

介质阻挡放电中两种不同时空对称性的 六边形发光斑图*

董丽芳 刘书华 王红芳 范伟丽 高瑞玲 郝雅娟

(河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

(2006 年 9 月 4 日收到, 2006 年 9 月 29 日收到修改稿)

采用水电极介质阻挡放电装置, 在大气压氩气放电中, 在低电压区和高电压区, 观察到两种具有不同时空特性的六边形点阵发光斑图. 低压区的六边形斑图空间波长及单元直径均小于高压区的六边形斑图的相应量, 高压区的六边形斑图具有较亮的背景, 而低压区的六边形则没有. 通过对两种六边形发光斑图进行时空动力学测量, 发现低压区六边形是由两套长方形子点阵嵌套而成的, 且这两套子点阵的出现顺序交替变化, 而高压区六边形点阵斑图的所有单元基本是同步的. 最后讨论了壁电荷对斑图的时空动力学行为的影响.

关键词: 介质阻挡放电, 六边形斑图, 时间相关性

PACC: 5280P, 0547, 0565

1. 引言

斑图是在空间或时间上具有某种规律性的非均匀宏观结构, 是一种典型的非线性自组织现象. 六边形斑图作为最常见的斑图, 在许多非平衡态系统中已经观察到, 如对流系统^[1]、振荡微粒系统^[2]、非线性光学系统^[3-5]、反应扩散系统^[6]等. 这些系统中观察到的六边形斑图大致分为两种, 一种是不随时间变化的稳定六边形斑图; 另一种是随时间作周期性振荡的时空六边形斑图. 例如, 非线性光学系统^[4,5]、反应扩散系统^[6]中的六边形眨眼(twinkling pattern)斑图, 它是由三套不同的六边形子结构嵌套而成, 这三套子结构按一定的先后顺序出现. Yang 等利用布鲁塞尔子反应扩散模型, 在 Turing 模和 Hopf 模相互作用时, 也得到了类似的振荡六边形斑图^[7].

在最近十几年来, 人们在气体放电中也观察到六边形斑图^[8-14]. 美国的 Breazeal 小组采用两个平行的导电玻璃电极, 以 He 气加入少量水蒸气为放电气体, 观察到了六边形斑图^[9], 并研究了水蒸气含量对斑图的影响. 德国的 Purwins 小组采用半导体电

极, 得到由均匀态演化而来的六边形斑图^[10]和整体旋转的六边形斑图^[11]; Radu 等人在大气压条件下, 观察到六边形斑图和多种其他类型斑图^[12], 并同时探测光信号和电流电压信号, 对放电特性进行诊断. 本研究小组采用水电极介质阻挡放电装置, 在大气压氩气和空气放电中, 观察到了运动的六边形斑图^[13]和由均匀态^[15]演变而来的静态六边形斑图^[14]. 尽管人们在不同气体及不同放电条件的放电中观察到了六边形斑图, 但从我们所查阅的文献来看, 尚未见到对六边形斑图时空结构进行仔细研究的报道.

本工作采用水电极介质阻挡放电装置, 其他参数保持不变, 在升高电压的过程中, 先后在较低电压区和较高电压区, 观察到两种六边形发光斑图, 它们分别由随机放电丝和螺旋波斑图演化而来. 时空动力学测量结果表明, 前者由两套交替放电的长方形子点阵嵌套而成, 而后者是单一结构的六边形.

2. 实验装置

实验装置在文献 [16] 中已有详细描述, 现简介如下: 两个圆柱形容器装满水, 两端用厚度为 1.5 mm

* 国家自然科学基金(批准号: 10575027, 10375015), 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20050075001)和河北省自然科学基金(批准号: A2006000950, A2004000086)资助的课题.

的光学玻璃片封住,金属环浸入水中并分别与电源两极相连.电源的电压范围为0—10 kV可调,频率范围为26—80 kHz.放电气体为氩气,压力保持为一个大气压.用高压探头(Tektronix P6015A 1000X)测量电压,数码相机(DiMAGE Z2)拍摄发光斑图.通过两个简单的成像光学系统同时测量不同放电丝的发光信号,由光电倍增管PMT(RCA 7625)采集并由示波器(Tektronix TDS3054B)记录.

