

介质阻挡放电中的八边形结构

赵龙虎,董丽芳,狄聪,张新普,张超

(河北大学 物理科学与技术学院,河北 保定 071002)

摘 要:采用双水电极介质阻挡放电装置,在放电间隙 d 值较大的实验条件下进行了斑图实验,实验首次得到了稳定的八边形结构,并对其演化序列和时空动力学进行了研究.实验发现,随外加电压的升高,系统经历了随机分布放电丝—大半径放电丝—八边形结构—失稳的八边形结构的演化过程.通过对其时空相关性测量,发现八边形结构在每半个电压周期内有 2 次放电.为了进一步研究八边形结构,实验还给出了斑图随空气体积分数和外加电压变化的相图,以及八边形结构随气体压强和外加电压变化的相图.

关键词:介质阻挡放电;斑图;时空动力学

中图分类号:O461

文献标志码:A

文章编号:1000-1565(2013)03-0242-05

Octagon structure in dielectric barrier discharge

ZHAO Longhu, DONG Lifang, DI Cong, ZHANG Xinpu, ZHANG Chao

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

Abstract: A stable octagon structure is firstly obtained and its evolvement and spatial-temporal dynamics are investigated by using the dielectric barrier discharge device with two water electrodes and with a relatively large d value. It is found that as the applied voltage increasing continuously a bifurcation scenario of the pattern follows as: random filaments—long radius filaments—the octagon structure—the instable octagon structure. The spatio-temporal correlation measurements indicate that there are two current pulses in each half of the applied voltage. In order to research the octagon structure further, the phase diagrams of the pattern as a function of air concentration and applied voltage, gas pressure and applied voltage are shown.

Key words: dielectric barrier discharge; pattern; spatial-temporal dynamics

介质阻挡放电(Dielectric Barrier Discharge)^[1-2]又称无声放电,是一种典型的非平衡态交流气体放电,其运行过程为准连续的瞬态过程.近年来,大气压介质阻挡放电以其成本低、装置简单、应用领域广泛等特点,引起了学者们的研究热潮,并在臭氧的合成、等离子体化学气相沉积、等离子体显示器、环境污染处理、局部材料生长等工业领域得到了广泛的应用^[3-9].介质阻挡放电通常由大量微放电通道组成^[10],在一定的条件下,这些微放电通道可形成稳定的空间分布即斑图.

收稿日期:2012-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11175054;10975043);河北省自然科学基金资助项目(A2010000185)

第一作者:赵龙虎(1985-),男,河北衡水人,河北大学在读硕士研究生,主要从事光学诊断方面的研究.

通信作者:董丽芳(1963-),女,河北保定人,河北大学教授,博士生导师,主要从事光学诊断与等离子体物理方面的研究.

E-mail: donglif@hbu.edu.cn

斑图(pattern)^[11]是指在时间或空间上具有某种规律性的非均匀宏观结构,是由系统中的微观参量之间的相互作用而导致的宏观量有序分布的状态,是一种典型的非线性自组织现象^[12].近年来,在介质阻挡放电系统中发现了种类多样的斑图,如:四边形斑图、六边形斑图、螺旋波斑图、条纹斑图以及多种超点阵斑图等等.以上这些斑图都是在放电间隙 d 值较小的实验条件下得到的,对在 d 值较大的实验条件下的斑图研究甚少.

本实验是在 d 值较大的实验条件下进行的,首次发现了稳定的八边形结构:在一定的放电区域内,其放电丝密度小、半径大、排列规则,并有且仅有 1 个单元的八边形结构,是以往斑图研究中未曾报道过的.该结构不仅丰富了介质阻挡放电系统中的斑图种类,还进一步拓展了在 d 值较大的实验条件下的斑图研究,并对今后在 d 值较大的实验条件下的斑图研究有一定的推动作用.

1 实验装置

该实验使用双水电极实验装置^[13],如图 1 所示.水电极是由 2 个装满水的内径为 70 mm 的圆柱形容器组成,其两端与高压交流电源连接的金属环浸在水中.容器两端分别用厚度为 1.5 mm 的干板和 2.0 mm 的普通玻璃封住,作为介质层.2 个水电极之间的放电间隙是可调的,但该实验采用的是放电间隙 $d=3.8$ mm、边长 $L=12$ mm 的八边形框架.整个放电装置处于真空室内,放电气体是纯氩气,气压控制在 60 kPa.交流电源的可调范围是 0~10 kV,高压探头(Tektronix P6015A 1000X)用于测量电压幅值,驱动电源频率一般在 55~60 kHz,其数值可以通过示波器(Tektronix TDS3054B)读出,用数码相机(Canon Powershot G1)拍摄斑图的演化过程.通过透镜系统可以测量 1 个或多个放电丝的光信号,并由光电倍增管 PMT(RCA 7625)采集和示波器记录.

