

大气压介质阻挡放电中的自组织斑图结构

董丽芳¹⁾ 李雪辰¹⁾ 尹增谦¹⁾ 王 龙²⁾

¹⁾ 河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

²⁾ 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2001 年 12 月 12 日收到 2002 年 2 月 27 日收到修改稿)

采用水作为电极,对大气压介质阻挡放电中的自组织斑图结构进行了研究,观测到了规则的斑图结构(包括准六边形斑图和条带状斑图)和不规则的斑图结构.实验发现斑图中放电丝的密度随着电介质层厚度的增加及放电气隙宽度变大而减小,而随外加电压及频率增大而增大.采用空间相关函数的方法分析了准六边形斑图结构中的放电丝分布与驱动电源电压的关系.

关键词:介质阻挡放电,自组织斑图,放电丝密度,空间相关函数

PACC: 5280P, 0565, 4754, 5250

1. 引 言

1952 年英国数学家 Turing 采用一个简化的动力学模型研究了形态发生过程(morphogenesis),并预言在空间非平衡系统中将产生对称性自发破缺,从而形成不均匀的自组织斑图结构^[1].近十年来,人们在涉及生物、化学、物理甚至是经济等领域的很多系统中发现了自组织斑图结构,其中包括六边形结构和条带结构及其二者的混合结构^[2-6].其中气体放电系统中产生的自组织斑图结构尤为引人注目^[7,8],因为人们期望搞清控制自组织行为的原理,将其应用在未来的信息处理^[9]、材料的局域性生长^[10]等方面.

介质阻挡放电(DBD)是一个典型的非平衡态交流气体放电过程,可以产生二维的自组织斑图结构^[11].介质阻挡放电(Dielectric Barrier Discharge)通常是由两个平行电极组成,其中两个电极中至少有一个被电介质层所覆盖,当两电极之间加上交流高压使两极间的气体击穿而形成的一种放电.在这种放电中,气压 p 与两介质板间的气体间隙的宽度 d 的乘积 pd 的变化范围很大, pd 可以从几百 Pa·cm 到几万 Pa·cm 之间变化.两极间所加正弦或方波电压的频率可以达到几百 kHz.介质阻挡放电中的电介质层既能起限流作用又能阻止放电向弧光放电的过渡,可以实现高气压气体放电,因而正被日益广泛地应用于臭氧合成、大功率紫外及真空紫外光源,水

处理和环境保护等领域^[12-14].

对于低 pd 值或所加的电压稍高于击穿电压的情况下,气体的击穿放电属于汤森放电.而对于高 pd 值和气隙过压的条件下,放电为流光模式,在气体发生击穿放电后,气隙中会形成许多微放电通道(也称为放电丝),通常放电丝在空间和时间上是随机分布的,但在适当的条件下,放电丝可以相互作用而形成稳定的空间斑图结构.近年来,在低气压气体放电系统中观察到了斑图结构,例如 Ammelt 等人采用高掺杂的半导体材料做阴极的直流放电系统中,在温度 $T = 90\text{K}$ 、气体压强 p 为 $6 \times 10^3 - 20 \times 10^3 \text{Pa}$ 时观察到了六边形斑图结构和条带结构^[11].Strümpel 等人采用类似的放电系统在 p 为 $4 \times 10^3 - 6 \times 10^3 \text{Pa}$ 的室温条件下观察到了放电丝间存在着相互作用,并在适当的条件下观察到了六边形斑图结构和条带结构^[15].由于传统介质阻挡放电装置的限制,在高气压(如大气压)的条件下很难形成稳定的斑图结构,且不易于观察,因而大气压条件下的二维斑图结构研究尚未见报道.本工作采用特殊的水电极 DBD 装置,在大气压条件下获得了稳定的斑图结构,并系统地研究了介质阻挡层的厚度 l_d 、放电驱动电压 U 、放电气隙宽度 d 及驱动电压的频率 f 等各个实验参数对介质阻挡放电自组织斑图的影响.

