

介质阻挡放电中同心圆环斑图的产生机理

刘伟波 董丽芳

Formation mechanism of concentric-ring pattern in dielectric barrier discharge

Liu Wei-Bo Dong Li-Fang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 245202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.245202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.245202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率微波土壤击穿的数值验证研究

Numerical validation study of high power microwave soil breakdown

物理学报.2015, 64(4): 045203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.045203>

高功率全光纤结构主振荡功率放大器中模式不稳定现象的实验研究

Experimental study on mode instability in high power all-fiber master oscillator power amplifier fiber lasers

物理学报.2014, 63(8): 085202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.085202>

基于高斯型脉冲的非线性 Ramsey 干涉

Nonlinear Ramsey interference with Gaussian pulse

物理学报.2013, 62(22): 225202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.225202>

一类扰动发展方程近似解

Approximate solution for a class of the disturbed evolution equation

物理学报.2012, 61(15): 155202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.155202>

介质阻挡放电中同心圆环斑图的产生机理*

刘伟波¹⁾²⁾ 董丽芳^{1)†}

1)(河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

2)(滨州学院航空工程学院, 滨州 256603)

(2015年8月10日收到; 2015年9月1日收到修改稿)

在氩气空气混合气体介质阻挡放电中, 得到了同心圆环斑图. 采用高速照相机拍摄了同心圆环斑图在外加电压半周期时间尺度内的放电照片, 发现放电丝是构成同心圆环斑图的基本单元. 通过对比高速照相机拍摄连续三个正半周期和负半周期的六张放电图像, 证实肉眼看到的同心圆环斑图是由不同半周期放电位置和不同的大量放电丝长时间积累叠加产生的. 随着外加电压升高, 同心圆环斑图会演化成螺旋波, 然后重新转变成同心圆环斑图. 通过对两种斑图的形成和转化特点进行分析, 推断该螺旋波应具有和同心圆环斑图相似的动力学机理. 计算了两种斑图的放电功率, 发现功率随外加电压增加近似满足线性增长的关系. 利用相关计算的方法计算并对比了不同延迟时间下两种斑图的互相关系数, 结果表明, 同心圆环斑图的互相关系数相对较低且无明显规律, 螺旋波的互相关系数稍高且具有随延迟时间增大呈现振荡的特点.

关键词: 介质阻挡放电, 同心圆环斑图, 螺旋波, 产生机理

PACS: 52.35.Mw, 47.54.-r, 52.80.Tn

DOI: 10.7498/aps.64.245202

1 引言

近些年, 介质阻挡放电 (DBD) 系统中的斑图受到了研究者的广泛关注. 人们在 DBD 系统中发现了种类繁多的斑图类型^[1-5], 很多斑图形式在其他非线性系统中未曾出现. DBD 斑图具有发光可视的特点, 可以利用光学方法很方便地研究其时空结构^[6,7], 因此在研究斑图形成、促进斑图理论发展等基础研究方面起着重要的作用. 同时, DBD 斑图也表现出在应用物理方面巨大的优势和潜力, 成为各个领域的研究热点. 比如, 低于室温条件下产生的冷等离子体 DBD 斑图可以在低损伤材料处理方面得到应用^[4]; 作为一种新型的可调谐等离子体光子晶体, DBD 斑图有望在电磁波传输及控制领域发挥重要的作用^[8].

同心圆环斑图是 DBD 系统中最常见, 最基本

的斑图形式之一^[9-13], 对于它的深入研究有助于人们认识 DBD 斑图的本质和 DBD 系统的非线性特点, 构建更适合 DBD 系统的模型. Shang 和 Wang^[9] 利用二维漂移扩散模型在大气压氩气介质阻挡放电中模拟得到同心圆环斑图, 认为沉积在介质板表面的电荷在放电演化中发挥了重要作用; Duan 等^[10] 通过研究不同电极形状下同心圆环斑图的性质, 分析了边界效应对斑图产生的影响; Gurevich 等^[11] 用高速照相机研究了 DBD 中同心圆环斑图的时空动力学行为, 发现他们得到的同心圆环斑图是两套圆环子结构的叠加. 这些根据同心圆环斑图所得出的结论, 对研究其他更为复杂的斑图都有着重要的借鉴和指导作用.

