

# Air/Ar 介质阻挡放电中正方形斑图的特性研究<sup>\*</sup>

范伟丽 董丽芳<sup>†</sup> 李雪辰 尹增谦 贺亚峰 刘书华

(河北大学物理科学与技术学院,保定 071002)

(2006 年 7 月 10 日收到,2006 年 8 月 16 日收到修改稿)

在大气压 Air/Ar 介质阻挡放电中,研究了正方形斑图的特性随空气相对含量  $\chi$  的变化规律,得到了正方形斑图的空间波长和运动速度随空气相对含量的变化关系曲线.实验发现,不同的放电间隙间距下,正方形斑图的空间波长均随空气相对含量的增大而减小,正方形斑图的运动速度也与空气相对含量的大小密切相关,当空气相对含量约为 10% 时,正方形斑图的运动速度达到最大值 14 mm/s.

关键词:介质阻挡放电,正方形斑图,空气相对含量

PACC:5280P,0547,0565

## 1. 引 言

正方形斑图作为一种简单的斑图类型,广泛存在于许多非平衡态系统中,例如瑞利贝纳对流系统<sup>[1-4]</sup>、法拉第系统<sup>[5,6]</sup>、非线性光学系统<sup>[7]</sup>、以及介质阻挡放电系统<sup>[8,9]</sup>等.在瑞利-贝纳尔对流系统中,Gal 等人利用导热系数较差的玻璃作为边界,获得了稳定的正方形斑图,并发现该正方形斑图是由两套方向垂直、波数相等、振幅相近的条纹斑图相互叠加而成,当改变瑞利数时,正方形斑图将经历 Hopf 分岔最终演化成为条纹斑图<sup>[1]</sup>.在沿垂直轴旋转的瑞利贝纳尔对流系统中,Bajaj 等人分别以水和氩气作为对流物质,在特定的参数范围内获得了稳定的正方形斑图<sup>[3]</sup>.在单频驱动的法拉第系统中,Kudrolli 等以流体作为媒质观察到了正方形斑图,并发现该正方形的产生与流体的黏质系数和驱动频率有关<sup>[5]</sup>.Swinney 等人以固体颗粒为媒质,在频率和幅度空间内获得了两种不同周期性的正方形斑图<sup>[6]</sup>.最近,本工作小组在介质阻挡放电中观察到了正方形斑图,并对其进行了时空动力学测量,发现该正方形斑图是由两套等价的正方形子结构相互嵌套而成,并具有次谐振荡的时间行为<sup>[8-10]</sup>.

除了对正方形斑图的实验研究以外,在理论上

人们也做了大量的工作.Sakaguchi 等人利用复数系数的五阶 Swift-Hohenberg(SH)方程,模拟出了稳定的正方形局域态,该结果与法拉第振荡颗粒系统的实验结果相类似<sup>[11]</sup>.Buceta 等同样利用 SH 模型,当使两种不同的动力学机理快速的交替变化时,得到了空间上稳定、时间上振荡的正方形斑图<sup>[12]</sup>.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,也得到了类似的模拟结果<sup>[13]</sup>.但是对于介质阻挡放电系统,由于其微放电过程的复杂性,至今还尚未建立一个理论模型来解释正方形斑图的选择机理.要想建立该理论模型,需要大量的实验数据作为基础.为此,本工作对正方形斑图随放电参数变化的各种特性进行了系统的研究,得到了正方形斑图的空间波长和运动速度随空气相对含量的变化关系曲线.

## 2. 实验装置

在文献[14—16]中对实验装置做了详细的报道,因此这里只给出了简要的说明.实验中所使用的放电电极是由两个装满水的内径为 46.7 mm 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 1.5 mm 的玻璃片封住,玻璃片兼作电介质.整个电

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:10375015 和 10575027),教育部高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20050075001),河北省自然科学基金(批准号:A2004000086,2006000950)资助的课题.

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

极放入用有机玻璃做成的反应气室中,气室两侧开有观察窗,用数码相机(Canon Powershot G1)拍照.电源使用高压高频交流电源,电压峰值调节范围为0—30 kV,频率调节范围为10—40 kHz.放电气体为不同比例的空气和氩气的混合气体,气压保持为 $10^5$  Pa.