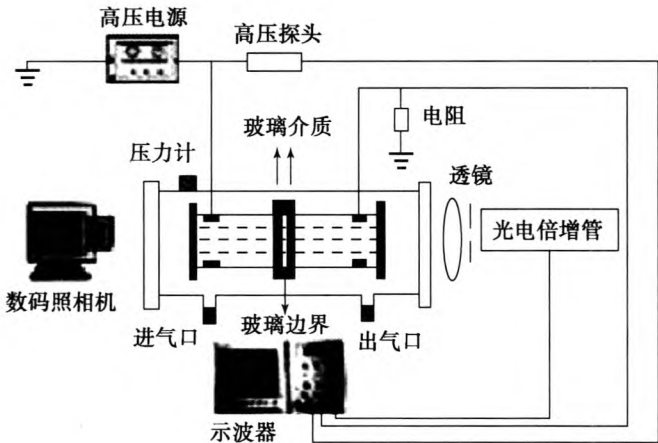


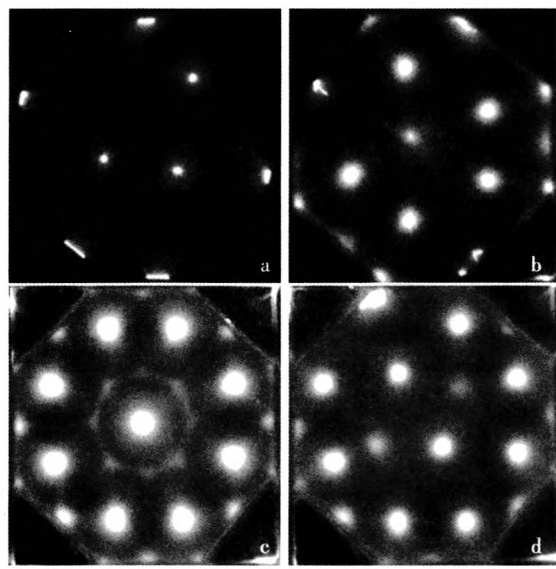
图 1 实验装置
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

2 实验结果与讨论

实验使用了放电间隙 $d=3.8$ mm 的八边形框架,因为 d 值较大,所以实验首先需要在高压下演化一小段时间,看到大半径放电丝出现即可.图 2 是随电压升高过程中八边形结构的演化序列,依次为:随机分布放电丝—大半径放电丝—八边形结构—失稳的八边形结构.当气体击穿后,首先出现的是若干随机分布放电丝,如图 2a 所示.随着电压的升高,随机放电丝的半径和亮度都会有所增加,进而形成大半径放电丝,如图 2b 所示.随着电压的继续升高,大半径放电丝开始自组织排列并占满整个放电区域,形成如图 2c 所示的八边形结构.在此基础上电压进一步升高,八边形结构失稳,如图 2d 所示.实验将八边形结构分成了 2 部分:一部分是图 2c 中的线八边形;另一部分是图 2c 中的 9 个大半径放电丝.

在 d 值较大的实验条件下,随着电压的增加,八边形结构的单元数量是不会增加的,有且仅有 1 个单元的八边形结构;放电丝的半径、亮度及放电丝与放电丝之间的距离都比以往斑图中的放电丝要大;大半径放电丝不仅比其他斑图中的放电丝半径要大,而且还有一定的势力范围.如图 2c 所示,中间的大半径放电丝的势力范围最大,正是由于这种特性,使 9 个大半径放电丝规则的占满整个放电区域,形成有且仅有 1 个单元的八边形结构.

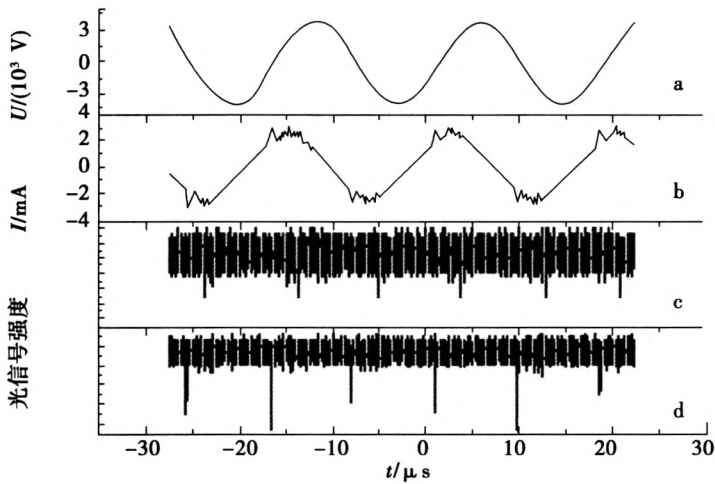
通过对八边形结构进行时空相关性测量,笔者研究了八边形结构的时空动力学.首先对图 2c 中的线八边形的不同位置进行了光信号测量,测量发现线八边形的不同位置是同时放电的,如图 3c 所示.然后,对 9 个大半径放电丝进行了光信号测量,测量发现 9 个大半径放电丝也是同时放电的,如图 3d 所示.通过对图 3 的光信号分析,结果得出在每半个电压周期内有 2 次放电,1 次是线八边形放电,1 次是 9 个大半径放电丝同时放电.