针对同心圆环斑图的研究结果也会对螺旋波的相关理论产生重要的推动和促进作用. 螺旋波广泛存在于自然界及各种实验系统中, 对它的研究已经成为当前非线性科学中的一个重要课题. 人们发

* 国家自然科学基金 (批准号: 11175054, 11375051)、河北省应用基础研究计划重点基础研究项目 (批准号: 15961105D)、河北省教育厅项目 (批准号: LJRC011) 和山东省自然科学基金 (批准号: ZR2014AQ023) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: donglfhbu@163.com

现, 某些情况下螺旋波的存在对于人体的健康非常有害, 需要想法将它消除^[14,15]. 实验和数值模拟都已证实, 同心圆环斑图和螺旋波在一定条件下是可以相互转化的, 利用同心圆环消除螺旋波是一种常用的方法^[16-18]. 本文所研究的同心圆环斑图, 在演化过程中也出现了螺旋波. 通过研究同心圆环斑图的各项性质, 并与螺旋波进行对比, 其结果对于揭示螺旋波的动力学本质、控制螺旋波具有一定的意义.

2 实验装置

实验装置如图1所示. 放电电极是两个装满水的圆柱形树脂容器, 用厚度为1.5 cm的石英封

住作为电介质. 金属环浸在电极内的水中, 和驱动频率为58 kHz的正弦交流电源相连. 电极之间放置一个厚度为3.4 mm、边长为2.4 cm的中空六边形玻璃板, 使放电被限制在该区域中. 整个电极放入充满空气和氩气混合气体的密闭反应室中, 空气和氩气的混合比例为1:4. 反应室两侧设有透明的观察窗, 分别利用普通的数码照相机(Konica Minolta Dimage Z2)和高速照相机(HSFC Pro, 3channels)从端面拍摄长时间尺度和短时间尺度下的斑图放电照片. 采用高压探头(Tektronix P6015A, 1000×)测量放电电压, 给电极串联一个50 Ω的小电阻来测量放电电流, 电压和电流的数据用数字示波器(Tektronix DPO 4054B)记录.

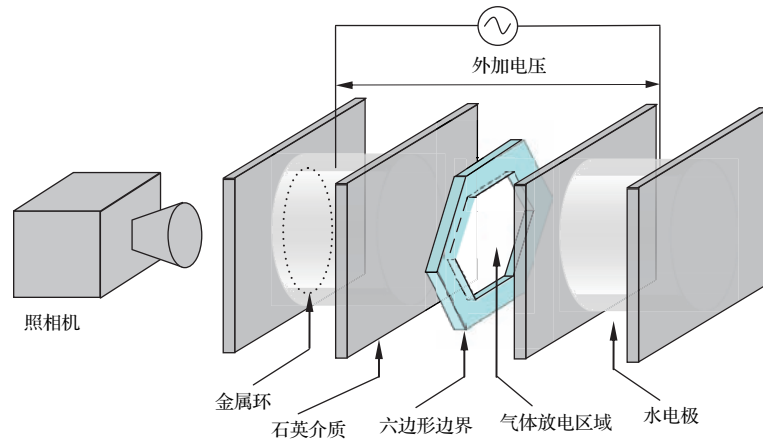


图1 (网刊彩色) 实验装置简图

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of the experimental setup.

3 实验结果与讨论

图2(a)给出了普通数码照相机拍摄的曝光时间为40 ms的同心圆环斑图照片(周围白色的虚线表示六边形的放电边界), 图2(b)是相应的电流电压脉冲波形图. 可以看出, 在每个外加电压半周期, 该同心圆环斑图放电对应一次明显的电流脉冲, 其电流信号波形与文献^[10, 11]中同心圆环斑图的电流信号明显不同, 因此它们属于不同类型的DBD同心圆环斑图.

图3给出了该同心圆环斑图的演化序列. 随着外加电压的升高, 放电经历均匀放电(图3(a), $U = 2.4$ kV)、无序状态(图3(b), $U = 2.7$ kV)、同心圆环斑图1(图3(c), $U = 2.8$ kV)、静态螺旋波(图3(d), $U = 2.85$ kV)、同心圆环斑图2(图3(e),

$U = 3.2$ kV)、六边形斑图(图3(f), $U = 3.4$ kV). 可以看出同心圆环斑图1比同心圆环斑图2具有更多的环数, 且亮度上要弱一些.

