

大气压氦气介质阻挡放电倍周期分岔 及混沌现象的实验验证*

王敦青¹⁾²⁾ 戴栋^{1)2)†} 郝艳捧¹⁾ 李立涅¹⁾

1) (华南理工大学电力学院, 广州 510641)

2) (西安交通大学, 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

(2012年5月29日收到; 2012年6月21日收到修改稿)

采用具有平行电极结构的介质阻挡放电装置, 在大气压氦气条件下进行了一系列放电实验, 观察了放电波形并对其进行了频谱分析. 结果表明, 在一定条件下随外施电压幅值的增加, 大气压氦气均匀介质阻挡放电会由周期一态放电经周期二态、周期四态放电进入混沌态放电. 研究验证了大气压氦气介质阻挡放电经倍周期分岔路径通向混沌的现象, 不仅仅出现在数值仿真中, 在现实实验中也是确实存在的.

关键词: 介质阻挡放电, 倍周期分岔, 混沌

PACS: 05.45.-a, 52.80.Tn

1 引言

气体放电低温等离子体技术在材料、机械及环境保护等学科领域中有着广泛的应用^[1-4]. 大气压介质阻挡放电在产生低温等离子体时不需要昂贵的真空设备, 因而具有良好的应用前景. 需要指出的是, 气体放电是一种典型的非线性时空系统, 对低气压下气体放电的研究已经表明, 在一定的参数条件下放电会呈现各种典型的非线性现象, 如倍周期分岔^[5]、混沌^[6]、准周期^[7]、间歇性混沌^[8]. 相对而言, 大气压介质阻挡放电中引入的介质层, 对放电的产生和抑制具有极其重要的作用, 整个放电过程的动力学机理将更加复杂. 因此, 研究介质阻挡放电中的非线性现象对深入理解这种放电的稳定性和动力学机理具有重要的意义.

实际上, 近年来国内外学者已经针对大气压介质阻挡放电的非线性行为开展了初步的研究^[9-13]. Zhang等^[9]使用一维流体模型对大气压氦气介质

阻挡放电进行了数值仿真, 发现随着外施电压的升高, 放电经历了一系列复杂的分岔过程, 在某些电压下, 还会出现周期三的放电现象. Wang等^[10]进行了类似的研究, 发现在一定条件下随着外施电压频率的增加, 放电将通过倍周期分岔的途径通向混沌. Shi等^[11]使用相似的流体模型对大气压氦气介质阻挡放电进行了数值仿真, 发现随着外施电压频率的增加, 放电不仅可以通过倍周期分岔进入混沌, 而且还可以从混沌状态通过倒分岔回到稳定的周期放电. 此后, Zhang等^[12]还使用一维流体模型对脉冲电源驱动下的大气压氦气介质阻挡放电进行了数值仿真研究, 发现在较大的参数区间内存在着周期二放电, 并且在一定条件下当脉冲电压下降沿时间或频率增加时, 放电将由倍周期分岔路径通向混沌; 类似地, 在射频正弦电压驱动下, 随着电压幅值的增加, 放电也会以倍周期分岔路径进入混沌^[13].

可以看出, 目前关于大气压介质阻挡放电倍周期分岔及混沌现象的报道都是通过采用一维流体

* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2011ZM0016)、电力设备电气绝缘国家重点实验室开放基金 (批准号: EIP10210) 和自然科学基金 (批准号: 50807018) 资助的课题.

† E-mail: ddai@scut.edu.cn

模型进行数值仿真研究而得到的. 虽然数值仿真在气体放电的机理研究中具有不可替代的作用, 但是考虑到一维流体模型与实际情况的差异, 由一维流体模型数值仿真得到的倍周期分岔和混沌现象是否能在现实实验中发生, 仍然存在一定的争议和疑问. 因此, 本文对采用平行电极的大气压氦气介质阻挡进行针对性的实验研究, 观察了随外施电压幅

值增加时的放电波形, 并对其进行了频谱分析, 验证了倍周期分岔和混沌现象在现实实验中的存在.

2 实验设置

实验系统主要包括电源、放电室、测量电路三个部分, 如图 1 所示.

