

# 流动氩气放电系统中条纹斑图形成的实验研究\*

李雪辰<sup>†</sup> 刘润甫 贾鹏英 孔柳青

(河北大学物理科学与技术学院, 河北省光电信息材料重点实验室, 保定 071002)

(2011年8月20日收到; 2011年9月29日收到修改稿)

采用双水电极介质阻挡放电装置, 在大气压下流动氩气中产生了稳定的条纹斑图, 并采用拍照和电学方法对其产生机理进行了研究. 研究发现, 条纹斑图仅出现在外加电压较低的情况下, 在较高电压下放电会过渡到均匀模式. 低电压下的条纹斑图是由于放电丝沿着气流方向定向移动形成的, 该定向移动速度几乎与电压无关, 主要由气体流量决定. 分析发现放电空间中活性粒子的记忆效应对条纹斑图的形成起决定作用. 电学测量发现放电电流和放电的气隙起始电压都随着气流的增加而减小, 本文对这一现象进行了定性解释. 本文结果对斑图动力学研究和介质阻挡放电的工业应用都具有很重要的意义.

**关键词:** 条纹斑图, 介质阻挡放电, 放电丝, 移动速度

**PACS:** 52.80.Tn, 52.70.Ds, 52.80.Hc

## 1 引言

斑图是指在空间或时间上具有某种规律性的非均匀宏观结构<sup>[1]</sup>, 是一种典型的非线性自组织现象, 它广泛存在于自然界中. 为了对斑图演化规律进行研究, 一般是利用各种实验系统产生斑图<sup>[2-4]</sup>. 介质阻挡放电 (DBD) 作为一个新兴的斑图产生系统, 因为操作简单, 容易形成稳定的斑图, 越来越受到斑图研究者的关注. DBD 有望在未来信息处理、材料的局域生长及新近提出的等离子体光子晶体等方面得到应用<sup>[5,6]</sup>.

近年来, 在 DBD 系统中发现了多种类型的斑图, 比如点阵斑图、超点阵斑图、条纹斑图等. 随着斑图动力学的发展, 气流对放电的影响越来越受到重视. Wang 等<sup>[7]</sup> 在大气压空气 DBD 中发现, 没有气流时放电为丝状, 在气流的作用下放电会转变为弯曲的条纹. Dong 等<sup>[8]</sup> 在静止氩气 DBD 中观察到了四边形斑图, 通过引入气流发现放电斑图由四边形转变为条纹. Gherardi 等<sup>[9]</sup> 在 DBD 中加入气流, 发现放电从丝状模式过渡到均匀放电. Luo 等<sup>[10]</sup> 研究大气压氩气 DBD 时发现气流能够减小

放电空间杂质粒子密度, 从而使放电起始电压降低. 梁卓等<sup>[11]</sup> 研究氩气 DBD 时发现, 增大气流可以使更多亚稳态粒子存活到下半周期放电的起始时刻, 从而实现大气压均匀放电.

显然, 气流对 DBD 放电特性和斑图形成都有很大的影响, 但目前关于气流对 DBD 斑图的影响机理尚不清楚. 对此, 本工作对流动氩气中的斑图形成和放电特性进行研究. 结果表明条纹斑图的形成是由于放电丝在气流的作用下定向移动产生的. 进一步分析发现, 空间活性粒子的记忆效应是放电丝沿着气流方向发生定向移动的原因.

## 2 实验装置

实验装置如图 1(a) 所示, 两个圆形管中装满水作为水电极, 管的两端用石英玻璃封住. 石英玻璃作为 DBD 的介质阻挡层, 其厚度均为 1.0 mm. 水电极内径为 75 mm. 两个垫片间的距离固定为 38 mm. 高压电源输出频率为 55 kHz 的正弦波, 其输出峰值电压  $V_p$  为 0—5 kV 可调, 利用 Tektronix P6015A 型高压探头测量电压, 并用 Tektronix DPO4054 型数

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10805013, 51077035)、河北省杰出青年基金 (批准号: A2012201045)、教育部科学技术研究重点项目 (批准号: 210014)、河北省自然科学基金 (批准号: A2011201134, A2009000149) 和河北省教育厅优秀青年项目 (批准号: Y2011120) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: plasmalab@126.com

字示波器记录. 利用串联在放电回路中的一个  $50\ \Omega$  的电阻测量放电电流. 利用 DIMAGE Z2 型数码相机拍摄放电照片.

