

# 大气压氩气介质阻挡放电中的 四边形斑图和六边形斑图\*

董丽芳<sup>†</sup> 李树锋 刘 峰 刘富成 刘书华 范伟丽

(河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

(2005 年 2 月 6 日收到, 2005 年 4 月 27 日收到修改稿)

在大气压氩气介质阻挡放电中, 研究了斑图形成随放电条件的变化. 观察到随电压的增加, 斑图经历六边形—四边形—具有辉光背景的四边形—具有辉光背景的六边形的转变过程. 其空间波长与放电丝密度也随之改变. 在一定的放电条件下, 斑图涌现出辉光背景, 此时空间波长与放电丝密度保持不变, 但放电丝每半周期放电脉冲数由一次变为两次.

关键词: 介质阻挡放电, 四边形斑图, 六边形斑图, 空间波长

PACC: 5280P, 0547, 0565

## 1. 引 言

在空间扩展系统中, 由于微观量相互作用而导致自发形成的宏观有序结构称为斑图<sup>[1]</sup>, 它广泛存在于物理、化学、生物甚至经济等领域的很多系统中. 十几年来, 人们在流体对流系统、振荡沙盘系统、非线性光学系统、反应扩散系统以及介质阻挡放电系统中都获得了丰富的斑图模式<sup>[1-7]</sup>. 其中介质阻挡放电斑图因具有可视性、形成时间尺度适中(几分钟甚至几秒钟)等特点, 且有望应用在未来的信息处理<sup>[8]</sup>和材料的局域性生长<sup>[9]</sup>而备受关注.

介质阻挡放电又叫无声放电, 是一种典型的非平衡态交流气体放电过程. 它通常是由两个平行电极组成, 其中至少有一个电极上覆盖有电介质, 当两极间加上交流高压后, 两极间的气体击穿形成放电. 在大气压或更高气压条件下, 放电模式为流光模式, 即放电电流是由大量微放电通道(又叫放电丝)组成. 在适当条件下, 这些微放电通道自组织形成空间斑图, 如条纹斑图、六边形斑图及正方形斑图等<sup>[10-12]</sup>. 本工作利用特殊的水电极装置, 在氩气介质阻挡放电中, 观察到两种稳定的四边形和六边形斑图.

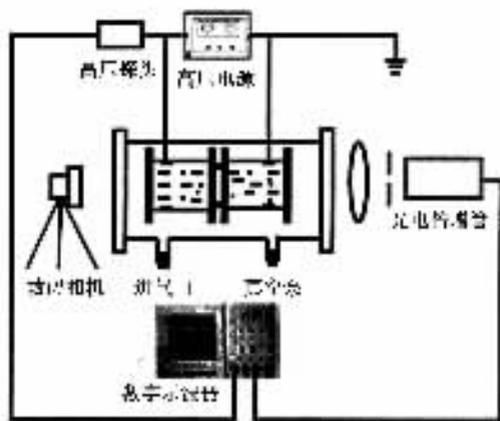


图 1 实验装置示意图

## 2. 实验装置

实验装置如图 1 所示, 放电电极是由两个装满水的内径为 75mm 的圆柱形有机玻璃管组成, 与高压交流电源两极相连的金属钛环浸入水中. 有机玻璃管的两端用厚度为 1mm 的玻璃片封住, 玻璃片兼作电介质. 放电间隙用厚度为 1.4mm, 内径为 68mm 的带有狭缝开口的玻璃圆环封住. 整个电极放入气室中. 气室两侧开有观察窗, 用数码相机(DiMAGE

\* 国家自然科学基金(批准号:30375015), 教育部科学研究重点项目(批准号:02020), 河北省科学技术委员会(批准号:01212180), 河北省自然科学基金(批准号:A2004000086)和河北省教育厅基金(批准号:B2001112)资助的课题.

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

Z2 记录放电丝的空间分布. 单个放电丝的光辐射用透镜、光阑和光电倍增管测量, 由数字示波器 (Tektronix TDS3052, 500MHz) 记录. 高压交流电源输出波形由高压探头监测. 电源为频率为 50kHz 的正弦交流电源. 放电气体为 99.99% 的氩气, 气压为一个大气压.