### 3. 实验结果与讨论

图1为 Air/Ar 介质阻挡放电中,不同空气相对含量 $\chi$ 下获得的正方形斑图.图2为改变气隙间距 $d$ 值后,得到的正方形斑图空间波长随空气相对含量 $\chi$ 的变化关系.当空气相对含量固定时,正方形可在一定电压范围内存在,当电压增加时,正方形的波长减小,图2中阴影区域的高度即表示固定空气相对含量改变外加电压时正方形斑图的波长范围.显见,在不同的放电气隙间距下,正方形斑图的空间波长均随空气相对含量 $\chi$ 的增大而减小,当空气相对含量 $\chi$ 小于1%时,正方形空间波长随 $\chi$ 的增大迅速减小,继续增大 $\chi$ 时,其空间波长的变化趋势将趋于平缓.综上所述,空气相对含量的大小是决定正方形空间波长的一个重要参数.这与介质阻挡放电的微放电过程有关,当空气相对含量发生变化时,它将影响放电过程、带电粒子的种类和分布以及微观粒子间的非线性相互作用,进而影响斑图的波长.

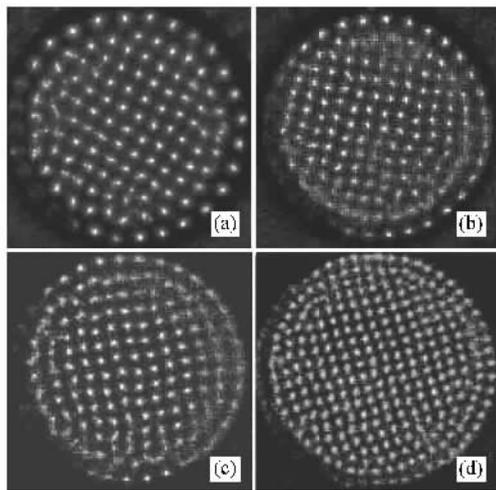


图1 不同空气相对含量条件下的正方形斑图,空气相对含量分别为(a)0.2% (b)0.5% (c)1.0% (d)10%(其他实验参数为 $d = 1.7$  mm,  $f = 26$  kHz)

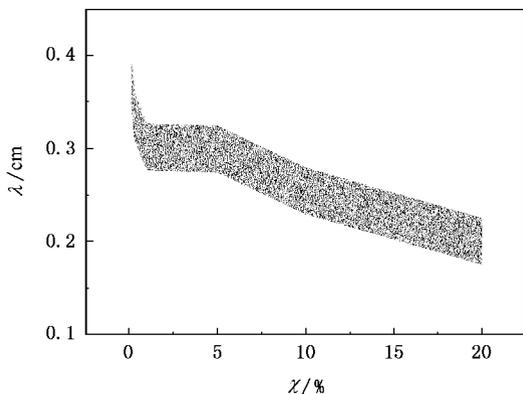


图2 正方形斑图的空间波长随空气相对含量的变化关系(阴影区域高度表示固定空气相对含量时,当外加电压改变时正方形斑图的波长范围.其他实验参数为 $d = 1.0$  mm,  $f = 26$  kHz)

动,运动方向为任意选取的放电丝的线列方向.保持外加电压不变,正方形斑图在做定向运动一段时间后,会突然发生刚性转动,然后继续沿着新的线列方向运动.由于所用的实验装置是空间对称的,所以,正方形斑图的运动应该反映系统本身的动力学性质,有必要对其进行进一步的研究.

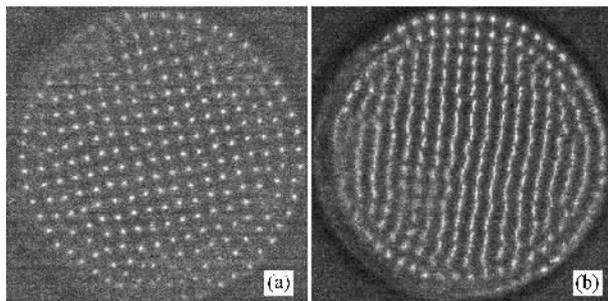


图3 不同曝光时间所获得的正方形斑图照片 (a)为发生刚性转动前的照片,曝光时间为5 ms (b)发生刚性转动后的照片,曝光时间为78 ms(其他实验参数为 $U = 4.8$  kV,  $d = 1.0$  mm,  $f = 26$  kHz,  $\chi = 10\%$ )