图2(a)的斑图照片是长时间尺度下上千个电压半周期放电叠加的宏观效果, 它部分掩盖了同心圆环斑图的瞬态演化过程, 而要深入研究其放电机理和特点, 对单个电压半周期的放电特征进行研究是非常有必要的. 高速照相机具有纳秒量级的时空分辨能力, 可以实现单个电流脉冲的时空分辨测量. 我们所用的高速照相机有三个独立通道, 其各自曝光时间和延迟时间可以通过控制电脑进行设置, 实现对不同放电阶段放电过程的记录. 由于单周期放电比较微弱, 高速照相机还具有信号叠加功能, 即对于电流脉冲重复性好的放电, 可以利用高速照相机的loop模式对单个电流脉冲进行

多周期循环拍照。图4给出了利用高速照相机单个通道对放电脉冲进行拍照的结果,图4(a)—(d)对应的拍照累加周期数分别为1, 5, 10, 15。曝光时间选择为0.8 μs。很容易看出,肉眼看上去比较

均匀的同心圆环斑图,仍然是由空间中随机分布的放电丝所构成的,单个周期的放电形不成圆环(图4(a)),多个周期的放电叠加才呈现圆环形状(图4(b)—(d))。

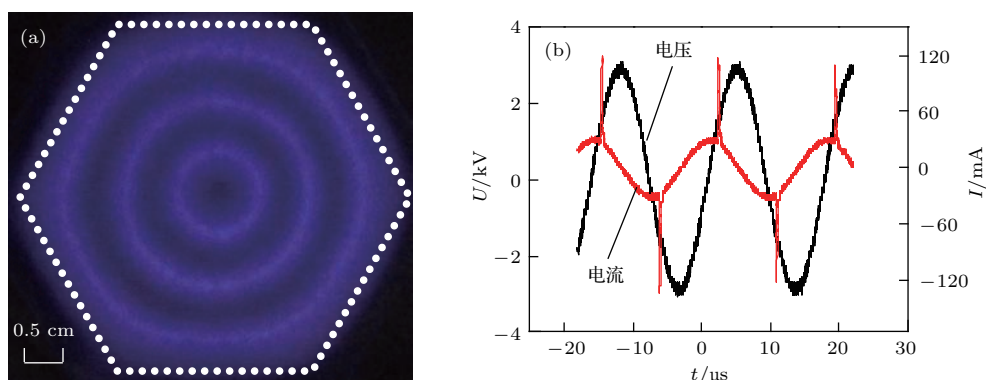


图2 (网刊彩色) 在空气氩气混合气体放电中得到的同心圆环斑图照片(a)及对应的电流电压脉冲波形图(b) 实验条件: 外加电压 $U = 2.8$ kV, 电压频率 $f = 58$ kHz, 气压 $p = 228$ Torr (1 Torr = 1.33×10^2 Pa), 空气含量 $\chi = 20\%$

Fig. 2. (color online) (a) A photograph of concentric-ring pattern observed in DBD in an air/argon mixture; (b) waveforms of the applied voltage and the current of the concentric-ring pattern. Experimental parameters: applied voltage $U = 2.8$ kV, voltage frequency $f = 58$ kHz, gas pressure $p = 228$ Torr (1 Torr = 1.33×10^2 Pa), air content $\chi = 20\%$.

