

# 空气介质阻挡放电单个微放电通道发光强度及 振动激发温度的空间分布<sup>\*</sup>

董丽芳<sup>†</sup> 杨 丽 李永辉 张彦召 岳 晗

(河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

(2008 年 9 月 28 日收到, 2009 年 2 月 24 日收到修改稿)

通过清洗放电方法, 在平行平板介质阻挡空气放电中得到了单个稳定的微放电通道(又称放电丝), 测量了从瞬时阳极到瞬时阴极单个放电丝的发光强度及振动激发温度的空间分布. 研究表明: 在外加电压的每半周中放电丝发光呈现杯型分布, 杯底位于瞬时阴极处, 振动温度在两平行板间隙的中心处最高而在瞬时阳极处最低.

关键词: 介质阻挡放电, 微放电通道, 振动温度

PACC: 5280, 0765

## 1. 引 言

介质阻挡放电(DBD)是一种典型的非平衡态交流气体放电, 它通常是由两个平行电极组成, 其中至少在一个电极表面覆盖上电介质. 近年来, 介质阻挡放电已广泛应用于等离子显示、发光、等离子体化学气相沉积及臭氧合成等诸多工业领域, 并有望应用于信息处理、等离子体光子晶体及材料的局域生长等方面<sup>[1-11]</sup>.

依据放电气体的气压  $p$  和放电间隙  $d$  的乘积  $pd$  值的大小, 放电呈现不同的模式. 当  $pd$  值较高时(一般大于  $13 \text{ Pa}\cdot\text{m}$ ), 放电是由大量的微放电组成的. 这些微放电的持续时间很短(在空气中通常为纳秒量级), 且在空间上随机分布. 如果微放电反复发生在某一个空间位置, 肉眼看来就形成一个稳定的微放电通道, 又称放电丝. 每一个微放电通道就是一个强烈的流光放电过程, 带电粒子的输运过程及等离子体化学反应就发生在这些放电通道内. 因此, 微放电是介质阻挡放电等离子体的基本单元, 对其特性研究十分重要.

为了研究微放电的性质, 人们致力于从实验上获得单个微放电丝. 由于在两个平行平板电极介质阻挡放电装置中获得单个微放电通道非常困难, 人

们通常采用特殊形状的电极. 例如, Kozlov 小组<sup>[12]</sup>利用半球电极, 在空气中得到了稳定的微放电通道, 并利用单光子计数方法研究了放电通道内光谱的时空分布; Merbahi 等<sup>[13]</sup>利用针状电极在 Ar 气中获得了稳定的单个放电丝, 并且采用高速相机拍摄了微放电通道的发光过程. 然而, 这些研究仅能为搞清平板介质阻挡放电微放电性质提供参考. 如在平板介质阻挡放电装置中, 稳定的微放电通道的形成与壁电荷有关, 而上述微放电是通过特殊形状的电极诱导实现的, 因此二者在某些方面(如放电在电极表面的分布等)应存在差异.

本工作在平行平板介质阻挡放电装置上, 通过特殊的清洗放电方法获得了稳定的单个空气微放电丝, 并采用光学和光谱方法研究了从瞬时阳极到瞬时阴极单丝放电通道发光强度及振动激发温度的空间分布.

## 2. 实验装置及方法

实验装置在文献[14]中已有详细的介绍, 现简介如下: 电极是由两个直径为 47 mm 装满水的圆柱形容器组成, 将其平行放置在密闭容器中, 放电间距以及气体压强都可以调节. 本实验中放电间距为 3 mm, 放电气体为空气, 气体压强为  $0.3 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 电

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10575027, 10775037)和河北省自然科学基金(批准号: A2006000950, A2008000564)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: Donglf@mail.hbu.edu.cn

源输出频率为 50 kHz 的正弦波,电压可以在 1—10 kV 之间调节.放电的光信号通过光电倍增管采集并输入示波器.利用型号为 Acton 2750 的光谱仪,光栅刻线为 300/mm 采集光谱信号,曝光时间为 1 s.

