微观参数对于等离子工业应用以及放电机制研究都具有重要意义,例如等离子中的电场强度决定着离子的产生演化和带电粒子的输运,因此等离子微观参量的研究很有必要^[7]。

发射光谱法是等离子体微观参数诊断的有效工具,近年来人们利用发射光谱技术对直流针-板放电等离子进行了大量研究^[8-10]。宿鹏浩等^[11-12]利用发射光谱研究了多针对板正、负电晕放电形貌,杨树等^[13]利用谱线强度比研究了针对板正电晕放电的电场强度。以往研究主要集中在直流针-板放电光谱,对于交流针-板 DBD 放电光谱研究少有报道。本文利用交流针-板 DBD 放电光谱,研究了等离子发光强度、电场强度、谱线宽度的空间分布情况,并与直流正电晕放电进行了对比。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。针-板放电装置放置在密闭有机玻璃容器内。直径为 1.0 mm 的不锈钢针与交流高压电源连接。直径为 75 mm 的有机玻璃

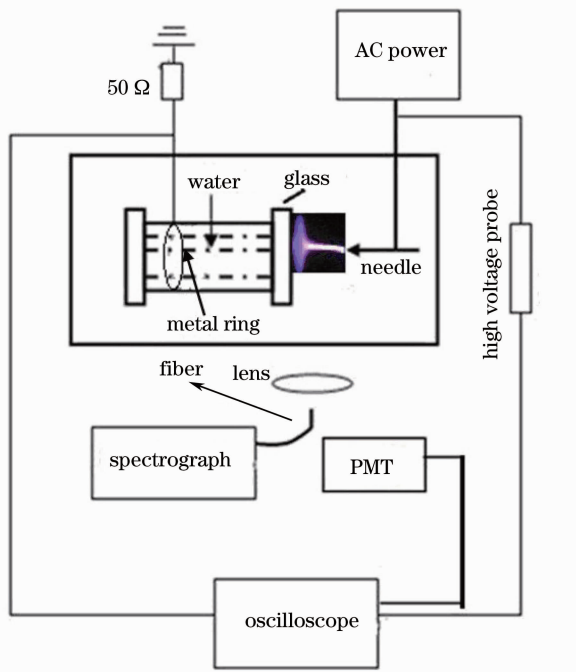


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

管内充满水,水中放置一个金属圆环,接地电极,管两端用厚度为 1.5 mm 的玻璃封闭,作为平板电极。针-板电极之间放电间隙为 5 mm。高压电源输出频率为 40 kHz 的交流电,峰值电压在 0~20 kV 范围内可调,电源输出电压由高压探头(Tektronix P6015A 1000X)分压后连接示波器(Agilent, DSO6054A, 500 MHz)显示记录。放电电流通过测量串联在电路中的 50 Ω 电阻上的电压计算得到。放电发光信号通过凸透镜成像后进入光谱仪(ACTON SP2750)或者光电倍增管(PMT,滨松 H7826)进行采集。

3 实验结果与讨论

3.1 谱线强度与谱线宽度分布

首先在反应室内充满 101.325 kPa 的氩气,随着外加电压升高,气体被击穿,放电通道贯穿于针-板电极之间。此时电流曲线在正半周有多个细小脉冲,而负半周没有明显放电脉冲,这与一般交流针-板放电的电流曲线相似^[6]。为了便于研究,降低外加电压到 3.2 kV,使得电流曲线在外加电压正半周只有一个脉冲,此时电压、电流、光信号曲线如图 2 所示。由放电形貌以及电流曲线和光信号可以看出,正半周放电为正流注放电,负半周放电应为电晕放电或者辉光放电。从电流曲线和光信号可以看出,负半周放电比正半周放电弱很多,负半周放电发光强度与正半周相比也很小。实验中,光谱仪采集光谱的积分时间为 1 s,采集到的光谱是上万个周期叠加的结果,但是因为正半周放电比负半周放电强很多,因此本实验采集的光谱主要反映的是正半周流注放电的情况。