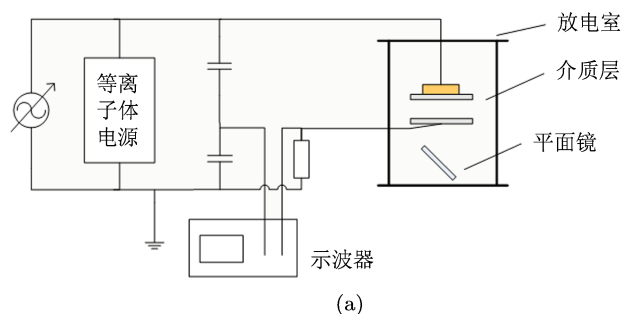


图 1 实验装置 (a) 原理图; (b) 实际图

电源部分包括调压器和低温等离子体电源, 测量电路包括数字存储示波器、高压探头以及用于测量放电电流的电阻, 具体的型号和参数如表 1 所示.

放电室可抽真空至 10^{-3} Pa, 并充以纯度为 99.99% 的氦气至大气压. 上电极为圆形铝平板, 直径 60 mm, 通过放电室器壁的套管接入高压; 下电极为圆形平板透明电极, 由 100 mm×100 mm 石英玻璃的中心喷涂直径为 60 mm 的圆形掺锡氧化铟 (Indium Tin Oxides, ITO) 导电薄层制得, 通过平面反光镜可观察放电时电极表面的发光情况. 阻挡介质为 100 mm×100 mm×1 mm 的石英玻璃, 其相对介电常数为 3.6.

表 1 实验装置参数

设备	型号	参数
调压器	正泰 TDGC2-1	50 Hz, 0—250 V, 1 kW
低温等离子体电源	苏曼 CTP-2000K	10—47 kHz, 0—30 kV, 0—500 W
数字存储示波器	Tektronix DPO4104	1 GHz, 10 GS/s
高压探头	Tektronix P6015A	1 : 1000
测量电阻	—	无电感, 400 Ω

本文实验中的放电气隙宽度设置为 2.08 mm, 外施电压频率范围为 10—30 kHz. 调节电压参数时, 先确定频率值, 再逐渐增加电压峰值. 某一频率下的观察结束后, 关闭电源 30 s 左右, 再进

行下一电源频率的实验, 相邻实验的频率间隔约为 0.5 kHz.

3 实验结果及分析

按照上面描述的实验步骤进行了大量的实验研究, 在一定的参数条件下, 可以观察到明显的倍周期分岔及混沌放电现象. 下面以频率 $f_0 = 26.6$ kHz 时的实验结果为例, 简要说明随外施电压幅值的增加, 放电由周期一 (P1) 放电经倍周期分岔至周期二、周期四以及混沌态的过程.

逐渐升高电压, 当电压达到气体的击穿电压峰-峰值约 1400 V 时, 气隙发生放电. 观察波形可以发现, 放电电流周期与外施电压周期相同, 因此称之为周期一 (P1) 放电, 图 2(a) 给出了峰-峰值为 1755 V 时的 P1 放电电流波形. 图 2(b) 为对放电电流进行快速傅里叶变换 (FFT) 后得到的频谱图, 图 2(c) 和 (d) 则分别是 $0-25f_0$, $25f_0-50f_0$ 的频谱局部放大图. 可以明显地看出, 放电电流频谱只在 nf_0 (n 为自然数) 处才具有显著的频率分量, 因而可以确认放电电流的频率为 f_0 .