实验所用氩气纯度为 99.99%, 为了使气体均匀流入放电间隙, 特别设计了一个进气装置, 如图 1(b) 所示. 在一个内径为 1 cm, 外径为 1.5 cm 玻璃管的一侧均匀打 40 个小孔, 小孔排列成之字形, 每个小孔直径为 1 mm. 通过玻璃板连接, 使得小孔流出的气流进入放电间隙. 放电间隙通过在水电极间平行插入两条玻璃板形成, 玻璃板厚度为 2.5 mm, 相距 38 mm. 这样由两条玻璃板和电极就限定了放电的有效区域. 在气流进入放电间隙前的进气玻璃管附近放入了一层海绵.

### 3 实验结果与分析

图 2 给出了氩气流量  $Q$  为 1.6 L/min, 不同  $V_p$  时的放电照片, 拍摄时的曝光时间  $t_{\text{exp}} = 20\ \text{ms}$ . 在流动的氩气中, 较低外加电压下放电可以获得稳定的条纹斑图, 如图 2(a) 和 (b) 所示. 显然, 图 2(b) 放电条纹的个数比图 2(a) 多, 这说明电压越高放电条纹的个数越多. 当外加电压增加到一定程度, 放电空间会出现均匀放电, 均匀放电一般出现在远离边缘的部位, 如图 2(c) 所示. 当外加电压进一步增加, 均匀放电的区域扩大, 直至整个放电区域都实现了均匀放电, 如图 2(d) 所示.