发光的放电通道通过凸透镜在光纤所在位置成一个放大的实像,光信号通过光纤进入光谱仪采集。光纤被固定在一个可以移动的滑轨上,移动光纤就可以采集不同位置的光谱。利用光谱仪(光栅:300 line/mm),沿着放电通道采集了从针到板 13 个不同位置的光谱。放电光谱如图 3 所示,主要为氩原子谱线。从光谱中选取 763 nm 和 772 nm 两条谱线强度进行分析,两条谱线强度空间分布情况如图 4 所示,图中针尖作为 x 轴原点。由图 4 可见,两条谱线强度空间分布情况大致相同,随着远离针尖,谱线强度在针尖附近先增大后减小,在距离针尖约 1 mm 位置处达到最大值,在距离针尖 1.5~4 mm 区域内,谱线强度基本保持不变,在 4~5 mm(介质板处)范围内谱线强度又迅速增大。谱线强度受到

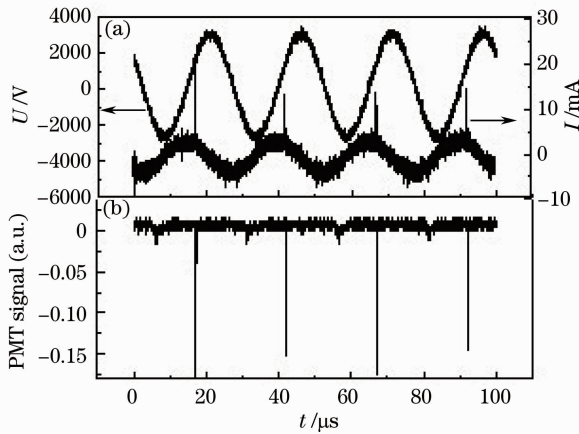


图 2 单针-板 DBD 放电电压、电流、光信号曲线

Fig. 2 Curves of voltage, current and PMT signal of needle to plate DBD discharge

电子能量和电子数目双重因素的影响。在外加电压正半周,针尖附近由于强电场的存在,电子雪崩优先在这个位置产生,由于此时针尖为阳极,电子向着针尖移动,而正离子由于质量大将会停留在原位置形成空间电荷,空间电荷形成的电场使得外部电场加强,促使初始正流注的形成,如图 5 所示。在流注向阴极发展过程中产生的电子数目逐渐增加,因此在针尖附近观察到谱线强度的增加。随着流注继续发展,空间正电荷积累逐渐增多,在针尖附近空间正电荷形成的附加电场 E_{q1} 与外电场 E_0 方向相反,因此针尖附近的净电场逐渐减弱,这使得谱线强度不能持续增加,必然在某个位置达到最大值,实验中观测到在距离针尖约 1 mm 处谱线强度达到最大值。在负半周放电结束后,在介质板上必定积累大量的负电荷。当正半周放电形成的正流注发展到介质板附近时,流注头部的空间正电荷形成的电场 E_{q2} 与介质板上的负电荷形成的电场 E_{q3} 与外加电场 E_0 同向,使得外加电场大大增强,因此在介质板附近 1 mm 观察到谱线强度的迅速增加。测量得到的交流针-板中正流注放电与直流正电晕放电的谱线强度分布基本相似,只是在平板电极附近有区别。直流正电晕放电的谱线强度随着远离针尖谱线强度先增加后减小^[11]。在交流针-板 DBD 放电中由于介质板的存在改变了电场分布,从而也改变了谱线强度的分布,导致介质板附近电场强度增加,谱线强度也变大。关于介质板对空间电场强度的影响在稍后的实验进行了验证。