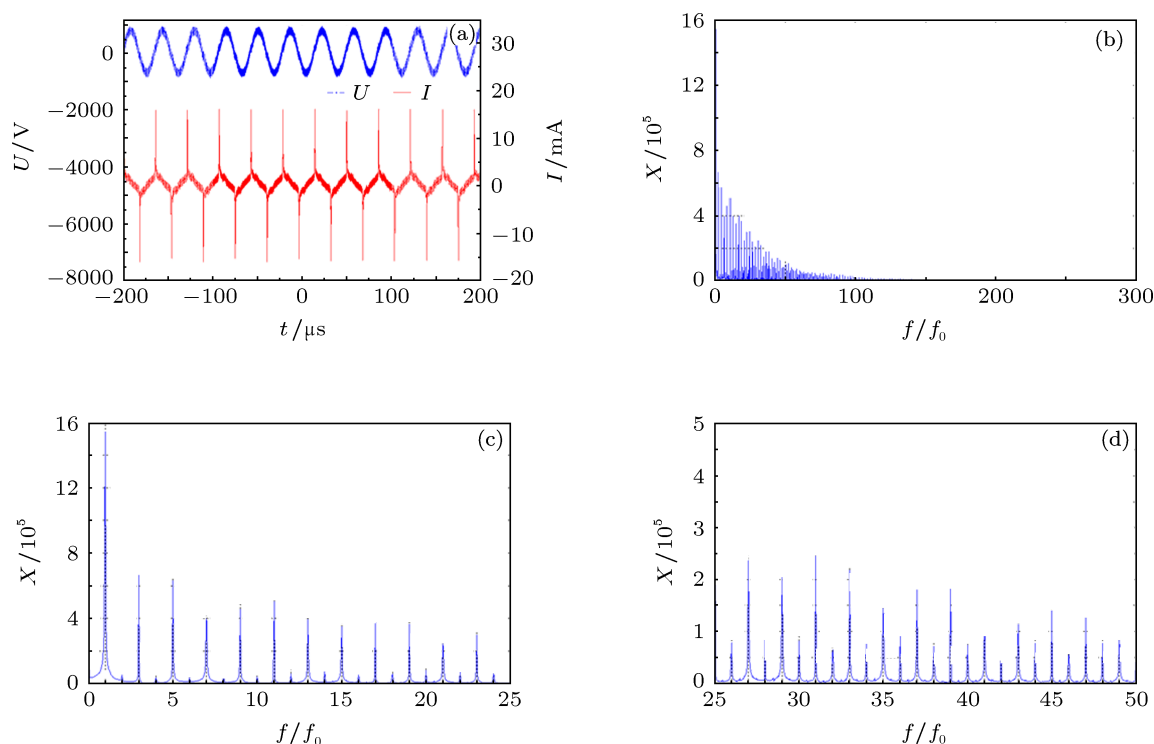


图 2 周期一态放电波形与放电电流的频谱 (a) 电源电压波形 (上) 与放电电流波形 (下); (b) 放电电流频谱 (频率分辨率为 1 kHz, 最高频率为 $18000f_0$); (c) $0-25f_0$ 的频谱局部放大图; (d) $25f_0-50f_0$ 的频谱局部放大图

气隙击穿后, 可以在较大的电压区间内观察到 P1 放电. 但是, 当电压增加到 1800 V, P1 放电无法维持, 这时放电电流的周期为外施电压的二倍, 即放电进入周期二 (P2) 态. 图 3(a) 给出了峰-峰值为 1800 V 时的 P2 放电波形, 图 3(b) 为放电电流的频谱图, 图 3(c) 和 (d) 则分别是 $0-25f_0$, $25f_0-50f_0$ 的频谱局部放大图. 可以清楚地发现, 放电电流的谱线仅在频率 $nf_0/2$ 处比较明显, 因而可以确认放电电流的频率为 $f_0/2$.

继续增加电压峰-峰值至 1830 V, 可以观察到放电由 P2 态进入周期四 (P4) 态, 图 4(a) 给出了此时的放电波形. 图 4(b) 为放电电流的频谱图, 图 4(c) 和 (d) 则分别是 $0-25f_0$, $25f_0-50f_0$ 的频谱局部放大图. 可以观察到, 放电电流频谱仅在 $nf_0/4$ 处才具有明显的频率分量, 因而可以确认放电电流的频率为 $f_0/4$.

进一步升高电压峰-峰值至 1847 V, 放电呈现无规则波动, 不具有明显的周期性, 放电进入混沌态,

图 5(a) 为此时的放电波形. 图 5(b) 为放电电流的频谱图, 图 5(c) 和 (d) 则分别是 $0\text{--}25f_0$, $25f_0\text{--}50f_0$ 的频谱局部放大图. 可以发现, 在 f_0 的整数倍频率与非整数倍频率下均有一定的频率分量存在. 在低

频处, 谱线分布稀疏且不均匀; 在高频处, 谱线密集近似呈连续状. 总之, 此时放电电流的频谱与周期态放电电流的频谱存在显著差异, 并具有一定的混沌态频谱特征.