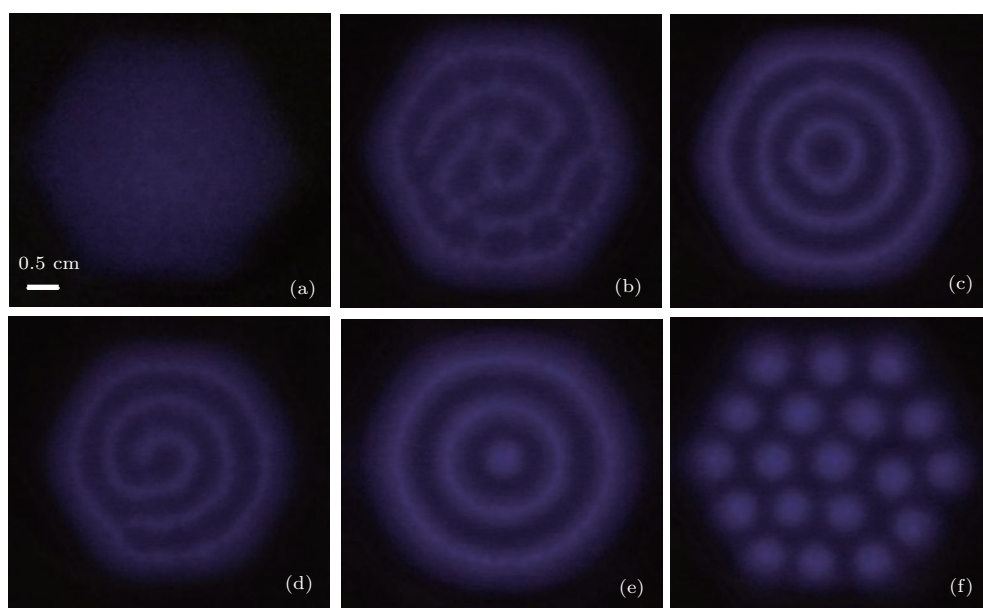


图3 (网刊彩色) 同心圆环斑图演化序列 (a) 均匀放电, $U = 2.4$ kV; (b) 无序模式, $U = 2.7$ kV; (c) 同心圆环斑图1, $U = 2.8$ kV; (d) 静态螺旋波, $U = 2.85$ kV; (e) 同心圆环斑图2, $U = 3.2$ kV; (f) 六边形斑图, $U = 3.4$ kV

从图4可见,构成同心圆环斑图的放电丝在每周期出现的位置不同。为了更好地研究相邻放电之间的相互关系,我们用高速照相机拍摄了连续三个正半周期和负半周期的六张放电照片(由于高

速照相机只有三个通道,最多只能拍摄六张连续脉冲放电的照片),见图5。曝光时间和延迟时间根据图2(b)的电流电压波形图给出,分别为0.8和8 μs。图6给出了图5这六张连续半周期放电照片

的叠加, 为了更加直观, 分别给六张照片染上了颜色(图5(a)—(f)分别是红、黄、绿、淡蓝、蓝和紫色). 对比图5和图6可以看出, 不同电压半周期放电

所出现的位置重合较小, 肉眼看到的同心圆环斑图是由在不同半周期放电位置不同的大量放电丝长时间积累所叠加产生的.

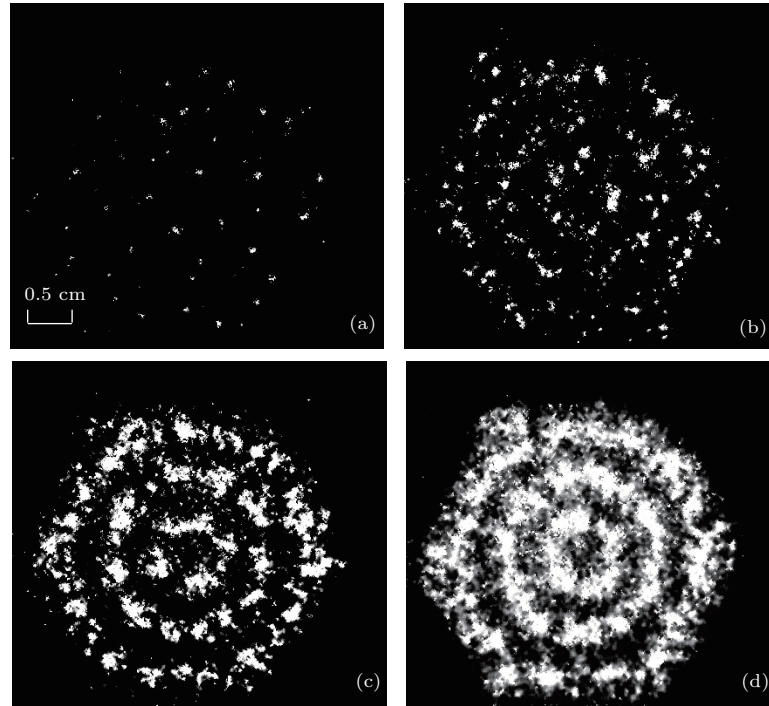


图4 (网刊彩色) 不同拍照累加周期数对应的同心圆环斑图放电照片 (a) 1个周期; (b) 5个周期; (c) 10个周期; (d) 15个周期

Fig. 4. (color online) Images of concentric-ring pattern with different time integrations: (a) Loop=1; (b) loop=5; (c) loop=10; (d) loop=15.