2. 实验装置

图 1 是采用圆形水电极作上电极的介质阻挡放

电装置.宽度为 0.2—2mm 的放电气隙由平行放置的铜电极和水电极围成,两电极上都覆盖有玻璃,其中上电极处玻璃厚度为 1mm 而下电极处玻璃为 1mm 或 2mm.气隙中的气体为大气压的空气,温度基本上是室温.驱动电源的频率为 3kHz 或 33.3kHz,峰值电压为 0—20kV,它的高压输出加在铜电极和水电极之间.放电系统的激活区直径为 50mm.在水电极的上方用照相机记录放电斑图.

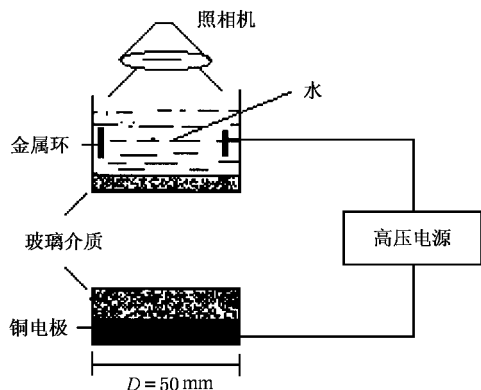


图1 介质阻挡放电水电极实验装置图

水电极的采用不仅利于对放电斑图的观察,而且更重要的是由于水是热的良导体,它能均匀地降低电极温度,从而有利于获得稳定的自组织放电斑图。

3. 结果与讨论

本工作在电压 U 从 4.5kV 到 9kV,气隙宽度 d 从 0.1mm 到 2mm 的范围内对放电斑图进行了研究,观察到了规则的和不规则的斑图结构.图 2 给出了几种典型的结构,斑图结构中的亮点代表微放电通道(放电丝).图 2(a)为不规则结构,图 2(b)为准六边形斑图结构,图 2(c)为条带状斑图结构.图 2(a)中有一些暗线,是一些放电丝在曝光时间内移动造成的.后两种结构较稳定,稳定时间为几分钟。

实验发现斑图结构随介质阻挡层的厚度 l_d 、放电驱动电压 U 、放电气隙宽度 d 及驱动电压的频率 f 等实验参数的变化而变化。

图 3 给出了准六边形斑图结构随气隙宽度的变化.显见放电丝的直径和密度均与放电气隙宽度 d 有关.气隙宽度 d 越大,放电丝的直径越大;仔细计算两图中的放电丝的密度,发现气隙宽度 d 越大,放电丝的密度 ρ 越小^[16].为了更加明显地观察放电丝随气隙宽度 d 的变化情况,实验中使两电极稍微不平行,使气隙宽度 d 连续变化,图 4(a)记录了此

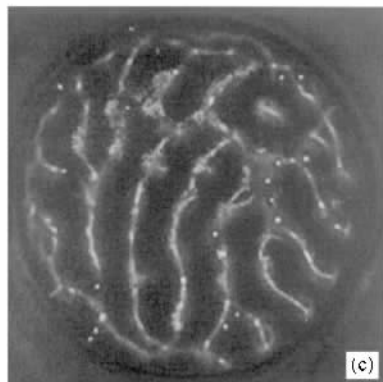
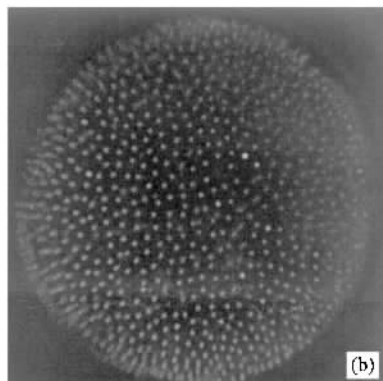
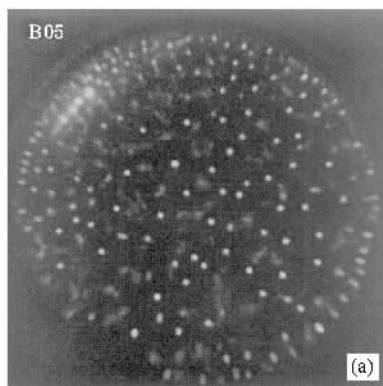