在实验中,我们采用清洗放电的方法获得了单个稳定的放电丝,如图 1 所示,放电通道近似为 H 形.所谓清洗放电,就是首先升高电压使气体击穿形成很多的放电丝,然后再逐渐降低电压使放电丝数目逐渐减少.在本实验条件下,当电压降至 3.6 kV 时可以得到单个放电丝,其稳定时间可长达 30 min 以上,且重复性很好.单个放电丝的获得,使很多测量成为可能.如图 1 所示,通过透镜将单个放电丝成一个放大的像,利用带有光纤探头的光电倍增管及光谱仪测量了光信号的时空分布及振动激发温度的空间分布,给出的结果为 10 次实验数据的平均值.

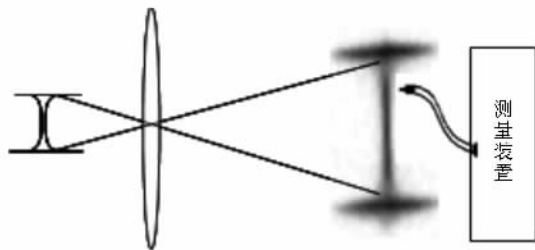


图 1 单个微放电通道沿轴向空间分布测量原理示意图

### 3. 结果与讨论

实验中,首先对单个微放电丝发光的空间分布进行了测量.图 2 为从两平行板间隙方向拍摄的单个微放电丝照片.由图 2 可以看出,放电丝的侧面呈现 H 型,两边和中间都很亮,而在靠近极板处出现一个暗区.由于我们所使用外加电压的周期为 20  $\mu$ s,而照片的曝光时间为 25 ms,因而照片是光强的时间积分结果,即上千次放电叠加的结果.为了测量单个放电丝内瞬时光强分布,实验采用了带有光纤探头(光纤束直径为 2.4 mm)的光电倍增管.

实验首先测量了微放电通道内 4 个不同位置  $A(0,0)$ 、 $B(0.3,0)$ 、 $C(1.5,0)$  及  $D(0,0.8)$  处的发光随时间的变化,如图 3 所示. $A$  点靠近的极板接电源的输出,相对的极板接地.因此,对于外加电压的正半周, $A$  点所在极板为瞬时阳极,反之则为瞬时阴极.由图 3 可见, $A$ 、 $B$  两点的光信号在相邻的正负半周中呈现强弱交替,而  $C$ 、 $D$  两点的光信号强度

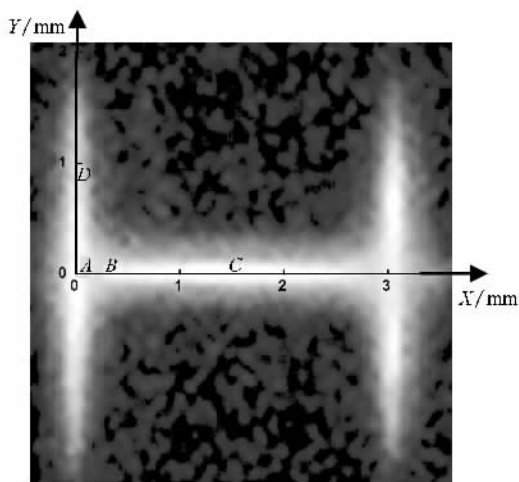


图 2 单个微放电丝侧面照片  $x=0.3$  mm 分别为两介质表面.实验条件为电压频率  $f=50$  kHz,气隙间距  $d=3$  mm,气压  $p=0.3 \times 10^5$  Pa,照片曝光时间为 25 ms,放电气体为空气

在两次放电中几乎相等.在外加电压的正半周, $A$ 、 $B$  两点靠近阳极板,此时光信号强,而在外加电压的负半周, $A$ 、 $B$  两点靠近阴极板,此时光信号较弱.由此推测,在放电通道击穿发光的过程中,阴极附近放电的发光强度小于阳极附近发光的强度.由于发光强度正比于电子数,因而阴极附近的电子数小于阳极附近的电子数. $C$  点因为是放电通道的中心点,不论哪个极板是瞬时阳极,这点的的光信号强度应当不变,因此在两次放电中强度相等.由图 3 还可看到, $D$  点处光信号在正负半周的放电发光强度几乎相等.