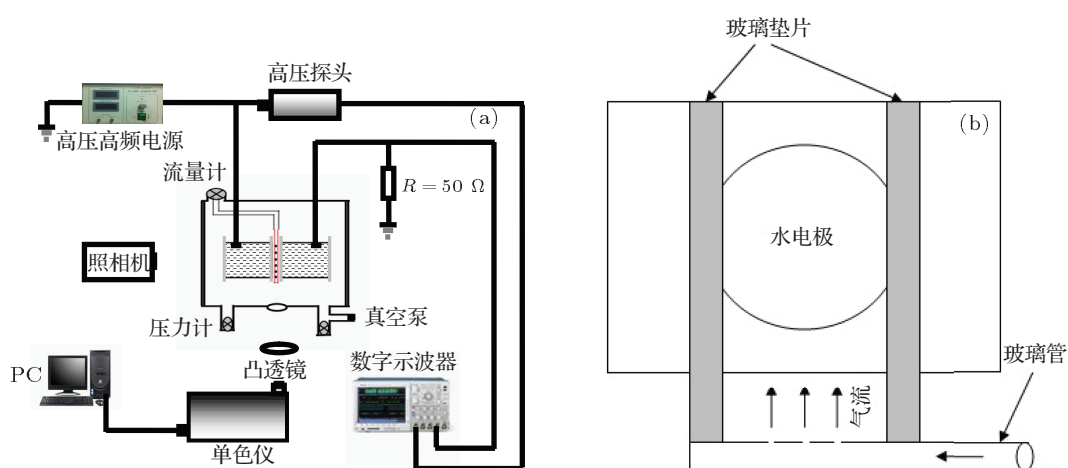


图 1 (a) 实验装置示意图; (b) 电极布置及进气示意图

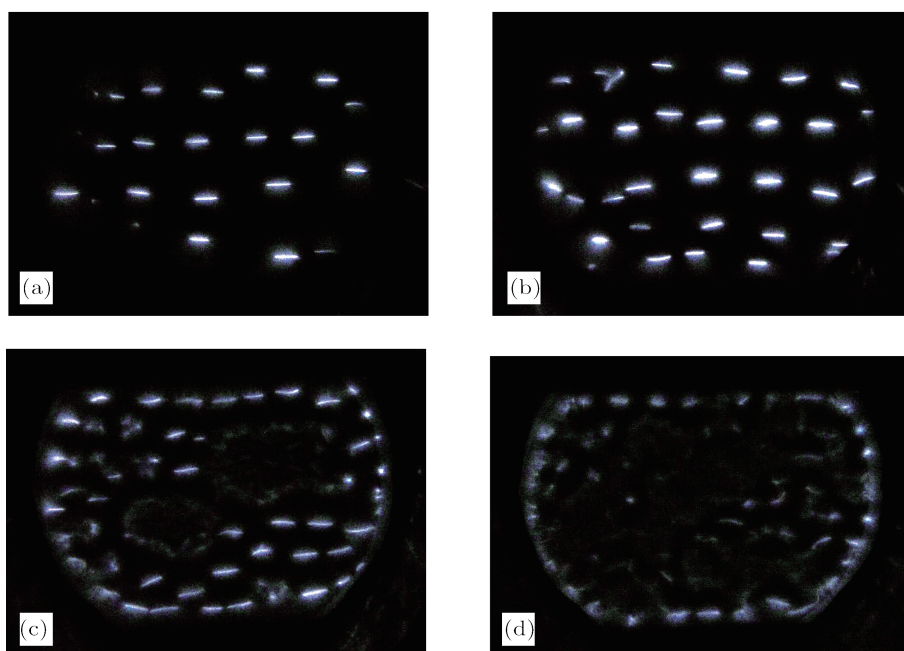


图 2  $Q = 1.6\ \text{L/min}$ ,  $t_{\text{exp}} = 20\ \text{ms}$  时, 不同外加电压下的放电照片 (a)  $V_p = 1.6\ \text{kV}$ ; (b)  $V_p = 2.8\ \text{kV}$ ; (c)  $V_p = 3.2\ \text{kV}$ ; (d)  $V_p = 3.9\ \text{kV}$

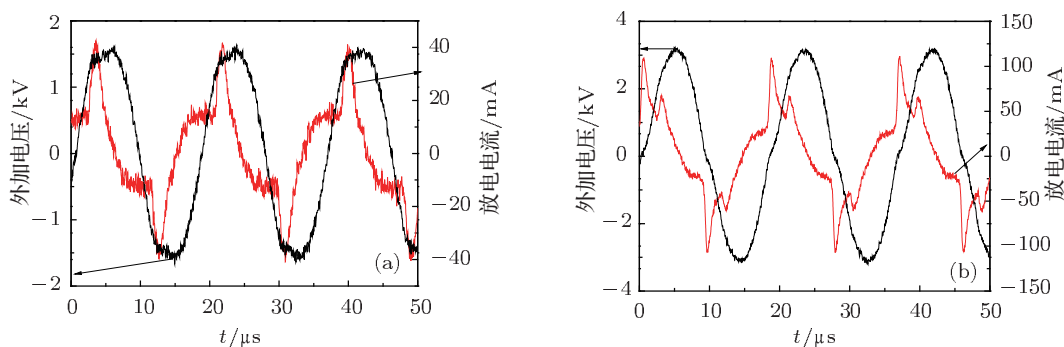


图3 不同峰值电压下放电的电压电流波形 (a)  $V_p = 1.6$  kV; (b)  $V_p = 3.2$  kV

对不同外加电压下放电电流信号进行采集, 结果如图3所示. 从图3可以看出, 在外加电压较低时每个电压半周期只有一个放电电流脉冲, 如图3(a)所示. 当外加电压增加到一定程度, 在每个半周期内会出现两个放电电流脉冲, 如图3(b)所示. 值得指出的是, 当刚出现第二个放电脉冲时, 正对应图2(c)出现局部均匀. 这是因为随着外加电压的升高, 放电空间趋于产生更多的放电丝. 这些新出现的微放电出现在外加电压峰值处, 说明这些微放电具有较少的壁电荷, 因此记忆效应较弱. 新微放电的壁电荷会影响原来微放电丝壁电荷的分布, 使得一定区域内的微放电重新分布. 在此过程中, 记忆力较弱的某些新微放电可能熄灭, 某些微放电亦可能新的位置产生, 即新微放电不稳定. 受其影响的区域放电丝位置不固定, 因此实现局部均匀放电.