图2 大气压介质阻挡放电的斑图结构 (a)不规则斑图结构: $d = 0.7\text{mm}$, $U = 6\text{kV}$, $f = 33\text{kHz}$, $t_{\text{exp}} = 0.5\text{s}$ (b)六边形斑图结构: $d = 0.4\text{mm}$, $U = 6\text{kV}$, $f = 33\text{kHz}$, $t_{\text{exp}} = 0.5\text{s}$ (c)条带状斑图结构: $d = 0.8\text{mm}$, $U = 7\text{kV}$, $f = 3\text{kHz}$, $t_{\text{exp}} = 4\text{s}$;

不平行气隙的放电斑图.显见放电丝的直径随气隙宽度增大而增大,放电丝的密度 ρ 随气隙宽度 d 的增大而减小.图 4(b)给出了放电丝密度 ρ 随气隙间距 d 的变化曲线.图 5 给出了放电丝的密度 ρ 同电介质层厚度的关系,它表明电介质层越厚则放电丝的密度 ρ 越小.图 6 给出了自组织放电丝密度 ρ 随驱动电压 U 的变化情况,从图中可观察到驱动电压越高,放电丝密度 ρ 越大.实验还研究了驱动电

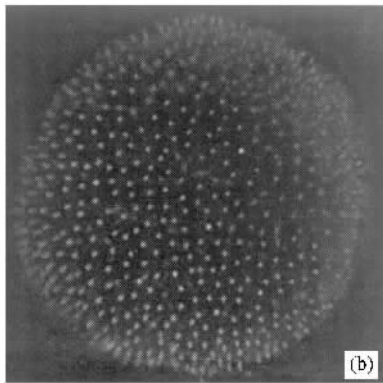
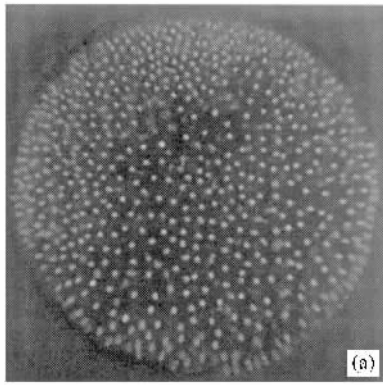


图3 介质阻挡放电自组织斑图放电丝分布同气隙宽度 d 的变化关系 (a) $d = 0.5\text{mm}$, $U = 6\text{kV}$, $t_{\text{exp}} = 0.5\text{s}$ (b) $d = 0.4\text{mm}$, $U = 6\text{kV}$, $t_{\text{exp}} = 0.5\text{s}$

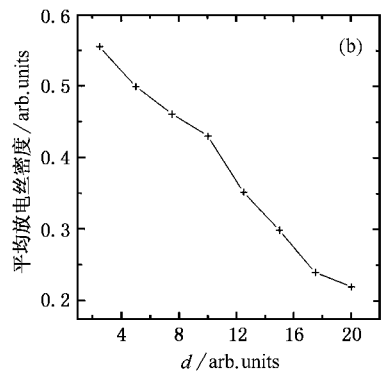
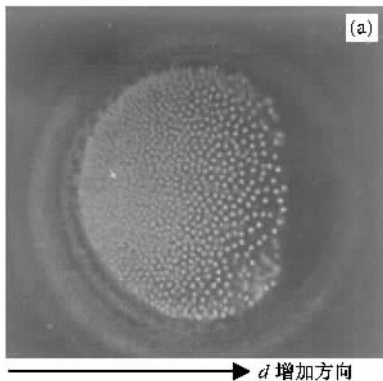


图4 不平行电极产生的介质阻挡放电 (a)自组织斑图放电丝的分布: $U = 4\text{kV}$, $d = 0.4\text{mm}$, $f = 33\text{kHz}$, $t_{\text{exp}} = 1\text{s}$ (b)对应(a)作出的放电丝密度随气隙宽度 d 的变化关系曲线