### 3. 实验结果与讨论

实验发现, 在升高驱动电压及电源功率过程中, 斑图经历了从六边形到四边形, 再到带有辉光背景的四边形, 最后到带有辉光背景的六边形的转变序列.

图 2 为改变放电条件时气体放电斑图的演变过程及其相应的傅里叶变换. 由于照片是从水电极轴向拍摄的, 所以图中的每一个亮点代表一个放电丝. 在电源功率较低时, 首先出现六边形斑图(图 2(a))  $U = 1.4\text{kV}$ ,  $I = 0.39\text{A}$ ). 随着电源功率的升高, 六边形开始失稳(图 2(b))  $U = 1.4\text{kV}$ ,  $I = 0.4\text{A}$ , 经六边形/四边形的混合态(图 2(c))  $U = 1.5\text{kV}$ ,  $I = 0.4\text{A}$  转变为稳定四边形点阵(图 2(d))  $U = 1.7\text{kV}$ ,  $I = 0.4\text{A}$ ). 继续升高电源功率, 四边形点阵先是保持不变, 只在背景上增加一层辉光, 使得背景明显变亮(图 2(e))  $U = 1.9\text{kV}$ ,  $I = 0.42\text{A}$ , 然后依次经历六边形/四边形的混合态(图 2(f))  $U = 1.9\text{kV}$ ,  $I = 0.44\text{A}$  和稳定的六边形点阵(图 2(g))  $U = 2.0\text{kV}$ ,  $I = 0.5\text{A}$ . 可以看出, 两种四边形背景不同但空间波长相同, 两种六边形背景和空间波长都不同.

关于四边形和六边形斑图之间的转变, 在其他系统如对流系统中已经观察到<sup>[13-15]</sup>, 但都是单一方向的转变, 即从四边形跃迁到六边形, 或是六边形转变为四边形, 并且转变过程经历五边形中间态. 本工作观察到的斑图转变与上述系统中的结果有如下不同: 斑图转变没有经历五边形中间态, 而是经历了一个六边形/四边形的中间混合态; 在控制参量升高过程中得到两种转变过程, 出现了六边形的回转现象. 因此, 本工作所观察到的斑图转变可能包含着更为复杂的动力学过程. 在化学反应扩散系统的实验及数值模拟中也曾发现这种六边形斑图的回转现象. 相关理论研究表明, 系统在远离图灵分岔点时, 其中的一些从动模会逐渐变为主动模而不能被绝热消除, 其中一种均匀态模, 记为  $(k=0)$ , 变为主动模时使振幅方程多了一个三阶项, 正是由于这个多