3. 结果与讨论

图1给出了随着外加电压的升高,两种六边形的形成过程.可见,在低压区(3.5 kV附近)的六边形斑图由随机放电丝演变而来;而高压区(7.1 kV附近)六边形斑图由螺旋波演变而来.比较两种六边形斑图,发现前者(图1(b))的空间波长及放电丝直径均小于后者(图1(f))的相应量;前者不具有明显的背景,而后者背景较亮.高压区六边形斑图几乎稳定不动,远比低压区六边形斑图稳定性好.为了进一步比较两者的不同,图2分别给出了它们的傅里叶变换及总光信号.由傅里叶谱看出,两种斑图均具有规整的六边形结构,但低压区六边形斑图的空间特征波长明显小于高压区六边形斑图;从光信号来看,在每一个电压半周期内,低压区六边形斑图的总发光信号有两个脉冲,而高压区六边形斑图的总发光信号放电脉冲包络呈准连续状,并且第一个脉冲幅度最大(我们称之为主脉冲).由此可见,两种斑图的时间行为明显不同.

为了搞清两种六边形的时空结构,我们分别对两种六边形斑图中放电丝之间的相关性进行了测量.首先,对于低压区六边形斑图,按照图1(b)标出的 L_1 和 L_2 方向,测量放电丝的发光信号,并与同时测量的总光信号相比,以确定它们与总光信号的时间相关性.图3给出了测量结果.显见,平行于 L_2 (参见图1(b))的方向上,任意一列上的发光信号只有一个脉冲,并与总光信号的两个脉冲交替对应(如图3(a));相邻两列放电丝的光脉冲放电时刻先后交替(如图3(b)),这说明平行于 L_2 方向上,同一列的所有放电丝是同步放电的,相邻列放电丝的光脉冲放电时刻先后交替,并与总光信号的两个脉冲交替对应;在平行于 L_1 (参见图1(b))方向上,任意一列放电丝有两个脉冲,且分别与总光的两个脉冲击穿时刻相对应(图3(c)).由上述结果可推知:低

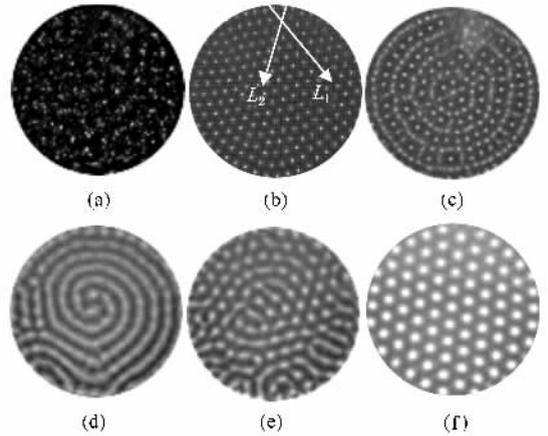


图1 随着电压的升高,两种六边形斑图的形成过程:(a) $U = 3.2$ kV,随机放电丝分布;(b) $U = 3.5$ kV,六边形斑图;(c) $U = 3.6$ kV,同心圆斑图;(d) $U = 5.6$ kV,螺旋波斑图;(e) $U = 6.4$ kV,局部形成六边形;(f) $U = 7.1$ kV,六边形斑图;放电区域直径 $D = 54$ mm,气隙间距 $d = 2$ mm,驱动频率 $f = 37$ kHz;图(b)中箭头 L_1 和 L_2 标示了六边形两个不同的列方向,将在后面图3—5及相关内容中用到

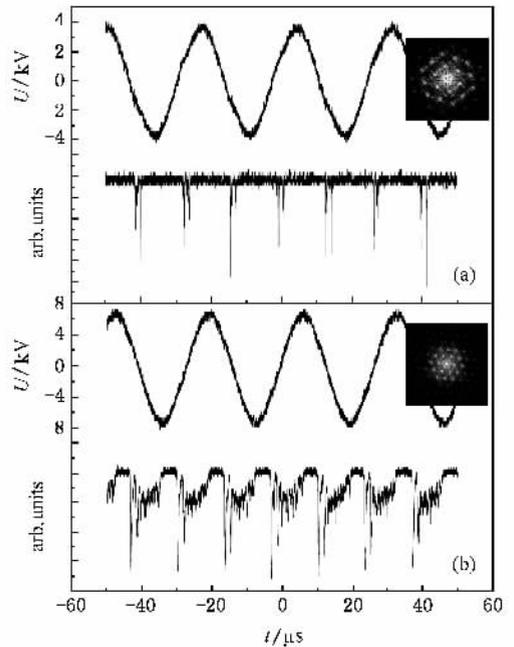


图2 两种六边形斑图的总光信号及傅里叶变换谱:(a)低压区六边形;(b)高压区六边形;在(a)(b)中,上部曲线为电压波形,下部为总光信号,右上角为傅里叶变换

压区六边形斑图是由两套排列成长方形点阵的放电丝嵌套而成,且它们出现的顺序交替变化,具有时间反演特点,我们称之为动态六边形斑图.图4给出了其结构示意图.该动态六边形的时间对称性与六边形眨眼斑图^[4-7]不同,前者两套子结构交替出现,而