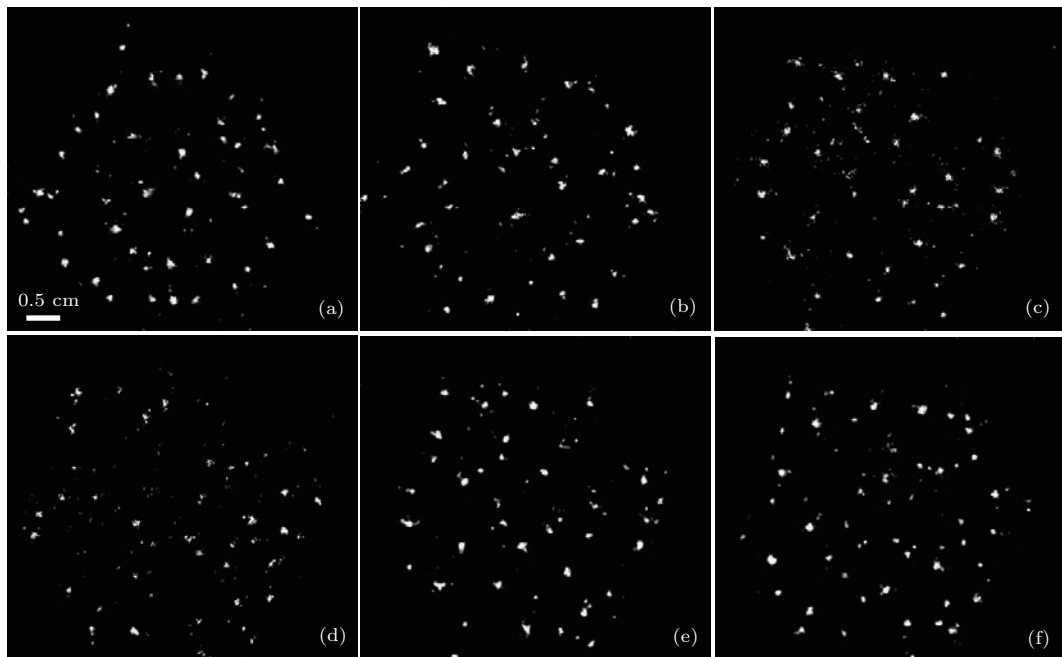


图5 (网刊彩色) 利用高速照相机拍摄的同心圆环斑图连续三个正半周期和负半周期的放电瞬时照片, 每张照片曝光时间 $0.8 \mu\text{s}$, 相邻照片延迟时间 $8 \mu\text{s}$.

Fig. 5. (color online) Instantaneous images corresponding to three successive positive and negative half voltages of the concentric-ring pattern obtained by the ICCD. The exposure time of each image is $0.8 \mu\text{s}$ and the delay time between two adjacent images is $8 \mu\text{s}$.

图3给出的演化序列显示随外加电压升高同心圆环斑图和螺旋波之间可以发生相互转化. 参考文献[19]对该螺旋波进行了详细的研究, 通过与本文内容的对比, 证实两种斑图的放电特点是相似的, 即基本构成单元都是放电丝, 都是每半周期放电丝出现在不同位置, 长时间的积累效应形成了各自的宏观形状. 下面我们将对同心圆环斑图和螺旋波的性质进行研究和对比, 试图揭示两种斑图的相互转化关系, 得到其产生机理.

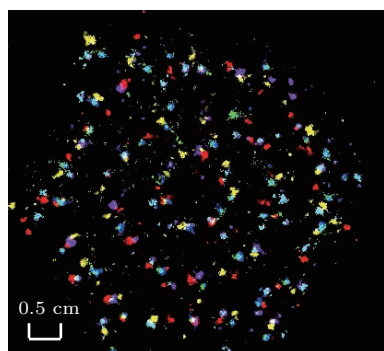


图6 (网刊彩色) 图5中六张瞬时照片的染色叠加, 图5(a)–(f) 分别染成红、黄、绿、淡蓝、蓝和紫色
Fig. 6. (color online) Superposition of Figs. 5(a)–(f). Spots in Figs. 5(a)–(f) are colored red, yellow, green, light blue, blue and purple, respectively.