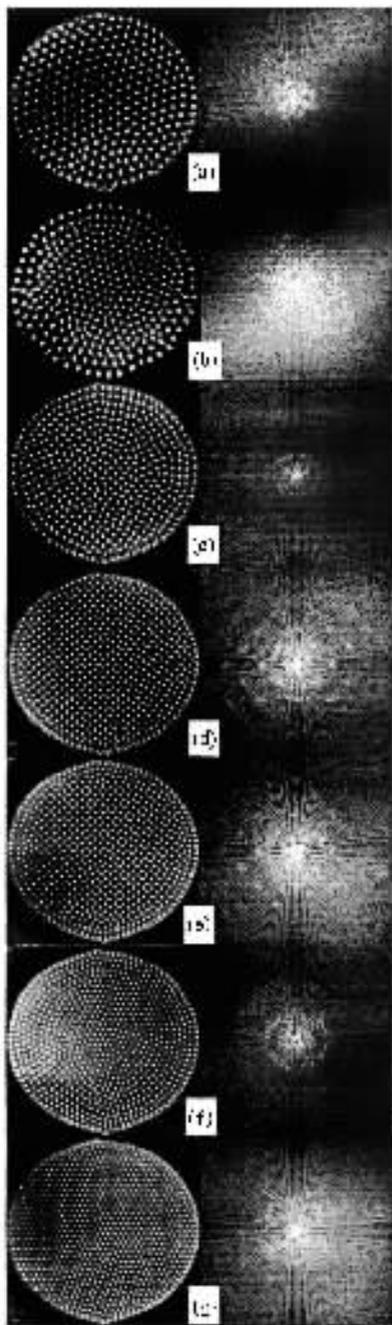


图 2 不同放电条件下大气压氩气介质阻挡放电中的斑图(左列)及相应的傅里叶变换(右列) (a)六边形斑图( $U = 1.4\text{kV}$ ,  $I = 0.39\text{A}$ ) (b)类六边形结构( $U = 1.4\text{kV}$ ,  $I = 0.40\text{A}$ ) (c)混合结构( $U = 1.5\text{kV}$ ,  $I = 0.40\text{A}$ ) (d)四边形斑图( $U = 1.7\text{kV}$ ,  $I = 0.40\text{A}$ ) (e)有辉光背景的四边形斑图( $U = 1.9\text{kV}$ ,  $I = 0.42\text{A}$ ); (f)有辉光背景的混合结构( $U = 1.9\text{kV}$ ,  $I = 0.44\text{A}$ ) (g)有辉光背景的六边形斑图( $U = 2.0\text{kV}$ ,  $I = 0.50\text{A}$ )

出来的三阶项, 使得六边形斑图重新稳定, 从而发生六边形的回转<sup>[16]</sup>.

在斑图的演化过程中, 其空间波长  $\lambda$  与放电丝密度  $\sigma$  随着驱动电压及电源功率的升高而改变. 为

此,我们利用空间相关函数  $\rho_r$  对图 2 进行了统计分析.空间相关函数  $\rho_r$  表示与一个丝距离为  $r$  处单位面积上放电丝的平均数目,其定义为<sup>[17]</sup>:对于一个给定的放电丝,计算出距此放电丝距离为  $r$  到  $r + \Delta r$  的圆环内的放电丝数目  $n_r$ ,则  $\frac{n_r}{2\pi r \Delta r}$  为与给定丝的距离为  $r$  处单位面积上找到丝的数目.为了减小统计误差,可以对  $N$  个点进行平均,即

$$\rho_r = \frac{\sum_N \frac{n_r}{2\pi r \Delta r}}{N},$$

分析表明,规则结构斑图的  $\rho_r$  为一系列孤立的峰,其第一个峰值即为斑图的空间波长  $\lambda$ .

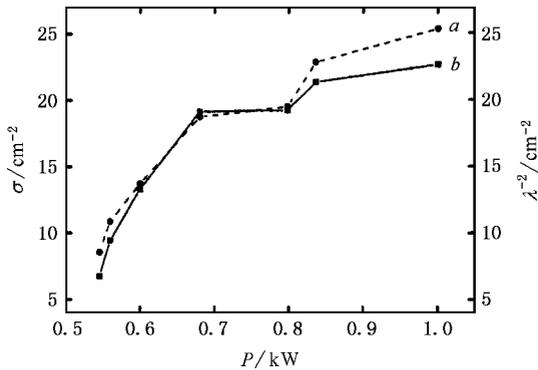


图 3 曲线  $a$  放电丝密度随电源功率的变化关系;曲线  $b$  斑图空间波长平方的倒数随电源功率的变化关系

为了便于比较,图 3 给出的是  $\frac{1}{\lambda^2}$  及  $\sigma$  随电源功率  $P$  变化曲线.显见,二者随电源功率的变化都是非线性的并且规律一致.在出现四边形的地方,两条曲线是重合的.总体上说,随着驱动电压及电源功率的升高,空间波长不断减小,放电丝密度不断增加.值得注意的是,在两种四边形转变处,两曲线均出现了平台,即当电源输出功率从 0.68kW 增加到 0.798kW(电压从 1.7kV 增加到 1.9kV)时,斑图的空间波长与放电丝密度保持基本不变.在对流系统中,曾观察到四边形斑图向六边形斑图转变时,空间波长( $\lambda$ )随流体层深度的变化关系发生突变(jump)的情况<sup>[15]</sup>.与其不同的是,本实验中平台出现在两种四边形的转变处,同时放电区内出现了辉光背景.