后者三套子结构出现的先后顺序总是不变的。

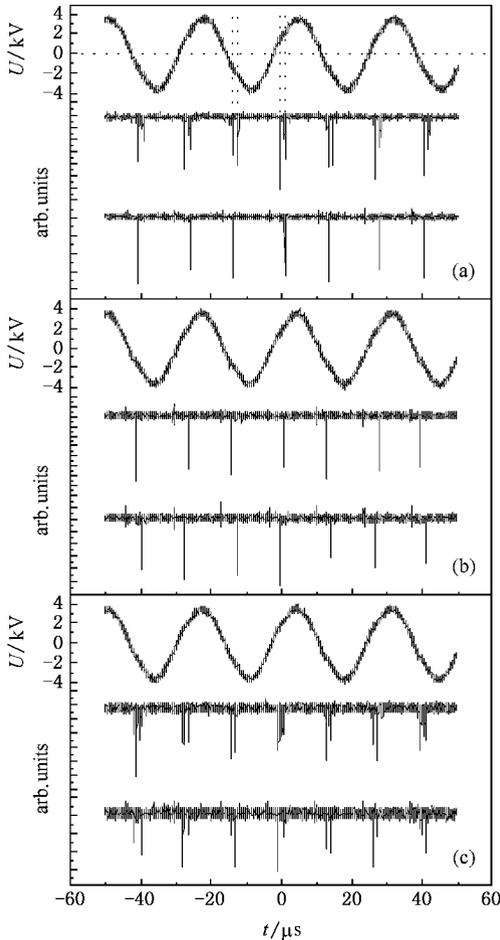


图 3 低压区六边形斑图的时空相关测量结果 (a)上部曲线为外加电压波形,中部为六边形斑图总光信号,下部为平行于 L_2 方向任一列放电丝的光信号 (b)上部曲线为外加电压波形,中部和下部为平行于 L_2 方向上任两相邻列放电丝的光信号; (c)上部曲线为外加电压波形,中部为六边形斑图总光信号,下部为平行于 L_1 方向任一列放电丝的光信号

图 5 是高压区六边形斑图的时空分辨测量结果,在每一个电压半周期,总发光信号放电脉冲呈准连续状,任意两个放电单丝的主脉冲击穿时刻均相同,并且与总光的主脉冲击穿时刻相对应.该结果表明,高压区六边形斑图的所有放电丝的放电几乎同步.由于此六边形斑图比较稳定,我们称之为静态六边形.

比较两种六边形斑图放电丝的发光信号,发现放电丝放电的击穿时刻也存在明显差异.动态六边形放电丝放电只有一个脉冲,且击穿时刻在电压波形的上升沿(图 3(a)中虚线所示);而静态六边形放电丝,在电压波形的上升沿和下降沿均有放电脉