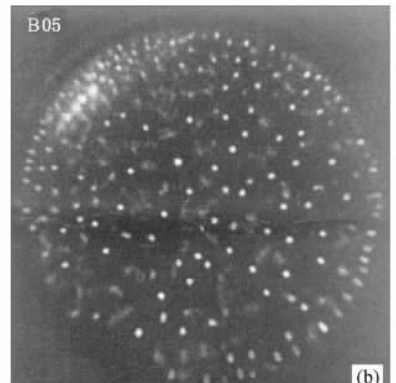
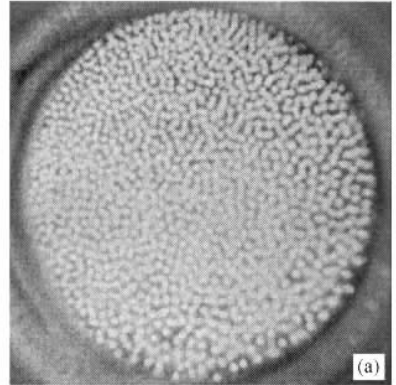


图5 介质阻挡放电自组织斑图中放电丝密度 ρ 随电介质层厚度 l_d 的变化关系 (a)上电介质板 $l_{d1} = 1\text{mm}$, 下电介质板 $l_{d2} = 1\text{mm}$, $t_{\text{exp}} = 0.5\text{s}$ (b)上电介质板 $l_{d1} = 1\text{mm}$, 下电介质板 $l_{d2} = 2\text{mm}$, $t_{\text{exp}} = 0.5\text{s}$

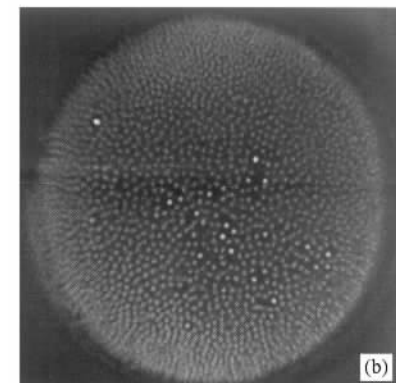
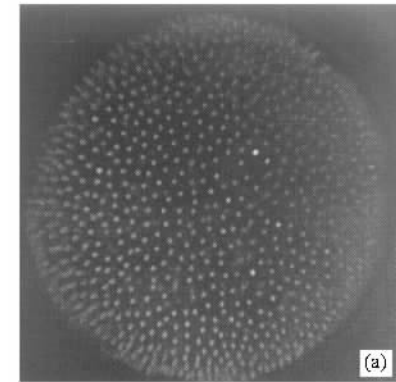


图6 介质阻挡放电自组织斑图随电压 U 的变化关系 (a) $U = 6.5\text{kV}$, $d = 0.4\text{mm}$, $t_{\text{exp}} = 0.5\text{s}$ (b) $U = 8\text{kV}$, $d = 0.4\text{mm}$, $t_{\text{exp}} = 0.5\text{s}$

源频率对斑图结构的影响,在其他实验参数相同的情况下,频率为 33kHz 时的放电丝密度较大,如图 7 所示,但稳定时间比频率为 3kHz 的放电斑图短。

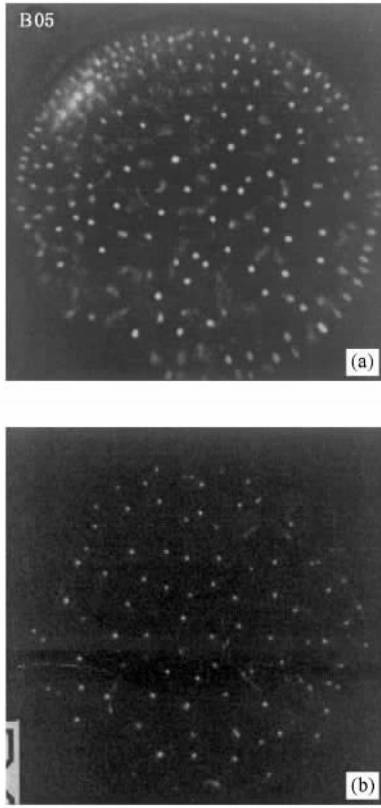


图 7 介质阻挡放电自组织斑图放电丝分布同驱动电源频率 f 的变化关系 (a) $f = 33\text{kHz}$, $t_{\text{exp}} = 0.5\text{s}$ (b) $f = 3\text{kHz}$, $t_{\text{exp}} = 0.5\text{s}$