为了测量斑图的运动速度,将相机的曝光时间增大,照片上记录下了放电丝的运动轨迹如图3.显然,由照片中放电丝的轨迹长度除以曝光时间就可粗略获得运动斑图的运动速度.图4给出了正方形斑图的运动速度随空气相对含量的变化关系曲线.显见,当空气相对含量较小时,正方形斑图的运动速度很小,且不随空气相对含量的变化而改变,斑图几乎是稳定的;当空气相对含量大于0.5%时,其运动速度将随空气相对含量的增大明显增大,在空气相对含量约为10%时,运动速度达到最大值14 mm/s.

运动的斑图是一种常见的斑图形式,存在于许

实验中还发现,正方形斑图一般是在做定向运

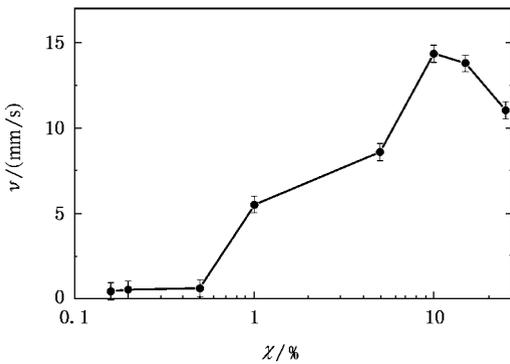


图4 正方形斑图运动速度  $v$  随空气相对含量  $\chi$  的变化关系(其他实验参数为  $d = 1.7 \text{ mm}$ ,  $f = 26 \text{ kHz}$ )

多非平衡态系统中,但其形成机理不尽相同<sup>[17-19]</sup>。德国的 Purwins 小组在直流气体放电中得到了运动的条纹斑图,其运动速度为 mm/s 的量级,并在某些强微扰的作用下可以发生瞬时的刚性转动,但与我们的实验结果不同的是,经历一定的时间后,该条纹斑图将返回到原来的方向不变。他们把斑图不同的选择方向归结为不同吸引子作用的结果,这些吸引子的相互竞争过程即为斑图方向选择的过程,而最终的选择方向决定于作用力最强的吸引子<sup>[17]</sup>。此外,他们认为还存在两个可能的因素造成斑图的运动:一是由于系统的不均匀性<sup>[17]</sup>,在他们的系统中,放电区域的中心和边缘有着不同的电流密度以及热效应,因此在中心和边缘之间存在一个径向的梯度而导致斑图的运动;二是由于外加电压的作用<sup>[20]</sup>,在放电的开始阶段,外加电压的增加将导致放电丝数目的增加,但当放电丝的数目足够大而达到饱和时,再增加电压将使放电丝的运动速度增加,外加能量的馈入转化成为了放电丝的动能。但在我们的系统中,所使用的电极是各向均匀的,并保持外加电压

不变就可以实现不同正方形方向的转化,故而正方形的运动应属于系统本身的动力学性质,上述两种原因均不适用。

介质阻挡放电中,运动的正方形斑图的产生可能是 Turing 不稳定性和 Hopf 不稳定性或波不稳定共同作用的结果。理论上,在二变量系统中,图灵不稳定性导致的正方形斑图不能稳定存在(正方形斑图不能形成或形成后很快被其他斑图形式所代替),而 Hopf 或波不稳定性作用下才能产生运动的斑图类型,由此我们推测运动正方形的产生可能根源于这两种不稳定性共同作用。当空气相对含量发生变化时,这两种不稳定性相互作用的强度随之发生变化,进而影响到斑图的运动速度和方向。这与 Logvin 小组在非线性光学系统中观察到的运动菱形斑图相类似,其运动速度为  $v = 2\Omega / |k_1 - k_2|$ ,该斑图是 Hopf 模和 Turing 模相互作用的结果<sup>[21,22]</sup>。考虑到放电中还可能存在其他非线性因素的影响,正方形斑图的运动成因还有待于进一步的研究。