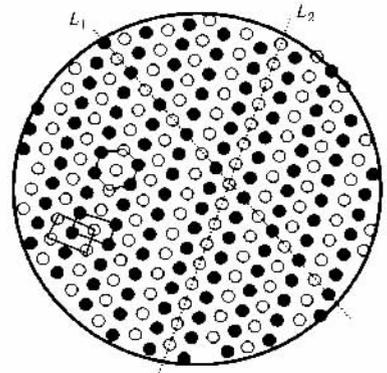


图 4 动态六边形嵌套结构示意图,其中两种不同符号分别表示两套不同时刻放电的长方形子点阵

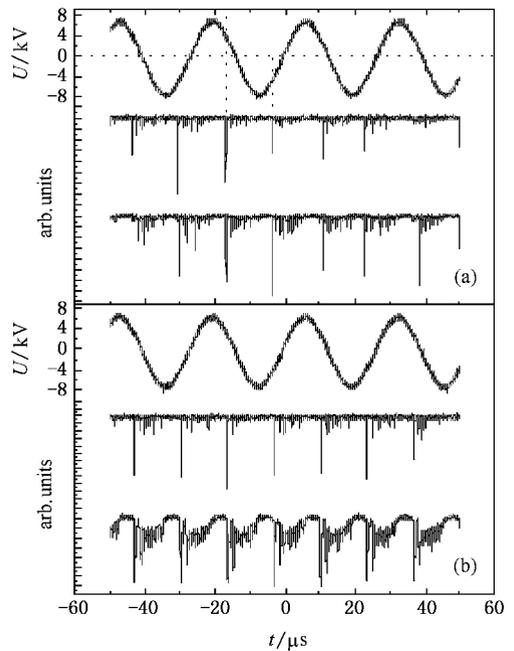


图 5 静态六边形斑图的时空分辨测量结果 (a)上部曲线为外加电压波形,中部和下部分别为六边形斑图中任两个放电丝的光信号 (b)上部曲线为外加电压波形,中部为六边形斑图中任一放电丝的光信号,下部为总光信号

冲,并且强脉冲均出现在下降沿(图 5(a)中虚线所示).

介质阻挡放电中的壁电荷对放电特性有着重要影响,因而本工作中两种六边形的形成及其特性也应与之有关.

在介质阻挡放电中,当外加电压超过击穿阈值时,气体被击穿放电,产生大量的正负带电粒子.在电场的作用下,正负带电粒子分别向两极运动^[17,18].由于介质层的存在,电荷将沉积在介质表面,形成壁

电荷^[19,20],并由此产生一个内建电场 E_Q ,其方向与外加电场 E_0 相反.随着放电的进行, E_Q 逐渐增大,导致净电场 $E_0 - E_Q$ 不断减弱,当其小于放电所需的维持电场时,放电将熄灭.可见,此时壁电荷的作用是熄灭放电.但是当下半周期来临时,外加电场改变了方向,此前积累的壁电荷产生的内建电场将与外加电场方向相同,因而其作用是帮助放电,使气体可在较小的外加电压下击穿放电.显见,上半周积累的壁电荷越多,放电所需的外加电压越小,放电的时刻越提前.当壁电荷足够多时,只要 $E_Q - E_0$ 达到击穿阈值,在电压的下降沿即可产生放电^[21].可见,在电压下降沿击穿放电是由壁电荷引起的,放电时气体内电场的方向应与壁电荷产生的内建电场同向,而与外加电场方向相反,此时放电电流脉冲应该与外加电压反向,即正电压时应出现负电流脉冲,负电压时应出现正电流脉冲.为了验证上述推论,我们测量了高压区六边形斑图的电流信号(如图6所示),可以看出,高压区六边形斑图的电流信号的主脉冲均出现在下降沿,并且正电压时对应着负电流脉冲,负电压时对应着正电流脉冲.因此,上述推论与实验

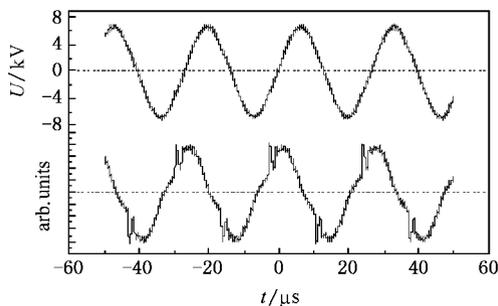


图6 高压区六边形斑图的电信号 上部曲线为电压波形,下部为电流信号

结果相符合.

根据实验结果,并结合以上分析,关于动态六边形的形成,可作如下解释:在外加电压某半周的上升沿,当有一些放电丝首先发生放电时,积累于介质表面的壁电荷,减小了所在位置处的净电场强度,使得其后的微放电只能发生在已有放电丝的中间,从而形成了嵌套结构的放电丝点阵.当外加电压的下半周期来临时,击穿应先发生在壁电荷密度大的位置.由于在上半周期中,后放电的子点阵对应的外加电压高,因而积累的壁电荷多,故此子点阵将先放电,而上半周先放电的子点阵此时将后放电.于是两套子点阵的放电顺序将出现交替现象.