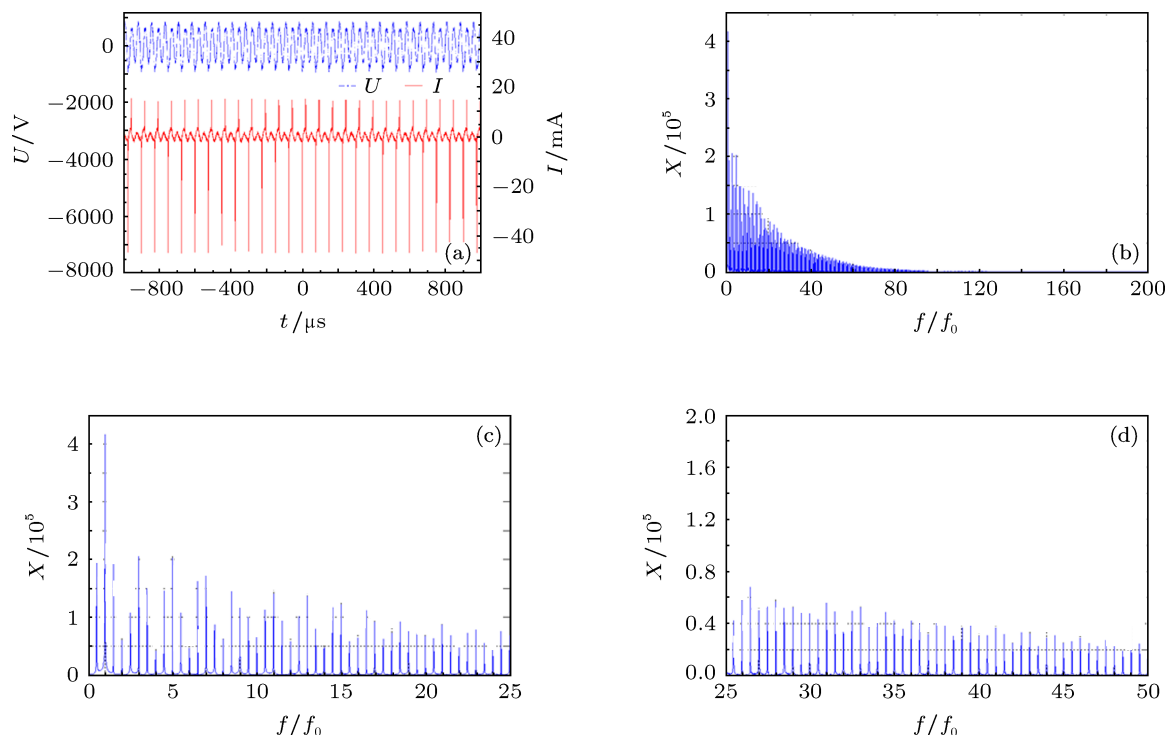


图 3 周期二态放电波形与放电电流的频谱 (a) 电源电压波形 (上) 与放电电流波形 (下); (b) 放电电流频谱 (频率分辨率为 250 Hz, 最高频率为 $4600f_0$); (c) $0\text{--}25f_0$ 的频谱局部放大图; (d) $25f_0\text{--}50f_0$ 的频谱局部放大图