为了研究条纹斑图的形成机理, 通过改变照相机的曝光时间对条纹斑图进行拍照, 结果如图4所示. 从图4可以看出, 曝光时间越短条纹长度越短. 当曝光时间足够小时 (如图4(d)所示), 放电照片上呈现的是一些圆点, 而这些圆点对应着微放电丝. 由此可以说明放电丝是移动的, 并且移动方向和气流方向一致. 正是由于放电丝在曝光时间内的移动才产生了具有一定长度的条纹, 即条纹斑图的产生是由于放电丝沿着气流方向定向移动造成的. 利用Photoshop软件对放电丝的移动长度进行测量, 在 $Q = 2$  L/min的情况下得到了曝光时间与放电丝移动长度 $L_d$ 的关系, 如图5所示.

通过图5可以计算放电丝的移动速度. 图6给出了不同气体流量下放电丝移动速度 $v_d$ 与峰值电压的关系. 从图6可以看出, 放电丝的移动速度在误差范围内几乎不随电压的变化而变化, 这是因为气流推动的是放电产生的活性粒子的运动, 而不是

推动壁电荷运动. 最可能的活性粒子是亚稳态粒子, 而外加电压对亚稳态粒子的运动没太大的影响, 但气体流量越大放电丝的移动速度也越大.

众所周知, 在静止气体放电中, 多数情况下会出现微放电丝, 这是由于壁电荷的记忆效应. 引入气流后微放电丝会沿着气流定向移动, 其中有三种可能, 即气流推动壁电荷的运动, 气流推动放电丝本身运动, 以及气流推动放电产生的活性粒子的运动. 首先, 壁电荷是通过介质极化而与介质板紧密相连, 一般认为壁电荷消失只能通过与新放电产生的异性电荷的中和, 或者是离子轰击造成 $\gamma$ 发射. 因此可以忽略气流的推动下壁电荷的运动. 其次, 放电丝中电子和离子的漂移速度分别为 $10^7$ 和 $10^5$  cm/s, 远远大于气体流速, 因此带电粒子在放电过程中主要参与电场方向上的运动, 又因为每次放电的时间与放电周期相比非常短, 放电丝本身在气流的带动下移动的距离相比于放电结束后活性粒子移动的距离小得多. 所以, 气流推动放电丝的机理只能用气流推动放电结束后的活性粒子来解释.

放电产生的活性粒子 (亚稳态粒子、激发态的氩原子、离子、电子等) 中最可能的为亚稳态粒子, 这是因为亚稳态粒子的寿命比其他粒子的寿命长很多, 亚稳态粒子有足够的时间随着气流移动. 简单考虑可以认为活性粒子不随时间衰减, 考虑某次放电产生的活性粒子, 这些活性粒子在这次放电结束后仍然会随着气流移动, 可以计算出到下一次放电时活性粒子移动的距离大约在微米量级, 即每次放电极活性粒子移动的距离与微放电丝的直径 (毫米量级) 相比非常小. 由于壁电荷产生的电场不限制在微放电通道中, 而是分布在一定区域内, 因此, 下半周击穿前活性粒子处壁电荷产生的电场仍然很强, 并且活性粒子的存在会显著降低击穿电场值 (可以称之为活性粒子的记忆效应), 这导致新的