关于放电丝密度与实验条件的关系可做如下定量解释:设 l_d 为介质层厚度, d 为气隙宽度, ϵ_g , ϵ_d 分别为气体及电介质层的介电常数, E 是气隙中的电场强度,则在忽略壁电荷影响的情况下 E 可表示为

$$E = \frac{U}{2l_d\epsilon_g + d\epsilon_d} \quad (1)$$

放电空间的平均电流密度为^[17]

$$j = \frac{2e^2 n_e}{m_e \nu} E \quad (2)$$

其中 j 为平均电流密度、 e 为电子电量、 n_e 为电子密度、 m_e 为电子质量、 ν 为电子的有效碰撞频率。

则平均电流密度 j 同电压 U 、气隙宽度 d 、介质层厚度 l_d 的关系可表示为

$$j = \frac{2e^2 n_e U}{m_e \nu (2l_d\epsilon_g + d\epsilon_d)} \quad (3)$$

可见电流密度随着电介质层厚度的增加而减少,随电气隙宽度变大而减小,随外加电压增大而

增大,所以斑图的放电丝密度也随着电介质层厚度的增加及电气隙宽度变大而减小,随外加电压增大而增大。

此外,放电斑图中的放电丝直径和亮度其实并不完全相同,从图 6 可看出,在照片中存在着几个较亮的、较大的放电丝,它们到邻近放电丝的距离大于整个照片中所有放电丝之间的平均距离。根据以上解释可知,在实验参数完全相同的情况下,斑图中各处的平均电流密度应相等,由此可知,为了保证各处平均电流密度相等,则放电中那些较大、较亮的放电丝必应‘占据’较大的面积,即较大、较亮的放电丝到邻近放电丝的距离应大一些。至于少数较亮放电丝存在的原因目前尚不清楚。

为了定量地分析放电斑图的空间分布,在数据处理时可引入放电丝的空间相关函数 ρ_r , 它的定义如下^[15]:

在放电斑图的照片中,如果发光点的亮度超过某个临界值,则此点可被认为是一个放电丝,这样就可以确定斑图中每个放电丝的位置。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 个点进行上述过程,然后取平均即

$\frac{\sum \frac{n_r}{2\pi r \Delta r}}{N}$ 。为了减小放电区的边缘效应,在实际计算中仅考虑了激活区中心区域一个小圆形区域内的

N 个放电丝,此小圆形区域的直径是整个激活区直径 $D = 50\text{mm}$ 的一半为 25mm 。即为了使所考虑的放电丝的周围完全处于体系激活区中, r 的最大值 r_{max} 定为 $D/4 = 12.5\text{mm}$ 。则 ρ_r 可表示为

$$\rho_r = \frac{\sum \frac{n_r}{2\pi r \Delta r}}{N} \quad (4)$$

显见,空间相关函数 ρ_r 就是与一个丝距离为 r 处单位面积上放电丝的平均数目。

为了由空间相关函数结果分析放电斑图的结构类型,我们首先采用计算机构造了六边形结构、准六边形结构和完全随机结构的分布。其中准六边形结构是使部分六边形的顶点随机偏离理想位置而构造的。然后对上述三种结构的分布进行了空间相关函数分析,结果如图 8 所示。图 8(a) 为六边形结构的分布, a 为六边形的边长。显见六边形

结构 ρ_r 的峰是分立的,前三个峰的位置分别在 a , $1.73a$ 和 $2a$ 处.图 8(b)为准六边形结构的空
间相关函数分布,其最大偏离为 $0.2a$,由图可见此时第
二个峰和第三个峰叠在一起形成了一个较宽的峰,
峰值位置在 $2a$ 附近.图 8 为完全随机分布的情况,
显见其没有任何峰.