我们知道, 边界效应对斑图的产生及稳定性具有重要的作用[10], 当斑图的形状与放电边界的形状一致时, 斑图表现得较为稳定. 而本实验的放电发生在六边形的放电边界内, 六边形的边界不利于圆形的同心圆环斑图的稳定存在, 加之放电系统内不可避免地存在着某些局部性的如气流、电压等的扰动, 外界条件稍有变化即可能使同心圆环斑图发生断裂. 不同半径的环断裂后有时候会连起来从而形成了螺旋波斑图. 同样, 螺旋波也是不稳定的, 它受到扰动后也可再形成同心圆环斑图. 实验中也曾经观察到, 有时候外加电压未发生变化, 长时间之后螺旋波也会变成同心圆环斑图, 应该就是气流、温度、湿度等外界条件变化的影响. 只是相对于外加电压的易于改变, 其他外界因素对系统稳定性的影响要稍慢和稍小一些. 众所周知, 反应扩散系统中的螺旋波可分为可激发系统中的螺旋波和时序振荡系统中的螺旋波, 两者都做振荡运动[20]. 相对于其他螺旋波, 本实验中得到的螺旋波要稳定得多, 它可以在系统稳定时静止10多分钟[19]. 我们认为系统处于参量稳定区是该螺旋波可以保持静止不动的原因, 直到有外界扰动打破这种平衡而使

螺旋波发生断裂. 外界条件稳定后, 系统很快又会达到新的平衡状态, 从而形成新的静态螺旋波或者同心圆环斑图. 这说明, 该螺旋波的动力学性质应该不同于其他的可激发螺旋波和相螺旋波[21–23], 其动力学机理应该是与同心圆环斑图是一致的, 即由同心圆环斑图的破裂所形成.

放电功率是衡量放电特性的重要参量. 为了分析同心圆环斑图的形成及与螺旋波之间的演化, 我们计算了不同放电阶段所对应的放电功率, 给出了随着电压升高演化序列中的六种状态所对应的放电功率变化情况, 如图7所示. 放电功率根据各个状态所对应的电流电压脉冲波形图, 利用李萨如图形法计算得出[24]. 很明显, 放电功率随着外加电压的升高而增加. 与之前的均匀放电和无序模式相比, 同心圆环斑图1的放电功率存在突变. 而从同心圆环斑图1到螺旋波、同心圆环斑图2、再到六边形斑图的转化过程中, 放电功率没有发生突变, 基本随电压升高满足线性增长的关系.

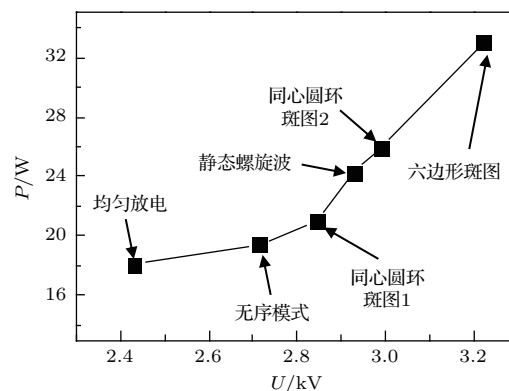


图7 同心圆环斑图演化序列中不同状态对应的放电功率变化
Fig. 7. Variation of discharge power with different states in the evolution sequence of concentric-ring pattern.

虽然具有类似的形成机理, 但同心圆环斑图和螺旋波肉眼看上去的样子是不同的. 为了揭示宏观表现形式的不同在微观放电上有什么具体的体现, 我们利用相关计算的方法分别计算了同心圆环斑图和螺旋波斑图在不同半周期放电瞬时照片之间的互相关系数, 以获得不同延迟时间放电的相似程度. 在一些非线性系统中, 相关计算已经成为一种非常有用的研究斑图机理的工具[25,26], 具体的计算方法可参考文献[19]. 我们通过高速照相机拍摄了大量的连续三个正半周期和负半周期脉冲的放电照片, 计算并统计不同半周期放电之间的互相关

系数, 统计结果如图 8 所示. 可以发现, 同心圆环斑图放电的互相关系数较低, 随延迟时间增大无明显变化规律; 螺旋波放电的互相关系数稍高, 且随延迟时间增大呈现振荡的特点, 即正半周期与负半周期放电的相关性较差, 而正半周期与正半周期、负半周期与负半周期放电的相关性稍好. 螺旋波的相关性稍高于同心圆环斑图, 是因为螺旋波的稳定性要稍差于同心圆环斑图, 在实验中螺旋波易于转化为同心圆环斑图, 而反之则较难发生一些. 这与参考文献 [19] 中相关系数与斑图稳定性成反比的结论是符合的. 而这些规律背后所蕴藏的物理本质, 目前还不是特别清楚.