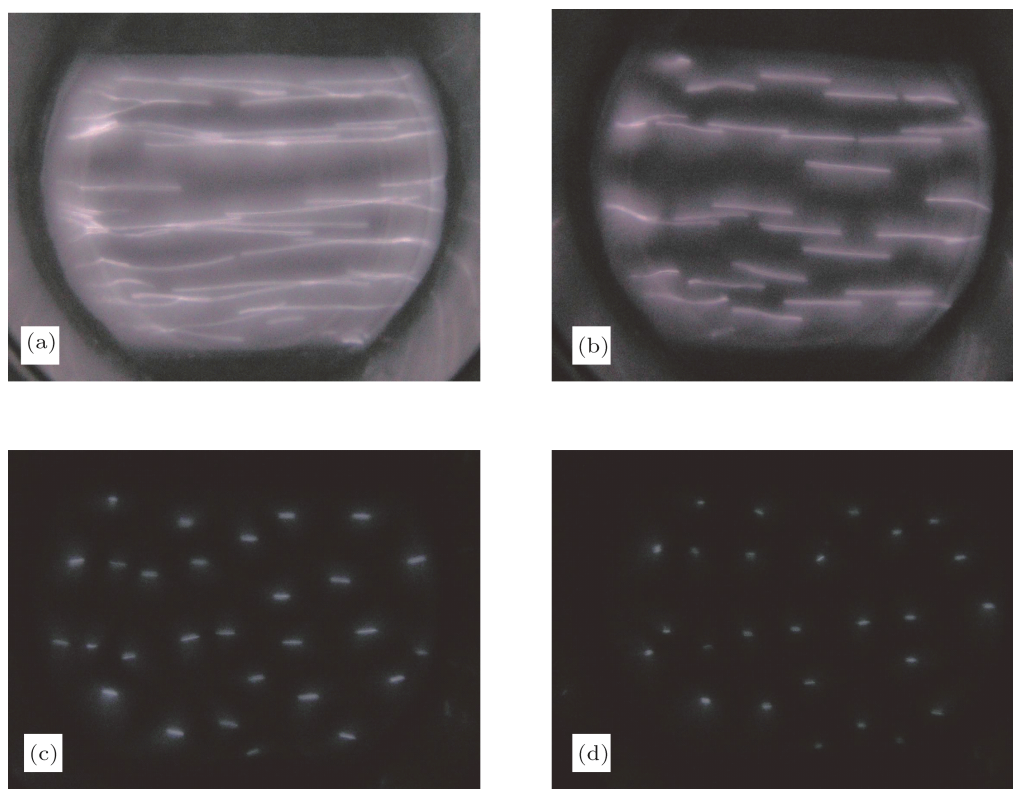


图4  $Q = 2 \text{ L/min}$ ,  $V_p = 2.8 \text{ kV}$  时, 不同曝光时间下的放电照片 (a)  $t_{\text{exp}} = 100 \text{ ms}$ ; (b)  $t_{\text{exp}} = 40 \text{ ms}$ ; (c)  $t_{\text{exp}} = 8 \text{ ms}$ ; (d)  $t_{\text{exp}} = 4 \text{ ms}$

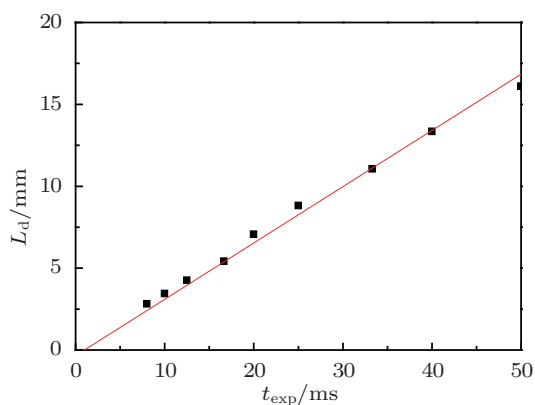


图5  $Q = 2 \text{ L/min}$ ,  $V_p = 2.8 \text{ kV}$  时, 放电丝移动长度与曝光时间的关系

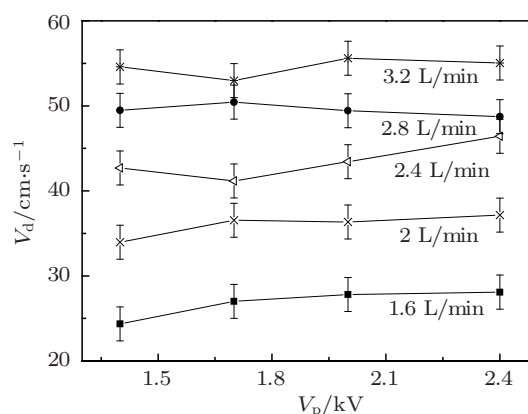


图6 不同气体流量下放电丝的移动速度与峰值电压的关系

微放电将发生在有活性粒子的位置. 显然, 由于活性粒子随着气流定向移动导致微放电丝也会随着气流定向移动. 以上分析说明, 由于壁电荷不随着气流移动而活性粒子随着气流移动, 因此壁电荷的记忆效应趋于产生静止的微放电, 而流动气体中活性粒子的记忆效应会趋于产生条纹.