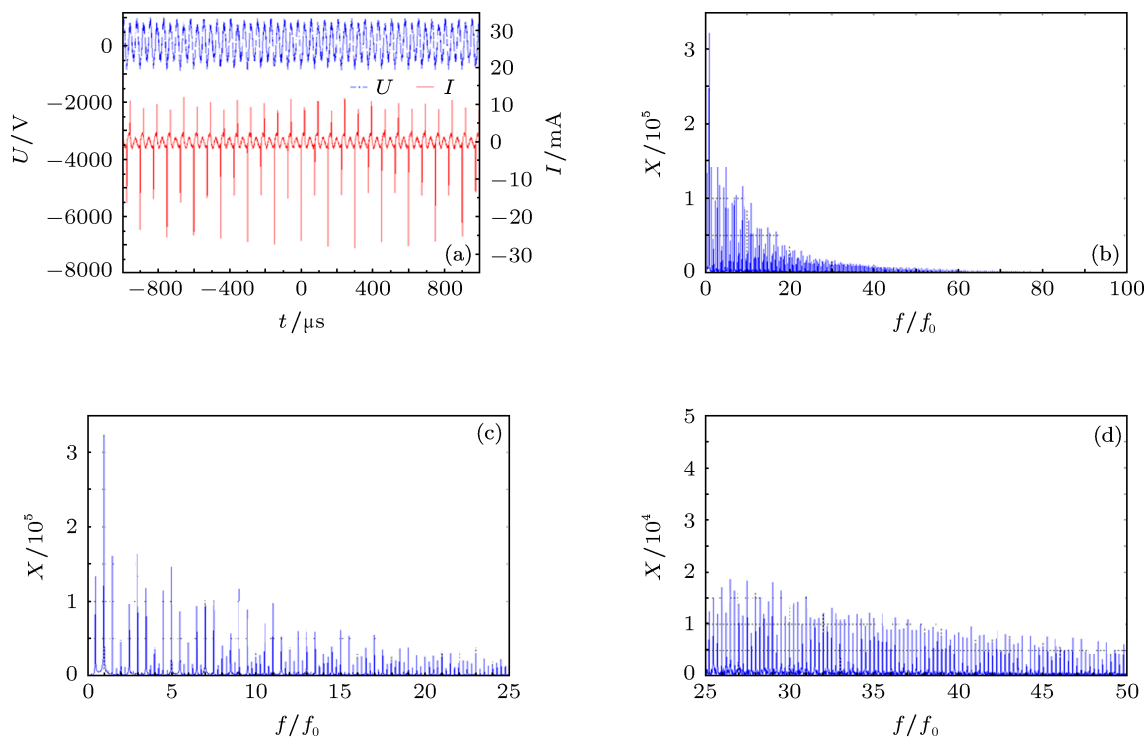


图 4 周期四态放电波形与放电电流的频谱 (a) 电源电压波形 (上) 与放电电流波形 (下); (b) 放电电流频谱 (频率分辨率为 250 Hz, 最高频率为 $4600f_0$); (c) $0\text{--}25f_0$ 的频谱局部放大图; (d) $25f_0\text{--}50f_0$ 的频谱局部放大图