关于静态六边形斑图的形成及特性,也与壁电荷有关.由于此时电压高,因而上升沿放电产生的壁电荷足够多,以至于引起在下降沿的放电.在下降沿一次放电结束后,尽管壁电荷已被消耗掉一部分,但是由于外加电压的继续下降,使得气体中的净电场仍然可达到击穿阈值,于是可引起再次或多次击穿.当外加电压下降至零并反向增大时,只要净电场达到击穿阈值,便可继续引起放电.这就是静态六边形斑图对应多个脉冲的原因.

4. 结 论

在大气压氩气放电中,通过改变外加电压,获得了两种六边形斑图.通过对两种六边形发光斑图进行时空动力学测量,发现低压区六边形斑图是由两套长方形子点阵嵌套而成的,且这两套子点阵的出现顺序交替变化;而高压区六边形点阵斑图的所有放电丝基本是同步放电的.经讨论发现,两种六边形斑图的形成及其特性与壁电荷有关.

- [1] Assenheimer M, Steinberg V 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 756
- [2] Blair D, Aranson I S, Crabtree G W, Vinokur V, Tsimring L S, Josser C 2000 *Phys. Rev. E* **61** 5600
- [3] Odoulov S G, Goukov M Y, Shinkarenko O A 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 3637
- [4] Logvin Y A, Ackemann T, Lange W 1997 *Europhys. Lett.* **38** 583
- [5] Logvin Y A, Ackemann T 1998 *Phys. Rev. E* **58** 1654
- [6] Yang L, Epstein I R 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 178303
- [7] Yang L, Zhabotinsky A M, Epstein I R 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 198303
- [8] Kogelschatz U 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1400
- [9] Breazeal W, Flynn K M, Gwinn E G 1995 *Phys. Rev. E* **52** 1503
- [10] Ammelt E, Astrov Y A, Purwins H G 1998 *Phys. Rev. E* **58** 7109
- [11] Zanin A L, Gurevich E L, Moskalenko A S, Bodeker H U, Purwins H G 2004 *Phys. Rev. E* **70** 036202
- [12] Radu I, Bartnikas R, Czeremuszkin G, Wertheimer M R 2003 *IEEE Trans. Plasma Science* **31** 411
- [13] Dong L F, He Y F, Yin Z Q, Chai Z F 2004 *Plasma Sources Sci. Technol.* **13** 164
- [14] Dong L F, He Y F, Yin Z Q, Chai Z F 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1524
- [15] Li X C, Dong L F, Wang L 2005 *Chin. Phys.* **14** 1418

- [16] Dong L F , Fan W L , He Y F , Liu F C , Li S F , Gao R L , Wang L 2006 *Phys. Rev. E* **73** 066206
- [17] Wang Y H , Wang D Z 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1694 (in Chinese)
[王艳辉、王德真 2003 物理学报 **52** 1694]
- [18] Zhang Y T , Wang D Z , Wang Y H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4808 (in Chinese) [张远涛、王德真、王艳辉 2005 物理学报 **54** 4808]
- [19] 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]
- [20] Dong L F , Mao Z G , Ran J X 2005 *Chin. Phys.* **14** 1618
- [21] Wang Y H , Wang D Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1295 (in Chinese)
[王艳辉、王德真 2005 物理学报 **54** 1295]

Two kinds of hexagon emission patterns with different spatio-temporal symmetry in dielectric barrier discharge^{*}

Dong Li-Fang Liu Shu-Hua Wang Hong-Fang Fan Wei-Li Gao Rui-Ling Hao Ya-Juan

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

(Received 4 September 2006 ; revised manuscript received 29 September 2006)

Abstract

Two kinds of emission hexagonal patterns with different spatio-temporal symmetry are observed in lower and higher applied voltage range respectively by using a dielectric barrier discharge device with water electrodes. The spatial wavelength and filament diameter of the hexagon in higher applied voltage range are larger than that in lower voltage range. The hexagon in higher applied voltage range has a brighter background , while no background exists in the hexagon in lower applied voltage range. The spatio-temporal dynamics of the two kinds of hexagon patterns is investigated. It is found that the hexagonal pattern in lower voltage range is an interlacing of two rectangular sublattices , which have a time sequence inversion behavior. The filaments in the hexagon in higher voltage range discharge simultaneously. The influence of the wall charges on the spatio-temporal dynamics of the emission patterns is discussed.

Keywords : dielectric barrier discharge , hexagon pattern , temporal correlation

PACC : 5280P , 0547 , 0565

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 10575027 , 10375015) , the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20050075001) and the Natural Science Foundation of Hebei Province , China (Grant Nos. A2006000950 , A2004000086) .