为了进一步研究流动气体中的放电特性, 测量了不同气流下的放电电流波形, 如图7所示. 从图7

可以看出, 在外加电压不变的情况下, 放电电流随着气体流量的增加而减小. 以上现象可从下面两个方面进行解释: 其一, 根据流体力学, 气流增大会使放电空间的气体压强减小<sup>[7]</sup>, 即放电空间的粒子密度减小, 导致碰撞电离率降低, 即  $\alpha$  过程减弱, 因此使放电电流随气流增大而减小; 其二, 由于气流能带走放电产生的热量, 降低放电空间和介质板的温度, 因此气流增加, 正离子打到阴极表面上所产生

的次级电子发射系数 ( $\gamma$  系数) 会减小, 从而造成放电电流减小.

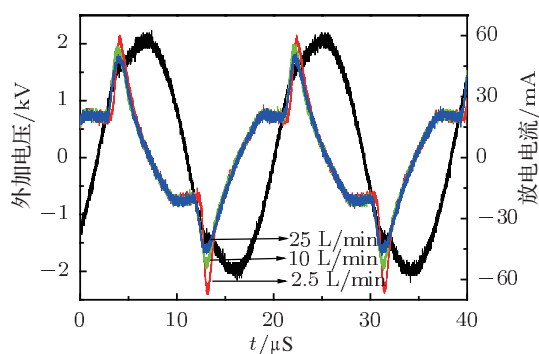


图7 不同气体流量下的电压电流波形

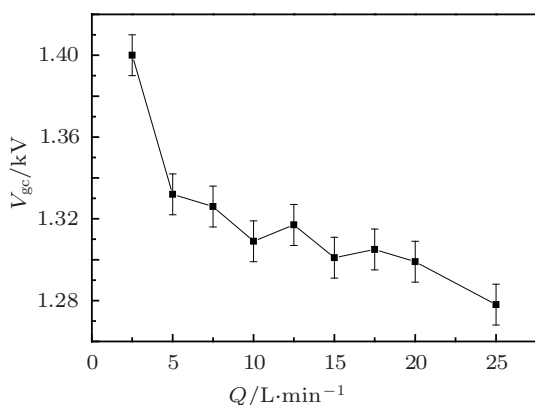


图8  $V_p = 3$  kV 时, 放电的气隙起始电压与气体流量关系

通过外加电压和测试电容上的电压可以获得

气隙电压  $V_g$  [12], 进而可以研究每个半周期放电的气隙起始电压  $V_{gc}$  的大小与气体流量的关系, 结果如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 随着气体流量的增加,  $V_{gc}$  降低. 这说明随着气体流量的增加, 每半周期放电的击穿电压降低. 根据前面的分析, 气流能使放电空间的压强减小, 造成  $pd$  值 ( $p$  为气压,  $d$  为气隙间隙) 减小. 因为实验在大气压下进行, 属于  $pd$  值较大的情况, 对应帕邢曲线的右支. 这样当流量增加时  $pd$  值减小, 因此击穿电压降低. 同样根据前面的分析, 气流增大会导致  $\gamma$  系数减小, 这样气体的击穿电压应该随着气流的增加而增加. 显然, 这与图 8 的结果不一致. 以上分析表明, 气流增大引起压强的变化是导致放电电流减小和  $V_{gc}$  降低的主要因素, 而气流增大引起  $\gamma$  系数减小是次要因素.