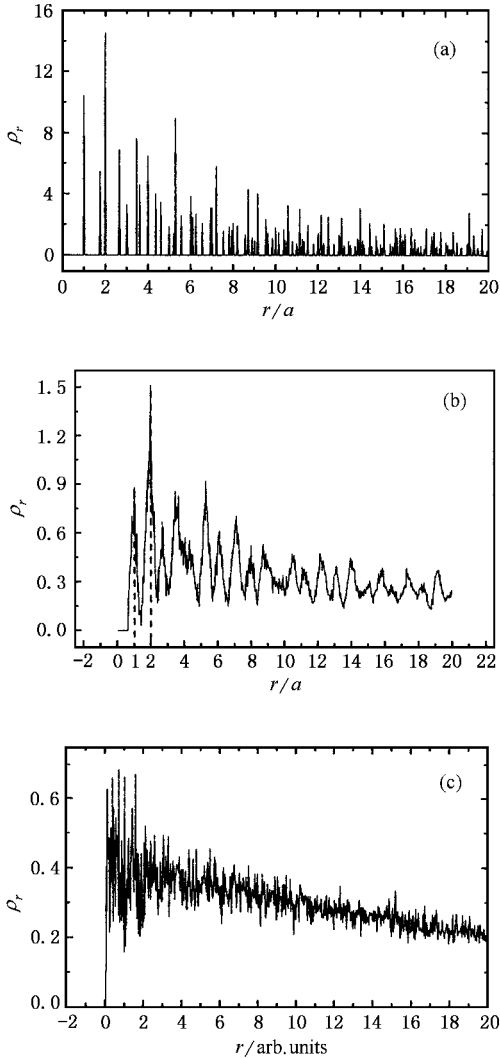


图 8 计算机构造的六边形结构(a)准六边形结构(b)及
完全随机分布(c)的空间相关函数 ρ_r

图 9 给出了在不同驱动电压下空间相关函数 ρ_r 的变化情况.从图中可以看出,空间相关函数在 a 与 $2a$ 处存在明显的峰值,与图 8(b)的情况类似,所以进一步确认实验中得到的放电斑图是准六边形结构.从图中还可以看出,当电压 $U = 6.5\text{kV}$ 时,临

近丝间距 l 的最可几值为 2.4mm ,当电压 $U = 8\text{kV}$ 时,临近丝间距 l 的最可几值为 1.53mm .故增大电压,丝间距离减小,即丝密度增大.

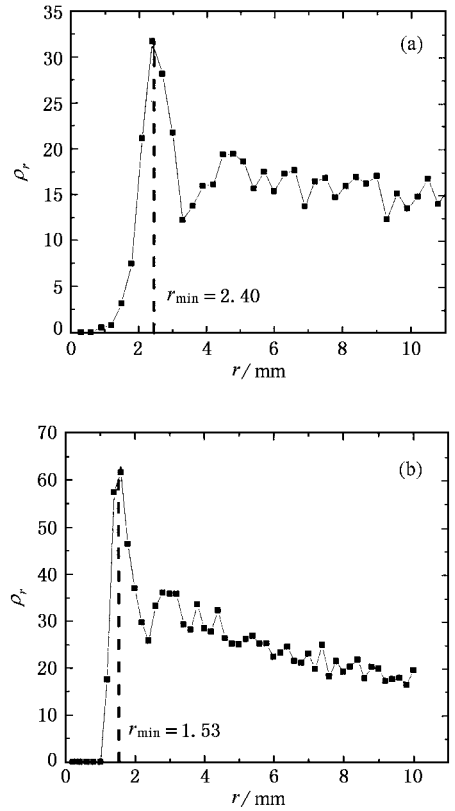


图 9 斑图中放电丝密度随电压变化情况的相关函数
分析 (a) $U = 6.5\text{kV}$, $d = 0.4\text{mm}$ (b) $U = 8\text{kV}$, d
 $= 0.4\text{mm}$

4. 结 论

本工作采用水作为电极,实现了对大气压介质
阻挡放电自组织斑图的观测,并且采用空间相关函
数的方法分析了准六边形自组织斑图放电丝的空
间分布与驱动电源电压的关系.实验发现准六边形
斑图中丝密度随着电介质层厚度的增加及放电气
隙宽度变大而减小,随外加电压及频率增大而增大.