为了研究谱线线型,采用 2400 line/mm 的光栅,沿着放电通道采集了不同位置的 696.54 nm 谱线。为了便于比较不同位置处谱线线型和线宽的变

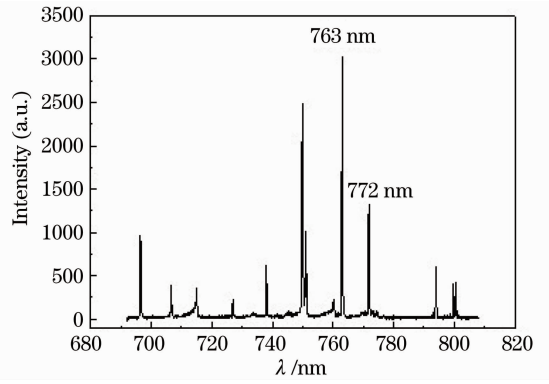


图 3 氩气中针-板放电光谱

Fig. 3 Spectrum of needle to plate discharge in Ar

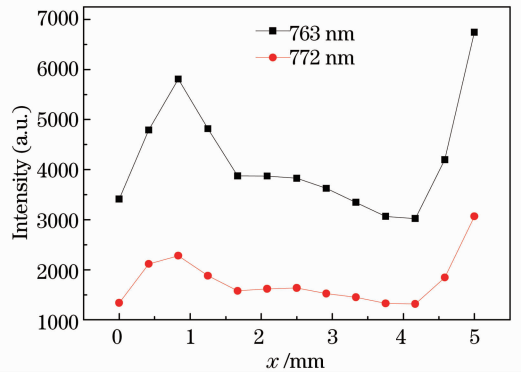


图 4 763 nm 和 772 nm 谱线强度沿针轴的空间分布

Fig. 4 Distributions of line intensities of 763 nm and 772 nm along needle axis

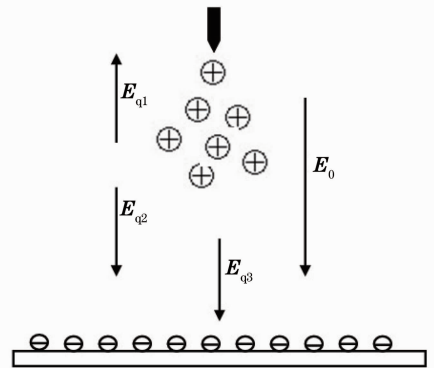


图 5 外加电压正半周放电空间内电荷、电场示意图

Fig. 5 Schematic of charges and electric field in discharge space of the positive half cycle of applied voltage

化,将不同位置处的 696.54 nm 谱线进行了归一化处理,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,沿着放电通道在距离针尖 4 mm 内谱线宽度基本相同,而平板电极附近 1 mm 区域内的谱线宽度明显变宽。为了更直观地显示谱线宽度变化,计算了空间各位置处 696.54 nm 谱线的半峰全宽(简称:谱线宽度),如图 7 所示。在距离针尖 3 mm 内谱线宽度基本保持

不变,约为 0.03 nm,从 3 mm 位置处谱线宽度开始增大,在 4~5 mm 区域内(介质板附近)谱线宽度达到最大且基本保持不变约为 0.035 nm。原子谱线展宽主要包括自然展宽、多普勒展宽、碰撞展宽、斯塔克展宽等。自然展宽很小一般可以忽略,多普勒展宽由气体温度决定,碰撞展宽由气压决定。放电通道中的气体温度和气压基本不变,多普勒展宽和碰撞展宽基本相同,因此放电通道中不同位置处谱线宽度变化主要反映了斯塔克展宽的变化。很多研究者采用氢原子或者非氢原子谱线的斯塔克展宽计算电子密度,研究结果表明斯塔克展宽越大,电子密度也越高^[14]。实验中不同位置处谱线宽度的不同主要是由斯塔克展宽引起的,而斯塔克展宽反映了电子密度的大小,根据图 7 中谱线宽度的分布可以推测电子密度在放电通道内基本保持不变,只是在介质板附近电子密度突然增加。