仔细观察微放电通道内各点发光信号的时间波形可以发现,所有空间位置的放电起始时间(相对于电压零点)几乎相同,因此可以认为微放电通道内各点同时放电.由此测量不同空间位置处在外加电压的每半周中放电发光峰值的强度,便可得到单个微放电发光光强的空间分布.实验沿着图 2 所示的  $x$ - $y$  方向,在  $x=0$  到  $x=3$  mm, $y=-0.8$  mm 到  $y=0.8$  mm 范围内测量了  $9 \times 5$  个点的光强,由此得到光强分布.图 4 为放电丝发光强度空间分布的等值线图,左侧极板为瞬时阳极,右侧极板为瞬时阴极.可见放电丝发光强度呈现杯型分布,杯底位于瞬时阴极处,这与文献[13]图 2、图 3 采用高速相机所拍摄的结果相一致.有些文献之所以说放电的形状像漏斗状<sup>[13]</sup>是因为他们只考虑阳极放电形状,而未考虑阴极层的发光.分析表明,阳极处放电的形状与介质表面电荷积累有关.放电产生的电子向阳极运动,由

于介质的存在,电子将累积在介质表面.随着放电的继续,电子就不断地积累.但是,后来的电子会受到已累积电子的排斥,使得在阳极区域形成一个漏斗

状;关于阴极层发光的形成,是由于激发粒子(如本实验中  $N_2$  的激发等)的存在.快速照相的结果<sup>[13]</sup>表明,即使放电熄灭阴极层的发光仍能持续 200 ns.