a. 随机分布放电丝, $U=2.64$ kV; b. 大半径放电丝, $U=3.20$ kV; c. 八边形结构, $U=3.92$ kV; d. 失稳的八边形结构, $U=4.36$ kV.

实验参数:八边形边界,放电间隙 $d=3.8$ mm,边长 $L=12$ mm,驱动电压频率 $f=60$ kHz,气体压强 $p=60$ kPa,照片曝光时间 $t=20$ ms,放电气体为纯氩气.

图 2 随着电压的升高,介质阻挡放电系统中八边形结构的演化序列
Fig. 2 Octagon structure scenario with the applied voltage increasing



a. 电压波形; b. 电流波形; c. 线八边形光信号; d. 9 个大半径放电丝光信号.

图 3 通过介质阻挡放电装置,对八边形结构进行时空相关性测量

Fig. 3 Correlation measurements of the octagon structure in dielectric barrier discharge

实验测量了八边形结构随空气体积分数($0 \leq \chi \leq 2\%$)和外加电压变化的相图,图 4 所示. 由图显见,随空气体积分数的增加,产生八边形结构的外加电压也相应增加. 当空气体积分数不在这个范围时,就很难得到八边形结构了. 实验还测量了八边形结构随气体压强和外加电压变化的相图,如图 5 所示. 由图显见,随着气体压强的增加,产生八边形结构的外加电压也相应的增加. 当气体压强在 $40 \text{ kPa} \leq p \leq 60 \text{ kPa}$ 范围时,八边形结构容易获得,当气体压强不在这个范围时,就很难得到八边形结构了.

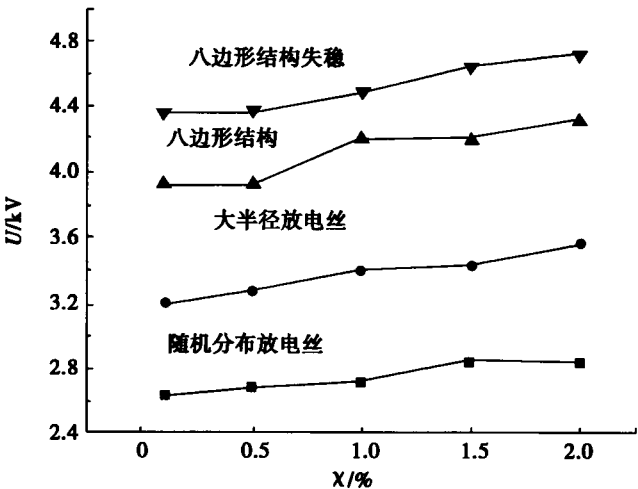


图 4 随外加电压和空气体积分数变化斑图出现的相图

Fig. 4 Phase diagram of the pattern types as a function of the applied voltage and air concentration

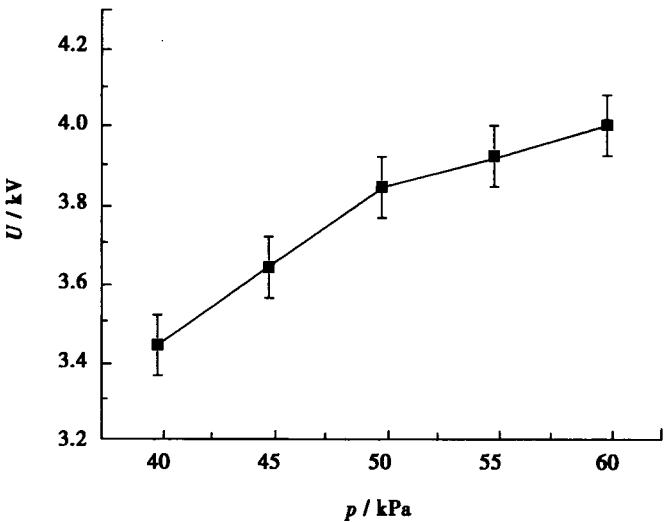


图 5 随外加电压和气体压强变化八边形结构出现的相图

Fig. 5 Phase diagram of the octagon structure as a function of the applied voltage and gas pressure