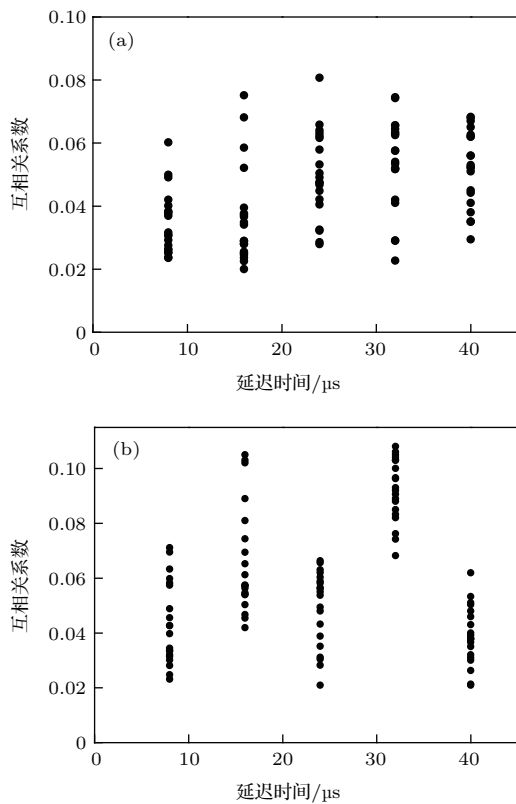


图 8 不同延迟时间下瞬时照片之间的互相关系 (a) 同心圆环斑图; (b) 螺旋波

Fig. 8. Cross correlation between two instantaneous images as a function of the delay time: (a) Concentric-ring pattern; (b) spiral pattern.

4 结 论

应用简单的水电极 DBD 装置, 在氩气空气混合气体中产生了同心圆环斑图. 采用高速照相机对电压半周期尺度的放电图像进行了拍照, 证实放电丝是该同心圆环斑图的基本构成单元. 通过对不同半周期的放电图像进行对比, 发现肉眼看到的同心

圆环斑图是不同半周期放电位置不同的大量放电丝长时间积累叠加所产生的. 对比了演化过程中出现的螺旋波和同心圆环斑图的放电特点, 分析了该螺旋波的形成机理, 推断该螺旋波应具有和同心圆环斑图类似的动力学机理. 计算了同心圆环斑图演化过程中各阶段的电功率, 发现同心圆环斑图与螺旋波的功率随外加电压增加近似满足线性增长的关系. 相关计算的结果表明: 同心圆环斑图的互相关系数较低且无明显规律, 螺旋波的互相关系数稍高且具有随延迟时间增大呈现振荡的特点. 本文结果对于深入理解 DBD 系统中同心圆环的形成机理、探讨同心圆环斑图和螺旋波的相互关系、促进螺旋波相关理论的发展, 都具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] Sinclair J, Walhout M 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 035005
- [2] Astrov Y A, Lodygin A N, Portsel L M 2015 *Phys. Rev. E* **91** 032909
- [3] Zheng P C, Wang X M, Wang J M, Yu B, Liu H D, Zhang B, Yang R 2015 *Plasma Sources Sci. Technol.* **24** 015010
- [4] Stauss S, Muneoka H, Ebato N, Oshima F, Pai D Z, Terashima K 2013 *Plasma Sources Sci. Technol.* **22** 025021
- [5] Zhu P, Dong L F, Yang J, Gao Y N, Wang Y J, Li B 2015 *Phys. Plasmas* **22** 023507
- [6] Dong L F, Shen Z K, Li B, Bai Z G 2013 *Phys. Rev. E* **87** 042914
- [7] Guikema J, Miller N, Niehof J, Klein M, Walhout M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3817
- [8] Wang Y J, Dong L F, Liu W B, He Y F, Li Y H 2014 *Phys. Plasmas* **21** 073505
- [9] Shang W L, Wang D Z 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1992
- [10] Duan X X, Ouyang J T, Zhao X F, He F 2009 *Phys. Rev. E* **80** 016202
- [11] Gurevich E L, Zanin A L, Moskalenko A S, Purwins H G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 154501
- [12] Dong L F, Yue H, He Y F, Fan W L, Xiao H, Chen J Y, Bai Z G 2010 *Phys. Plasmas* **17** 082302
- [13] Dong L F, Yue H, Fan W L, Li Y Y, Yang Y J, Xiao H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 065206 (in Chinese) [董丽芳, 岳晗, 范伟丽, 李媛媛, 杨玉杰, 肖红 2011 物理学报 **60** 065206]
- [14] Hörning M 2012 *Phys. Rev. E* **86** 031912
- [15] Chen X J, Qiao C G, Wang L L, Zhou Z W, Tian T T, Tang G N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 128201 (in Chinese) [陈醒基, 乔成功, 王利利, 周振玮, 田涛涛, 唐国宁 2013 物理学报 **62** 128201]
- [16] Zhang H, Hu B, Hu G 2003 *Phys. Rev. E* **68** 026134
- [17] Schwabe M, Konopka U, Bandyopadhyay P, Morfill G E 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 215004