## 4 结论

在大气压氩气介质阻挡放电中, 通过引入气流在较低的电压下得到了稳定的条纹斑图, 而在较高的电压下能够实现视觉均匀的放电. 通过对条纹斑图进行研究, 发现其形成是由于放电丝在气流的作用下的定向移动. 分析认为壁电荷的记忆效应趋于产生静止的微放电, 而流动气体中活性粒子的记忆效应会趋于产生条纹. 研究还发现了气流能够减小放电间隙中的压强, 从而降低了放电空间中的粒子的密度, 使碰撞电离率降低, 这是引起放电电流和击穿电压随着气体流量的增加而变化的主要原因.

[1] Ouyang Q 2000 *Pattern Formation in Reaction Diffusion Systems* (Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House) p2 (in Chinese) [欧阳颀 2000 反应扩散系统中的斑图动力学 (上海: 上海科技教育出版社) 第 2 页]  
 [2] Gal P L, Pocheau A, Croquette V 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 2501  
 [3] Logvin Y A, Ackemann T, Lange W 1997 *Europhys. Lett.* **38** 583  
 [4] Yin Z Q, Chai Z F, Dong L F, Li X C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 925 (in Chinese) [尹增谦, 柴志方, 董丽芳, 李雪辰 2003 物理学报 **52** 925]  
 [5] Li X C, Jia P Y, Zhao N 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 045203  
 [6] Sakai O, Sakaguchi T, Tachibana K 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 241505  
 [7] Wang Z, Ren C S, Nie Q Y, Wang D Z 2009 *Plasma Sci. Technol.*

11 177

[8] Dong L F, Mao Z G, Yin Z Q, Ran J X 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 5142  
 [9] Gherardi N, Gouda G, Gat E, Ricard A, Massines F 2000 *Plasma Sources Sci. Technol.* **9** 340  
 [10] Luo H Y, Liang Z, Wang X X, Guan Z C, Wang L M 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 20520  
 [11] Liang Z, Luo H Y, Wang X X, Guan Z C, Wang L M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8739 (in Chinese) [梁卓, 罗海云, 王欣欣, 关志成, 王黎明 2010 物理学报 **59** 8739]  
 [12] Brenning N, Axnas I, Nilsson J O, Eninger J E 1997 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** 83

# Experimental investigation on the formation of stripe pattern in flowing argon discharge system\*

Li Xue-Chen<sup>†</sup> Liu Run-Fu Jia Peng-Ying Kong Liu-Qing

(Key Laboratory of Photo-Electronics Information Materials of Hebei Province, College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

(Received 20 August 2011; revised manuscript received 29 September 2011)

## Abstract

Stable stripe pattern is observed in flowing argon at atmospheric pressure by using a dielectric barrier discharge device with two transparent water electrodes. Based on the photography and the electrical measurement, the formation mechanism of stripe is investigated. Results show that a stripe pattern can be obtained at a lower peak value of the applied voltage in flowing argon, and the discharge turns homogeneous at a higher voltage. Results show that the formation of stripe pattern results from the movement of discharge filament in the direction of gas flow. The moving velocity of filaments almost keeps constant during the voltage varying. However, the moving velocity increases with the increase of gas flow rate. The memory effect of active particles in the discharge space is very important for the formation of stripe pattern. Furthermore, the electric characteristics of discharge are studied in flowing gas in this paper. It is found that both the discharge current and the gas inception voltage decrease with the increase of the gas flow rate. A qualitative explanation is given for this experimental phenomenon. These results are of great importance for the research of pattern formation dynamics and industrial applications of dielectric barrier discharge.

**Keywords:** strip pattern, dielectric barrier discharge, discharge filament, moving velocity

**PACS:** 52.80.Tn, 52.70.Ds, 52.80.Hc

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10805013, 51077035), the Fund for Distinguished Young Scientists of Hebei Province, China (Grant No. A2012201045), the Key Program of Ministry of Education, China (Grant No. 210014), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. A2011201134, A2009000149), and the Program for Outstanding Youth of the Education Commission of Hebei Province, China (Grant No. Y2011120).

<sup>†</sup> E-mail: plasmalab@126.com