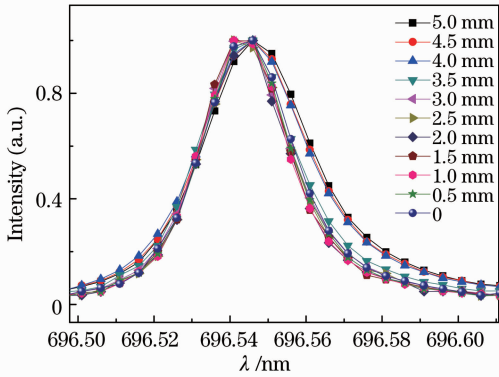


图 6 空间不同位置的 696.54 nm 谱线

Fig. 6 Emission spectral lines of 696.54 nm of different positions

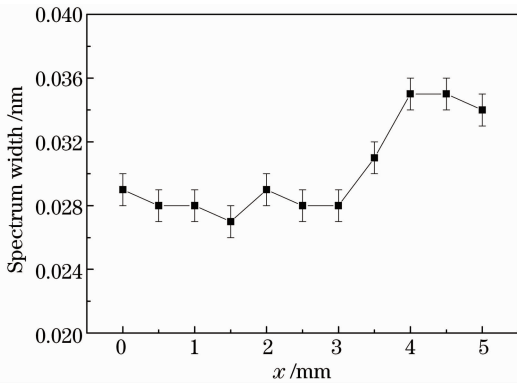


图 7 696.54 nm 谱线宽度的空间分布

Fig. 7 Distribution of spectrum width of 696.54 nm

3.2 电场强度的分布

电场强度是等离子体理论研究和工业应用当中重要的物理参量,它对离子产生和输运有着决定性影响。一般人们通过数值模拟的方法得到等离子中

电场强度的空间分布和时间演化。在实验中,可以通过测量氮分子离子和氮分子谱线强度比的方法确定电场强度,这种方法方便有效。为了确定针-板 DBD 放电当中电场的分布,保持放电结构不变,采集了 101.325 kPa 空气中针-板 DBD 放电的光谱。空气针-板放电光谱如图 8 所示,主要包含氮分子第二正带谱线,另外还有氮分子离子谱线。根据文献^[15]中谱线强度比 R 的经验公式 $R_{391/394} \left(\frac{E}{N}, N_0 \right) = 46 \exp \left[-89 \left(\frac{E}{N} \right)^{-0.5} \right]$,可以计算出针-板放电电场强度 E ,其中 $R_{391/394}$ 为氮分子离子线 391.4 nm 与氮分子线 394 nm 的强度比, N 及 N_0 分别为气体的密度及标准密度,结果表明电场强度约为几兆伏每米,电场强度在放电通道内的分布如图 9 所示。在针尖附近,电场强度先减小,在距离针尖 1 mm 位置达到最小值,随着远离针尖电场强度逐渐增大,在介质板附近达到最大值。电场强度分布的实验结果与图 5 中

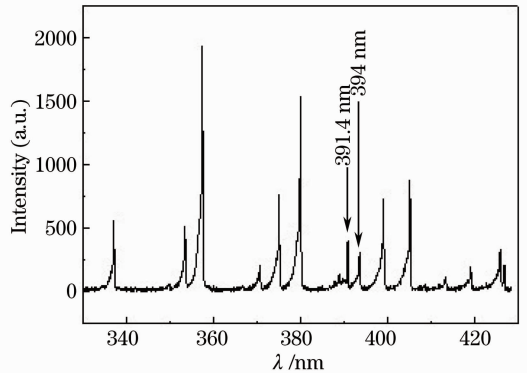


图 8 空气中针-板放电光谱

Fig. 8 Spectrum of needle to plate discharge in air

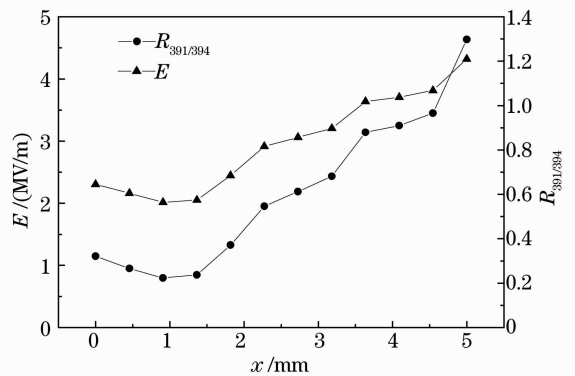


图 9 氮分子谱线强度比 ($I_{391.4}/I_{394}$) 及电场强度的空间分布

Fig. 9 Spatial distributions of intensity ratio of nitrogen molecular spectral lines ($I_{391.4}/I_{394}$) and electric field

的分析结果一致。空间电荷形成的附加电场在针尖附近与外加电场反向,因此导致针尖附近电场强度减小。介质板上由于在负半周放电过程中积累了大量负电荷,在正半周放电过程中这些负电荷形成的电场使得介质板附近的电场强度大大增加。

4 结 论

通过针-板 DBD 放电的发射光谱,研究了正半周流注放电等离子发光强度、谱线宽度、电场强度的空间分布情况。通过研究发现,由于介质板积累的大量壁电荷改变了放电通道内电场的分布,从而也影响了等离子发光强度以及谱线宽度的分布。可见,介质板的存在对于针-板放电等离子参量的空间分布有着重要影响。