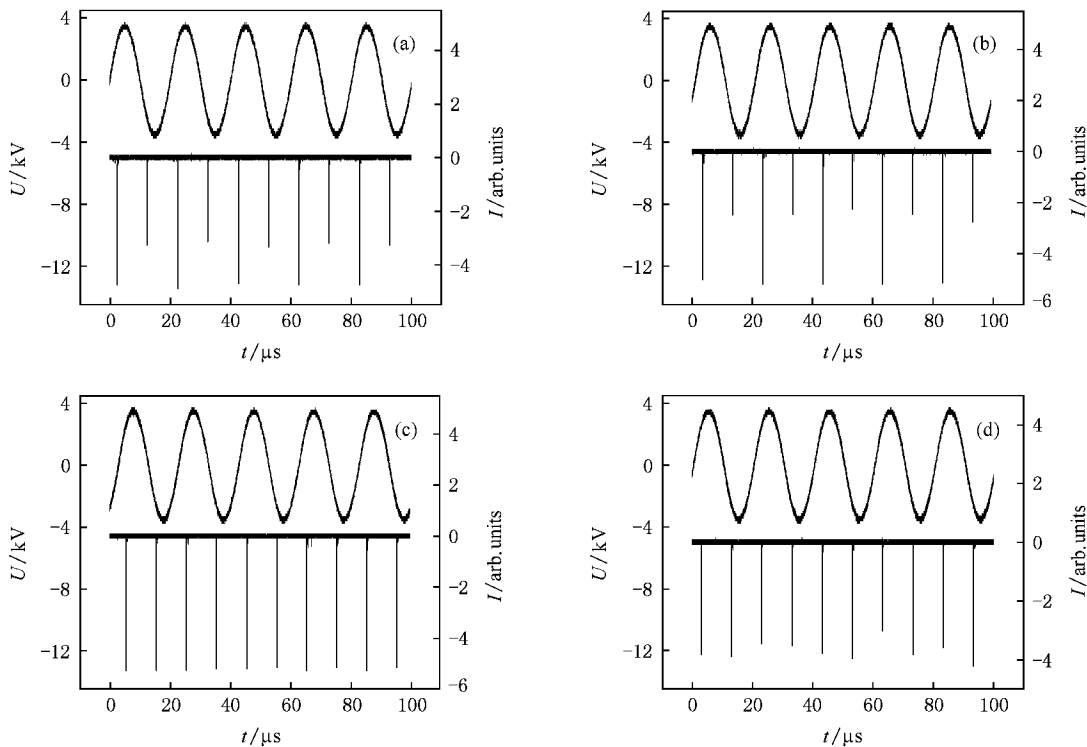


图 3 微放电通道内的发光信号 (a)A(0,0)(b)B(0.3,0)(c)C(1.5,0)(d)D(0,0.8)实验条件同图 2

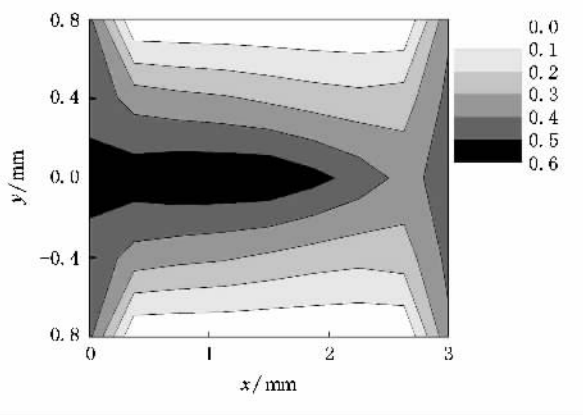


图 4 单个微放电发光光强的空间分布 空间分辨率为 0.24 mm,实验条件同图 2

实验进一步研究了单个微放电通道的振动温度的空间分布.我们知道,在热平衡条件下,各振动能级上的粒子数  $N_\nu$  满足 Boltzmann 分布,即

$$N_\nu \propto e^{-\alpha \nu hc / (k_B T)},$$

其中  $G(\nu)$  为光谱项,  $\nu$  为振动量子数,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $k_B$  为 Boltzmann 常数,  $T$  为温度.而

发射谱线强度  $P^u_{\nu^d}$  满足

$$\sum_{\nu^d} \frac{P^u_{\nu^d}}{\nu^d} \propto N_{\nu^u},$$

其中  $\nu^u$  和  $\nu^d$  分别为上下能级的振动量子数,  $\nu$  为波数.因此,在热平衡条件下,可以得到:

$$\ln \sum_{\nu^u, \nu^d} \frac{P^u_{\nu^d}}{\nu^d} = C_0 - \frac{G(\nu^u)hc}{kT},$$

其中  $C_0$  为常数.因此,把在不同  $\nu^d$  带组中测得的带强度之和的对数相对于振动项值  $G(\nu)$  作图时,可得到一条直线,其斜率为  $hc / (k_B T)$ ,由此就可以得到温度  $T$ .此方法仅在带系的激发是纯热激发时才能给出可靠的结果,但即使在非热激发的情形中上述作图也常会得到一条直线,并且从这条直线的斜率至少可以求出有效“振动”温度<sup>[15]</sup>.本工作系统属非热平衡系统,因而所得到的振动温度为有效“振动”温度.

首先,采用光谱仪采集了放电丝不同位置处的发射光谱.如图 5 所示,谱线主要是  $N_2$  分子第二正带系的振动谱线(300—450 nm).图 5(a)为极板上 A(0,0)点处的光谱,图 5(b)为中心 C(1.5,0)点处

的光谱. 显见, 不同位置处的谱线强度(如 337.1 nm) 以及不同谱线之间的相对强度(如 337.1 nm 谱线强

度与 357 nm 谱线强度之比) 都是不同的. 为此, 我们进一步研究了谱线强度及振动温度的空间分布.