3 结论

实验采用双水电极介质阻挡放电装置,在放电间隙 d 值较大的实验条件下首次得到了稳定的八边形结构,并对其演化序列和时空动力学进行了研究. 实验在演化过程中得到了大半径放电丝,大半径放电丝有一定的势力范围,由于中间的大半径放电丝的势力范围最大,使 9 个大半径放电丝规则的占满整个放电区域,形成了有且仅有 1 个单元的八边形结构. 八边形结构在每半个电压周期内有 2 次放电,1 次是线八边形放电,1 次是 9 个大半径放电丝同时放电. 空气体积分数和气体压强的变化分别对八边形结构的存在有一定的依赖,随着空气体积分数($0 \leq \chi \leq 2\%$)的增加,外加电压也相应的增加;随着气体压强($40 \text{ kPa} \leq p \leq 60 \text{ kPa}$)

的增加,外加电压也相应的增加.实验结果对在 d 值较大实验条件下的斑图研究有了进一步的拓展,并对今后在该领域的理论和应用有着重要的参考价值.

参 考 文 献:

- [1] ELIASSON B, KOGELSCHATZ U. Modeling and applications of silent discharge plasmas [J]. IEEE Trans Plasma Science, 1991, 19(2):309 - 323.
- [2] 徐学基,揭亚雄. 介质阻挡放电击穿过程的研究[J]. 复旦学报:自然科学版,1997,36(3):268 - 274.
XU Xueji, JIE Yaxiong. Study on the breakdown process in dielectric barrier discharge [J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 1997, 36(3):268 - 274.
- [3] KOGELSCHATZ U. Filamentary, patterned and diffuse barrier discharges [J]. IEEE Trans Plasma Science, 2002, 30(4):1400 - 1407.
- [4] KUZUMOTO M, OGAWA S, TANAKA M, et al. Fast axial flow CO₂ laser excited by silent discharge[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990, 26(6):1130 - 1134.
- [5] KIM J, BYUN D, KIM J S, et al. Low-temperature growth of CaN by atomic nitrogen based on a dielectric barrier discharge[J]. Journal of Growth, 2000, 210:478 - 486.
- [6] ELIASSON B, KOGELSCHATZ U. Nonequilibrium volume plasma chemical processing[J]. IEEE Trans Plasma Science, 1991, 19(6):1063 - 1077.
- [7] SHRAI H, KOBAYASHI T, HASEGAWA Y. Synthesis of silicon nanocones using rf microplasma at atmospheric pressure[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87 (14) :143112 - 143114.
- [8] 毛志国,冉俊霞,尹增谦,等. 不同气压下氩气介质阻挡辉光放电的特性研究[J]. 河北大学学报:自然科学版,2004,24(6):589 - 593.
MAO Zhiguo, RAN Junxia, YIN Zengqian, et al. Study on characteristics of dielectric barrier glow discharge in argon at different pressure[J]. Journal of Hebei University: Natural Science Edition, 2004, 24(6):589 - 593.
- [9] JIANG Nan, QIAN Shengfa, WANG Long, et al. Localized material growth by a dielectric barrier discharge[J]. Thin Solid Films, 2001, 390:119 - 122.
- [10] 尹增谦,柴志方,董丽芳,等. 大气压氩气放电中的斑图形成[J]. 物理学报,2003,52(4):925 - 928.
YIN Zengqian, CHAI Zhifang, DONG Lifang, et al. Pattern formation in the dielectric barrier discharge in argon at atmospheric pressure[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(4):925 - 928.
- [11] MULLER I, PUNSET C, AMMEL T E, et al. Self-organized filaments in dielectric barrier glow discharges[J]. IEEE Trans Plasma Science, 1999, 27:20 - 21.
- [12] DONG Lifang, MAO Zhiguo, YIN Zengqian, et al. Generation of high-power-density atmospheric pressure plasma with liquid electrodes[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(25): 5142 - 5144.
- [13] 董丽芳,岳晗,范伟利,等. 介质阻挡放电跃变升压模式下靶斑图研究[J]. 物理学报,2011,60(6):065206.
DONG Lifang, YUE Han, FAN Weili, et al. Target patterns obtained by suddenly increasing applied voltage in dielectric barrier discharge[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6):065206.

(责任编辑:孟素兰)