- [18] Liu F C, Wang X F, Li X C, Dong L F 2007 *Chin. Phys.* **16** 2640
- [19] Dong L F, Liu W B, Wang Y J, Zhang X P 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 2
- [20] Ouyang Q 2010 *Introduction to Nonlinear Science and Pattern Dynamics* (Vol. 1) (Beijing: Peking University Press) p188 (in Chinese) [欧阳颀 2010 非线性科学与斑图动力学导论 (第一版) (北京: 北京大学出版社) 第 188 页]
- [21] Ginn B T, Steinbock O 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 158301
- [22] Bansagi Jr T, Meyer K J, Steinbock O 2008 *J. Chem. Phys.* **128** 094503
- [23] Deng L Y, Zhang H, Li Y Q 2010 *Phys. Rev. E* **81** 016204
- [24] Dong L F, Mao Z G, Yin Z Q, Ran J X 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 5142
- [25] Ning L, Hu Y, Ecke R E, Ahlers G 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 2216
- [26] Encinas-Sanz F, Melle S, Calderón O G 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 213904

Formation mechanism of concentric-ring pattern in dielectric barrier discharge*

Liu Wei-Bo¹⁾²⁾ Dong Li-Fang^{1)†}

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

2) (Aviation Engineering Institute, Binzhou University, Binzhou 256603, China)

(Received 10 August 2015; revised manuscript received 1 September 2015)

Abstract

Concentric-ring pattern is observed in an Ar/air mixture dielectric barrier discharge. The discharge images within one half voltage circle are taken by an intensified-charge coupled device camera, indicating that the discharge filaments are the basic units of the concentric-ring pattern. By comparing the six instantaneous images corresponding to three successive positive and negative half voltages, it is proved that the concentric-ring pattern seen with naked eyes is formed by the numerous discharge filaments located at different positions during successive acquisition intervals. With applied voltage increasing, concentric-ring pattern can transform into spiral, and then into concentric-ring pattern again. By analyzing the features of formation and transformation of these two patterns, it is inferred that the two patterns have similar dynamic mechanisms. Discharge powers of concentric-ring pattern and spiral are calculated respectively, and the results show that the power increases linearly approximately with applied voltage increasing. The correlation coefficients of concentric-ring pattern are compared with those of spiral, and the results show that the correlation coefficient of concentric-ring pattern is relatively low and irregular, while the correlation coefficient of spiral is relatively high and has an oscillatory characteristic.

Keywords: dielectric barrier discharge, concentric-ring pattern, spiral pattern, formation mechanism

PACS: 52.35.Mw, 47.54.-r, 52.80.Th

DOI: 10.7498/aps.64.245202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11175054, 11375051), the Key Basic Project supported by the Research Project in the Application Basic Research Plan of Hebei Province, China (Grant No. 15961105D), the Research Foundation of Education Bureau of Hebei Province, China (Grant No. LJRC011), and the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2014AQ023).

† Corresponding author. E-mail: donglfhbu@163.com