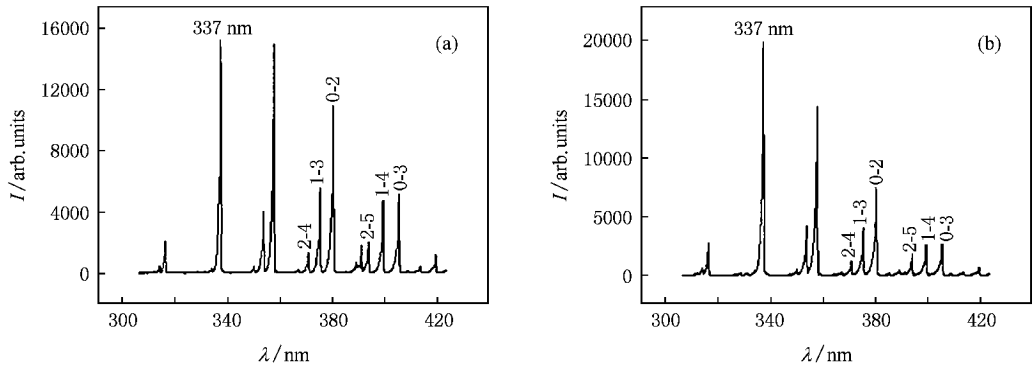


图 5 微放电通道内两处 N<sub>2</sub> 分子第二正带系的振动谱线 (a)  $\alpha(0,0)$  (b)  $\alpha(1.5,0)$  实验条件同图 2

图 6 给出了 337.1 nm 谱线强度分布. 沿放电通道谱线强度近似为 W 形分布, 两极板间隙中心处强度最大, 随着向极板靠近强度迅速减小, 接近极板时又稍稍变大.

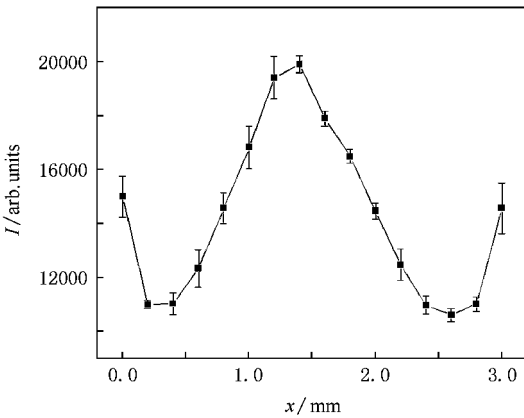


图 6 N<sub>2</sub> 分子 337.1 nm 的谱线强度沿微放电通道轴向(x 方向) 的分布 实验条件同图 2

图 7 给出了振动温度的空间分布. 在振动温度的计算中采用的是 N<sub>2</sub> 分子第二正带系 ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ) 的顺序带组  $\Delta v = -2$  (0-2, 1-3, 2-4) 和  $\Delta v = -3$  (0-3, 1-4, 2-5). 由图 7 可见, 振动温度在放电通道内分布近似为 n 形. 在放电通道的两侧振动温度较低, 在放电通道的中心达到最大. 然而, 需要指出的是, 由于光谱仪灵敏度的限制, 实验中采集光谱时电荷耦合器件 (CCD) 的曝光时间最短为 1 s, 无法实现单个周期内放电光谱的测量. 因而采集到的光谱是多个放电周期 (约 50000 次) 叠加的结果, 由此计算得到的振动温度是正负半周时间平均的结果.