## 4. 结 论

采用介质阻挡放电装置,在大气压 Air/Ar 放电中研究了正方形斑图的特性随空气相对含量的变化规律,得到了正方形斑图的空间波长和运动速度随空气相对含量的变化关系曲线。实验发现:不同的放电间隙距下,正方形的空间波长均随空气相对含量的增大而减小;空气相对含量是决定正方形斑图运动速度的一个重要因素,当空气相对含量约为 10% 时,正方形斑图的运动速度达到最大值 14 mm/s。运动的正方形斑图是系统中 Turing 不稳定性和 Hopf 不稳定或波不稳定共同作用的结果。

[1] Gal P, Le, Pocheau A, Croquette V 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 2501  
 [2] Moses E, Steinberg V 1986 *Phys. Rev. Lett.* **57** 2018  
 [3] Bajaj K, Liu J, Naberhuis B, Ahlers G 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 806  
 [4] Gal P, Le, Croquette V 1998 *Phys. Fluids* **31** 3440  
 [5] Kudrolli A, Gollub J P 1996 *Physica D* **97** 133  
 [6] Umbanhowar P B, Melo F, Swinney H L 1998 *Physica A* **249** 1  
 [7] Ackemann T, Lange T 2001 *Appl. Phys. B* **72** 21  
 [8] Dong L F, Yin Z Q, Wang L, Fu G S, He Y F, Chai Z F, Li X C 2003 *Thin Solid Film* **435** 120

[9] 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]  
 [10] 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  
 [11] Sakaguchi H, Brand H R 1997 *J. Phys. II France* **7** 1325  
 [12] Buceta J, Lindenberg K, Parrondo J M R 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 024103  
 [13] Yang L, Zhabotinsky A M, Epstein I R 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 198303  
 [14] Dong L F, Liu F C, Liu S H, He Y F, Fan W L 2005 *Phys. Rev.*

- E 72 046215
- [ 15 ] Dong L F , He Y F , Yin Z Q , Chai Z F 2004 *Plasma Sources Sci. Technol.* **13** 164
- [ 16 ] Dong L F , Li S F , Liu F , Liu F C , Liu S H , Fan W L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 362 ( in Chinese ) [ 董丽芳、李树锋、刘峰、刘富程、刘书华、范伟丽 2006 *物理学报* **55** 362 ]
- [ 17 ] Ammelt E , Astrov Yu A , Purwins H G 1997 *Phys. Rev. E* **55** 6731
- [ 18 ] Kaminaga A , Vanag V K , Epstein I R 2005 *Phys. Rev. Letts.* **95** 058302
- [ 19 ] Thompson K L , Bajaj K M S , Ahlers G 2002 *Phys. Rev. E* **65** 046218
- [ 20 ] Strümpel C , Purwins H G , Astrov Yu A 2001 *Phys. Rev. E* **63** 026409
- [ 21 ] Logvin Yu A , Samson B A , Afanas 'ev A A , Samson A M , Loiko N A 1996 *Phys. Rev. E* **54** R4548
- [ 22 ] Logvin Yu A , Ackemann T 1998 *Phys. Rev. E* **58** 1654

## Study on the properties of the square pattern in Air/Ar dielectric barrier discharge<sup>\*</sup>

Fan Wei-Li Dong Li-Fang<sup>†</sup> Li Xue-Chen Yin Zeng-Qian He Ya-Feng Liu Shu-Hua

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

( Received 10 July 2006 ; revised manuscript received 16 August 2006 )

### Abstract

The properties of the square pattern as a function of the relative air content is studied in Air/Ar dielectric barrier discharge system at one atmosphere pressure. The dependence of the spatial wavelength and the traveling velocity of the square pattern on the relative air content is obtained. It is found that the spatial wavelength of the square pattern is decreased with the increased relative air content at different gas gap distances. The traveling velocity of the square pattern is also closely related to the value of the relative air content , which reaches its maximum 14mm/s when the air relative component is 10% .

**Keywords** : dielectric barrier discharge , square pattern , relative air content

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

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grants Nos. 10375015 , 10575027 ) , the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China ( Grant No. 20050075001 ) , the Natural Science Foundation of Hebei Province , China ( Grant Nos. A2004000086 , 2006000950 ) .

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