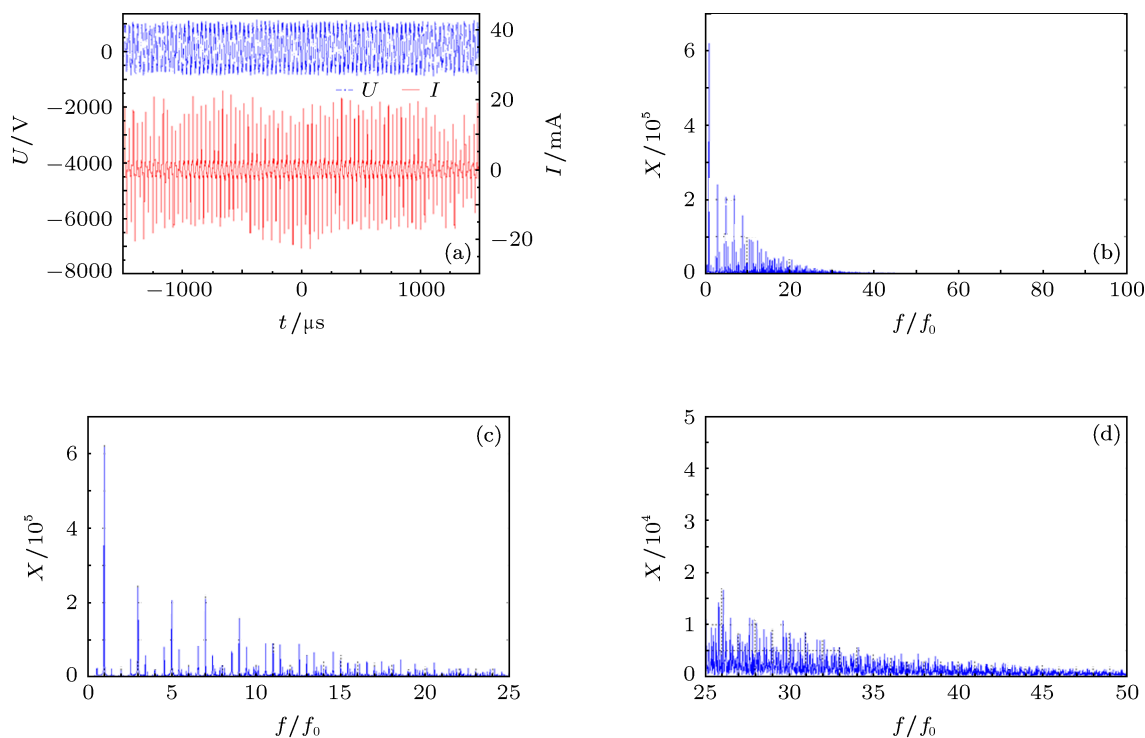


图5 混沌态放电波形与放电电流的频谱 (a) 电源电压波形(上)与放电电流波形(下); (b) 放电电流的频谱(频率分辨率为270 Hz, 最高频率为 $5000f_0$); (c) $0-25f_0$ 的频谱局部放大图; (d) $25f_0-50f_0$ 的频谱局部放大图

4 结论和展望

采用平行电极,进行了大气压氦气介质阻挡放电实验. 在一定的条件下,随着外施电压幅值的增加,可以依次观察到周期一、周期二、周期四和混沌放电,与之前的数值仿真报道一致. 因此,大气压氦气介质阻挡放电经倍周期分岔路径通向混沌的现象,不仅仅出现在数值仿真中,在现实实验中也

是确实存在的,在实际的介质阻挡放电应用中必须考虑这些非线性现象可能带来的各种影响. 显然,介质阻挡放电特殊的放电机理是产生倍周期分岔和混沌现象的一个重要原因,更深入的分析模型和产生机理还有待进一步的研究.

感谢华南理工大学电力学院硕士研究生王其明协助开展了实验工作.

- [1] Dong L F, Wang H F, Liu W L, He Y F, Liu F C, Liu S H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1802 (in Chinese) [董丽芳, 王红芳, 刘微粒, 贺亚峰, 刘富成, 刘书华 2008 物理学报 **57** 1802]
- [2] Kogelschatz U 2003 *Plasma Chem. Plasma Process.* **23** 1
- [3] Chen F F 1995 *Phys. Plasmas* **2** 2164
- [4] Zhang Y, Gu B, Wang W C, Peng X W, Wang D Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5532 (in Chinese) [张燕, 顾彪, 王文春, 彭许文, 王德真 2009 物理学报 **58** 5532]
- [5] Cheung P Y, Wong A Y 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 551
- [6] Qin J, Wang L, Yuan D P, Gao P, Zhang B Z 1989 *Phys. Rev. Lett.* **63** 163
- [7] Ding W X, Huang W, Wang X D, Yu C X 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 170
- [8] Cheung P Y, Donovan S, Wong A Y 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 1360
- [9] Zhang Y T, Wang D Z, Kong M G 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 063304
- [10] Wang Y H, Zhang Y T, Wang D Z, Kong M G 2007 *J. Appl. Phys.* **90** 071501
- [11] Shi H, Wang Y H, Wang D Z 2008 *Phys. Plasmas* **15** 122306
- [12] Zhang J, Wang Y H, Wang D Z 2011 *Thin Solid Films* **519** 7020
- [13] Zhang J, Wang Y H, Wang D Z 2010 *Phys. Plasmas* **17** 043507

Experimental confirmation on period-doubling bifurcation and chaos in dielectric barrier discharge in helium at atmospheric pressure*

Wang Xiao-Qing¹⁾²⁾ Dai Dong^{1)2)†} Hao Yan-Peng¹⁾ Li Li-Cheng¹⁾

1) (*School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*)

2) (*State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 29 May 2012; revised manuscript received 21 June 2012)

Abstract

A series of dielectric barrier discharge (DBD) experiments in helium at atmospheric pressure is carried out under a parallel electrode configuration. The discharge waveforms are observed in time-domain and analyzed in frequency-domain. Results show that under a certain condition the discharge can experience period-one, period-two and period-four discharges and finally enters into chaotic discharge as the amplitude of the driving voltage is increased. Our work verifies that the period-doubling route into chaos in DBD at atmospheric helium pressure can be observed in experiment, beside in numerical simulations.

Keywords: dielectric barrier discharge, period-doubling bifurcation, chaos

PACS: 05.45.-a, 52.80.Tn

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. 2011ZM0016), the State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, China (Grant No. EIPE10210), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50807018).

† E-mail: ddai@scut.edu.cn