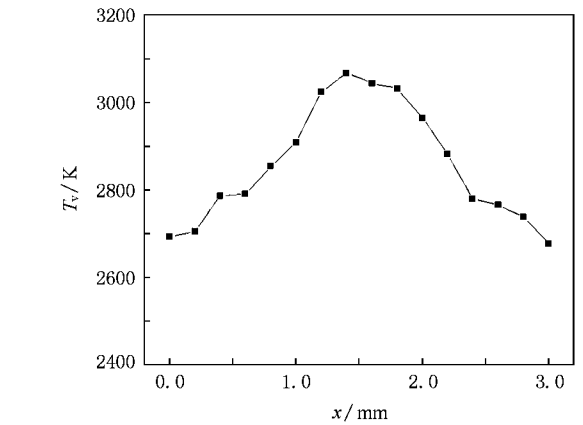


图 7 振动温度  $T_v$  沿微放电通道轴向(x 方向) 的分布 实验条件同图 2

为了根据上述振动温度分布分析在每次放电过程中从瞬时阳极到瞬时阴极振动温度的分布情况, 实验研究了 337.1 nm 谱线强度的瞬时空间分布. 在光电倍增管前加 337.1 nm 滤光片, 把谱线 337.1 nm 从放电的总光中分离出来, 并且将其在放电通道内的发光情况进行了逐点测量, 结果如图 8 曲线 a 和曲线 b 所示. 在外加电压的正半周(图 8 曲线 a), 放电通道内从瞬时阳极到中心谱线强度增大, 到放电通道的中心附近 0.5 mm 区域内光强达到最大, 之后光强迅速下降. 在外加电压的负半周(图 8 曲线 b), 变化相似. N<sub>2</sub> 分子 337.1 nm 谱线属于第二正带系谱线, 需要能量大于 11 eV 的电子激发产生. 在气体放电过程中, 电子从阴极向阳极加速运动, 其能量逐渐增大. 在阴极附近时, 由于达到 11 eV 的电子数量少, 只能激发较少数量的 N<sub>2</sub> 分子跃迁, 此时谱线

337.1 nm 的强度较低.当距离阴极较远时,电子能量增加,能量大于 11 eV 的电子越来越多,所激发的  $N_2$  分子数量也就越来越多,因此谱线 337.1 nm 的强度逐步增加.但靠近阳极时,由于电子能量过高,使得一部分电子去激发某些更高的激发态(如  $N_2^+$  的激发态),致使谱线 337.1 nm 的强度有所减小.如果将放电的正、负半周的光强进行叠加(如图 8 曲线 c)结果和图 6 基本一致.需要指出的是,从阳极到中心谱线 337.1 nm 的强度远高于其从中心到阴极的强度,因此用光谱仪所测出的谱线 337.1 nm 的强度(图 6)主要是由从阳极到中心的谱线强度贡献的,而从中心到阴极的贡献很小.计算振动温度所选用的顺序带组  $\Delta\nu = -2$  和  $\Delta\nu = -3$  中的 380 nm, 405 nm 谱线与 337.1 nm 谱线具有相同的上能级,因此这两条谱线强度的瞬时空间分布应与 337.1 nm 谱线强度的瞬时分布相同.这说明由光谱仪所测出的谱线强度分布主要是由从阳极到中心部分的谱线强度贡献的,而从中心到阴极部分的贡献很小.因此图 7 所给出的振动温度分布主要表征了从阳极到中心的温度分布,即从阳极到中心振动温度是增加的,到中心处达到最大,而从中心到阴极的变化情况却无从得知.

另外,需要指出的是,本工作所给出的单个微放电通道发光强度及振动激发温度的空间分布均是在正弦电压下得到的,至于这些分布是否与电压波形有关,还需要做进一步的研究.

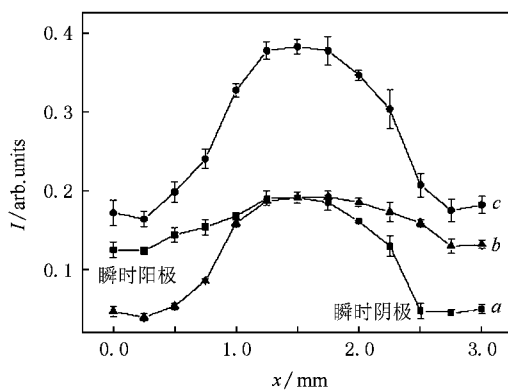


图 8 单个微放电发光谱线 337 nm 光强在正、负半周的轴向( $x$  方向)分布曲线及其两曲线的叠加.曲线  $a$  为正半周时的分布,此时  $x=0$  对应瞬时阳极, $x=3$  mm 对应瞬时阴极;曲线  $b$  为负半周时的分布,此时  $x=0$  对应瞬时阴极, $x=3$  mm 对应瞬时阳极;曲线  $c$  为单个微放电发光谱线 337 nm 光强在正、负半周叠加后沿轴向( $x$  方向)的分布.实验条件同图 2

## 4. 结 论

通过清洗放电的方法,在平行平板介质阻挡空气放电中得到了单个稳定的微放电通道(放电丝).测量了从瞬时阳极到瞬时阴极单个放电丝的发光强度及振动激发温度的空间分布.结果表明,在外加电压的每半周中放电丝发光呈现杯型分布,杯底位于瞬时阴极处,振动温度在两平行板间隙的中心处最高而在瞬时阳极处最低.