实验对产生辉光背景前后单个放电丝发光信号波形进行测量,结果如图 4 所示.发现产生辉光背景前,单个放电丝在每半周期放电一次,产生辉光背景后,变为每半周期放电两次,一次发生在电压的零值

附近,一次发生在电压的峰值附近.

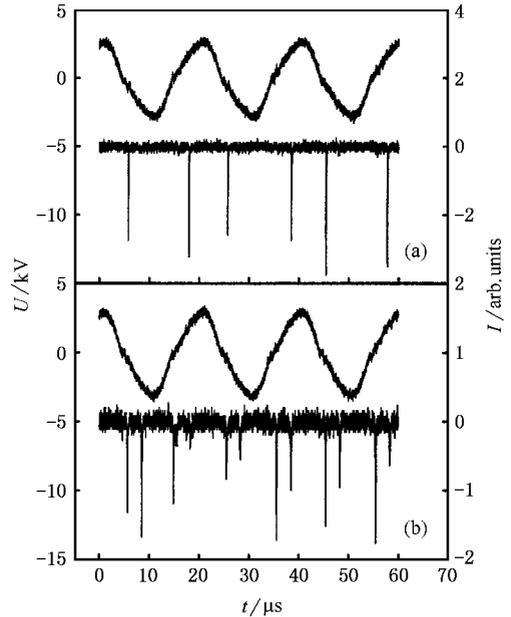


图 4 辉光背景出现前(a)与辉光背景出现后(b)斑图中电压波形和单个放电丝的发光波形

在介质阻挡放电中,电压升高,放电电流应随之增大,人们通常认为,系统可能通过三种方式来实现:放电丝个数增加、单个放电丝的脉冲数增加以及单个放电丝的电流增大.这几种方式有可能是相互竞争的.

本实验中,电压较低时,系统首先通过增加放电丝个数来增大电流.此时单个放电丝在每半周期的脉冲保持为一个,但相邻两次放电的时间间隔呈现长短交替,其原因是介质阻挡放电中壁电荷对放电的双重作用,即对本次放电起熄灭作用,但对下次放电起帮助作用<sup>[18]</sup>.随着电压的升高,相邻两次放电的时间间隔长短差别加剧.某半周期的放电越靠近电压的峰值,熄灭本次放电需要的壁电荷就越多,使得下次放电时刻更加提前.当壁电荷足够多时,放电可提前到电压零点附近.此次放电结束时,壁电荷并未完全耗尽.当外加电场与壁电荷产生的电场之和达到击穿阈值时,就会再一次产生放电.于是,一个放电丝在半周期内便产生了两次放电.这样,系统就通过增加每半周期放电丝的脉冲数的方式来增加放电.当单个放电丝脉冲数增加以后,从一定程度上满足了放电电流应随电压升高而增大的要求,从而缓解了放电丝个数的增加,使之暂时趋于平缓.这样,在放电丝密度曲线上就出现了平台.此后,继续升高电压,系统又将依靠增加放电丝个数来加强放电.可

以想象,如果系统和斑图足够稳定,当电压一直升高时,可能会出现放电丝每半周三次脉冲然后再次增加放电丝个数的现象,并以此循环下去。

另外,实验发现,系统通过增加单个放电丝的电流来促进放电并不明显,这可能是由于气体放电过程中放电通道受到某种限制,从而抑制了通道中电流的增大。

关于辉光背景的出现,也可能与壁电荷有关。我们从侧面对单个放电丝进行研究,发现其形状为 H 形<sup>[19]</sup>。Merbahi 等人用高速照相机研究了单个放电丝在半周期内的时空演化,发现其为漏斗形<sup>[20]</sup>。考虑到我们的结果包含时间积分效应,二者结果一致。放电丝之所以呈现 H 形,原因可能是壁电荷的排斥作用使之横向扩展。随着电压的增加,壁电荷增多,其