参 考 文 献

- 1 Z Fang, Y Qiu, Y Luo. Surface modification of polytetrafluoroethylene film using the atmospheric pressure glow discharge in air [J]. *J Phys (D)*, 2003, 36(23): 2980-2985.
- 2 J R Roth, J Rahel, X Dai. The physics and phenomenology of one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP™) reactors for surface treatment applications [J]. *J Phys (D)*, 2005, 38(4): 555-567.
- 3 Wang Feng, Wu Weidong, Jiang Xiaodong, *et al.*. Study of surface modification of fused silica optical component by reactive plasma [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0522003.
王 锋, 吴卫东, 蒋晓东, 等. 反应等离子体修饰熔石英光学元件表面研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0522003.
- 4 He Yafeng, Dong Lifang, Liu Fucheng, *et al.*. The progress of study on dynamics of patterns in dielectric barrier discharge [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(5): 561-566.
贺亚峰, 董丽芳, 刘富成, 等. 介质阻挡放电斑图动力学研究进展 [J]. *自然科学进展*, 2007, 17(5): 561-566.
- 5 I Radu, R Bartnikas, G Czeremuszkin, *et al.*. Diagnostics of dielectric barrier discharges in noble gases; atmospheric pressure glow and pseudo glow discharges and spatio-temporal patterns [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2003, 31(3): 411-421.
- 6 Yu Zhe, Zhang Zhitao, Yu Qingxuan, *et al.*. Atmospheric pressure streamer and glow-discharge generated alternately by pin-to-plane dielectric barrier discharge in air [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(12): 195202.
俞 哲, 张芝涛, 于清旋, 等. 针-板 DBD 微流注与微辉光交替生成的机理研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61(12): 195202.

- 7 Mao Chengqi, Bai Mindi, Yi Chengwu, *et al.*. Experimental study transportation characteristic of charged particle in electrostatic precipitation [J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(2): 182-185.
毛程奇, 白敏韵, 依成武, 等. 电除尘器中带电粒子输运特性的实验研究 [J]. *高电压技术*, 2007, 33(2): 182-185.
- 8 Li Xuechen, Chang Yuanyuan, Xu Longfei. Optical investigation on the discharge characteristics of the upstream region in dielectric barrier discharge [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0730001.
李雪辰, 常媛媛, 许龙飞. 光学方法研究介质阻挡放电上行区的放电特性 [J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0730001.
- 9 Li Yonghui, Dong Lifang. Spatial distribution of atmospheric plasma jet temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0430003.
李永辉, 董丽芳. 大气压射流等离子体温度空间分布 [J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0430003.
- 10 Deng Hui, Chen Genyu, Zhang Ling, *et al.*. Plasma emission spectra during laser dressing of bronze-bonded diamond wheel [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0830002.
邓 辉, 陈根余, 张 玲, 等. 激光修锐青铜金刚石砂轮的等离子体光谱 [J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0830002.
- 11 Su Penghao, Zhu Yimin, Chen Haifeng. Morphology determination of multi needle to plate positive corona discharge [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(9): 1998-2002.
宿鹏浩, 朱益民, 陈海丰. 发射光谱研究多针对板正电晕放电形貌 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(9): 1998-2002.
- 12 Su Penghao, Zhu Yimin, Chen Haifeng. Morphology determination of ionization region in multi needle to plate negative corona discharge [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(1): 2171-2174.
宿鹏浩, 朱益民, 陈海丰. 多针对板负电晕放电电离区形貌确定 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(1): 2171-2174.
- 13 Yang Shu, Zhang Lingling, Ge Hui. Theoretical analysis of electric field and current density in positive multi needle to plate corona discharge [J]. *Science Paper Online*, 2010, 5(5): 377-381.
杨 树, 张零零, 葛 辉, 等. 针对板正电晕放电电场强度及电流密度理论分析 [J]. *中国科技论文在线*, 2010, 5(5): 377-381.
- 14 Feng Hongyan, Wu Rong, Li Yan, *et al.*. Diagnoses of mini plasma electron density by atomic emission spectroscopy [J]. *J Analytical Science*, 2008, 24(1): 103-107.
冯红艳, 吴 蓉, 李 燕, 等. 小尺寸等离子体电子密度原子发射光谱诊断 [J]. *分析科学学报*, 2008, 24(1): 103-107.
- 15 P Paris, M Aints, F Valk, *et al.*. Intensity ratio of spectral bands of nitrogen as a measure of electric field strength in plasmas [J]. *J Phys (D)*, 2005, 38(21): 3894-3899.

栏目编辑: 史 敏