[1] Kogelschatz U, Eliasson B, Egli W 1999 *Pure Appl. Chem.* **71** 1819  
 [2] Kogoma M, Okazaki S 1994 *J. Phys. D* **27** 1985  
 [3] Eliasson B, Kogelschatz U 1991 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **19** 309  
 [4] Liu S H, Neiger M J 2001 *J. Phys. D* **34** 1632  
 [5] Gherardi N, Martin S, Massines F 2000 *J. Phys. D* **33** 104  
 [6] Kuzumoto M, Ogawa S, Tanaka M, Yagi S 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 1130  
 [7] Dhali S K, Sardja I 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 6319  
 [8] Liu Y Y, Bauer-Grosse E, Zhang Q Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2359 (in Chinese) [刘燕燕, Bauer-Grosse E, 张庆瑜 2007 物理学报 **56** 2359]  
 [9] Ma X T, Zheng W H, Ren G, Fan Z Q, Chen L H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 977 (in Chinese) [马小涛, 郑婉华, 任刚, 樊中期, 陈良惠 2007 物理学报 **56** 977]

[10] Ammelt E, Astrov Y A, Purwins H G 1998 *Phys. Rev. E* **58** 710  
 [11] Jiang N, Qian S F, Wang L, Zhang X H 2001 *Thin Solid Film* **390** 119  
 [12] Kozlov K V, Wagner H E, Brandenburg R 2001 *J. Phys. D* **34** 3164  
 [13] Merbahi N, Sewraj N, Marchal F, Salamero Y, Millet P 2004 *J. Phys. D* **37** 1664  
 [14] Dong L F, Li S F, Liu F, Liu F C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 362 (in Chinese) [董丽芳, 李树锋, 刘峰, 刘富成 2006 物理学报 **55** 362]  
 [15] Herzberg G 1953 *Molecular Spectra and Molecular Structure* (Volume 1) (中译本) (Beijing: Science Press) pp155, 156 (in Chinese) [赫兹堡 G 1953 分子光谱与分子结构(第一卷)北京:科学出版社 第 155, 156 页]

# Spatial distributions of the intensity of luminescence and the vibrational temperature of single micro-discharge channel in air dielectric barrier discharge<sup>\*</sup>

Dong Li-Fang<sup>†</sup> Yang Li Li Yong-Hui Zhang Yan-Zhao Yue Han  
( *College of Physics Science and Technology , Hebei University , Baoding 071002 , China* )  
( Received 28 September 2008 ; revised manuscript received 24 February 2009 )

## Abstract

A stable micro-discharge channel ( filament ) in air discharge is obtained by discharge cleaning method in a dielectric barrier discharge system with two water electrodes. The distributions of intensity of luminescence and the vibrational temperature of a single micro-discharge filament are measured from instantaneous anode to instantaneous cathode. It is found that the emission intensity of discharge filament presents a distribution like a goblet with base locating at instantaneous cathode in each half period of the applied voltage. The vibrational temperature reaches the maximum at the middle of gap of the two parallel electrodes and is the minimum at the instantaneous anode.

**Keywords** : dielectric barrier discharge , micro-discharge channel , vibrational temperature

**PACC** : 5280 , 0765

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grants Nos. 10575027 , 10775037 ) and the Natural Science Foundation of Hebei Province , China ( Grant Nos. A2006000950 , A2008000564 ).

<sup>†</sup> E-mail : Donglf@mail.hbu.edu.cn