横向扩展也要增大。当电压达到一定值,放电产生的壁电荷足够多,使得相邻放电丝产生的壁电荷的横向扩展会交叠在一起,于是涌现出辉光背景。

## 4. 结 论

本工作采用双水电极装置,在大气压氩气介质阻挡放电中,观测到斑图分岔序列经历六边形—四边形—具有辉光背景的四边形—具有辉光背景的六边形的过程。研究发现随电压的升高,系统先后通过放电丝个数增加及单个放电丝每半周期脉冲数增加来增大电流。斑图演化过程中出现辉光背景、放电丝密度曲线呈现平台和单个放电丝脉冲数增加三者可能均来自壁电荷的影响。

- [ 1 ] Breazeal W, Flynn K M, Gwinn E G, 1995 *Phys. Rev. E* **52** 1503
- [ 2 ] Bajaj K, Liu J, Naberhuis B, Ahlers G 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 806
- [ 3 ] Umbanhowar P 1997 *Nature* **389** 541
- [ 4 ] D'Alessandro G, Firth W J 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2597
- [ 5 ] Ouyang Q, Swinney H L 1991 *Nature* **352** 610
- [ 6 ] Ammelt E, Astrov Yu A, Purwins H G 1997 *Phys. Rev. E* **55** 6731
- [ 7 ] Dong L F, Li X C, Yin Z Q, Wang L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2296 (in Chinese) [ 董丽芳、李雪辰、尹增谦、王 龙 2002 物理学报 **51** 2296 ]
- [ 8 ] Ammelt E, Astrov Yu A, Purwins H G 1998 *Phys. Rev. E* **58** 7109
- [ 9 ] Jiang N, Qian S F, Wang L, Zhang X H 2001 *Thin Solid Film* **390** 119
- [ 10 ] Klein M, Miller N, Walhout M 2001 *Phys. Rev. E* **64** 026402
- [ 11 ] Dong L F, Li X C, Yin Z Q, Qian S F 2001 *Chinese Physics Letters* **18** 1380
- [ 12 ] Yin Z Q, Dong L F, Chai Z F, Li X C, Wang L 2002 *Chinese*

*Physics Letters* **19** 1476

- [ 13 ] Nitschke K, Thess A 1995 *Phys. Rev. E* **52** 5772
- [ 14 ] Schatz M F, VanHook S J, McCormick W D, Swift J B, Swinney H L 1999 *Physics of Fluids* **11** 2577
- [ 15 ] Mancini H, Maza D 2004 *Europhys Letters* **66** 812
- [ 16 ] Ouyang Q 2000 *Pattern Formation in Reaction-Diffusion Systems* ( Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House ) 49 ( 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 49 页 ]
- [ 17 ] Strümpel C, Purwins H G, Astrov Yu A 2001 *Phys. Rev. E* **63** 026409
- [ 18 ] 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 ]
- [ 19 ] Dong L F, Ran J X, Mao Z G 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 161501
- [ 20 ] Merbahi N, Sewraj N, Marchal F, Salamero Y, Millet P 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 1664

# Square and hexagon pattern formation in dielectric barrier discharge in argon at atmospheric pressure<sup>\*</sup>

Dong Li-Fang<sup>†</sup> Li Shu-Feng Liu Feng Liu Fu-Cheng Liu Shu-Hua Fan Wei-Li

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

( Received 6 February 2005 ; revised manuscript received 27 April 2005 )

## Abstract

Pattern formations in dielectric barrier discharge in argon at atmospheric pressure under different discharge conditions are investigated. Patterns undergo the transition series of hexagonal-square-square with glow background-hexagonal with glow background as the applied voltage is increased, and the spatial wavelength and the filament density change also. When the glow background appears under a certain discharge condition, the spatial wavelength and the filaments density remain constant and the number of discharge pulses of each filament in half cycle changes from one to two.

**Keywords** : dielectric barrier discharge, square pattern, hexagon pattern, spatial wavelength

**PACC** : 5280P, 0547, 0565

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10375015 ), the Key Project of Chinese Ministry of Education ( Grant No. 02020 ), Committee of Science and Technology, Hebei Province, China ( Grant No. 01212180 ), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China ( Grant No. A2004000086 ) and the Bureau of Education, Hebei Province, China ( Grant No. B2001112 )

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