进一步,我们进行了关于斑图结构形成的时空
动力学方面的实验研究,发现了放电丝之间的相关
性^[18,19],并提出了放电畴的概念,结果另行发表.

- [1] Turing A M 1925 *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B* **327** 37
- [2] Cross M C and Hohenberg P C 1993 *Rev. Mod. Phys.* **65** 851
- [3] Murray J D 1989 *Mathematical Biology* (Berlin :Springer)
- [4] Kapral R and Showalter K 1995 *Chemical Waves and Patterns* (Kluwer :Dordrecht)
- [5] Imbihl R and Ertl G 1995 *Chem. Rev.* **95** 697
- [6] Zykov V S and Müller S C 1996 *Phys. D* **97** 322
- [7] Raizer Y P 1991 *Gas Discharge Physics* (Berlin :Springer)
- [8] Ammelt E , Schweng D and Purwins H G 1993 *Phys. Lett. A* **179** 348
- [9] Ammelt E , Astrov Y A and Purwins H G 1998 *Physical Review E* **58** 7109
- [10] Nan J , Sheng F Q , Long W and Hou X Z 2001 *Thin Solid Film* **392** 119
- [11] Ammelt E , Astrov Y A and Purwins H G 1997 *Physical Review E* **55** 6731
- [12] Eliasson B and Kogelschatz U 1991 *IEEE Trans. on Plasma Science* **19** 309
- [13] Müller I , Punset C , Ammelt E , Purwins H G and Boeuf J P 1999 *IEEE Trans. on Plasma Science* **27** 20
- [14] Falkenstein Z and Coogan J J 1997 *J. Phys. D :Appl. Phys.* **30** 817
- [15] Strümpel C and Purwins H G 2001 *Physical Review E* **63** 026409
- [16] Dong L F , Li X C , Yin Z Q , Qian S F , Ouyang J T and Wang L 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1380
- [17] Peng G X 1982 *Gas Discharge——Application of the Plasma Physics* (Shanghai :Knowledge Publishing Press) p38 (in Chinese [彭国贤 1982 气体放电——等离子体物理的应用(上海 :知识出版社)第 38 页]
- [18] Dong L F , Yin Z Q , Li X , Qian C and Wang L 2001 *Pattern formation and spatiotemporal dynamics of discharge filaments in DBD* , Inter. Conf. Pattern formation and self-organization , O27 , 2001 (Beijing)
- [19] Yin Z Q , Li X , Qian C , Dong L F 2001 *Temporal aspects of light emission of DBD* , ICAES ' 2001 (Dalian)

Pattern formation in dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure

Dong Li-Fang¹⁾ Li Xue-Chen¹⁾ Yin Zeng-Qian¹⁾ Wang Long²⁾

¹⁾ College of Physics Science & Technology , Hebei University , Baoding 071002 , China)

²⁾ Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)

(Received 12 December 2001 ; revised manuscript received 27 February 2002)

Abstract

Pattern formation has been observed in dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure by using water electrodes. These patterns include regular patterns(hexagon-like structure and stripe structure) and irregular patterns. It has been found that the filament density decreases with the thickness of the dielectric and the gas gap spacing increase. But it increases with both voltage and frequency increase. The dependence of the filament density on the applied voltage has been studied by analyzing the spatial correlation function in pattern formation.

Keywords : dielectric barrier discharge , self-organized pattern , density of the filaments , spatial correlation function

PACC : 5280P , 0565 , 4754 , 5250